



Comunicacions peer-to-peer entre vehicles i/o vehicles i estacions fixes

Jordi Solsona Esteve

Màster Universitari d'Enginyeria de Telecomunicació UOC-URL
Telemàtica

Xavi Vilajosana Guillen

José López Vicario

12 de Juny de 2016



Aquesta obra està subjecta a una llicència de [Reconeixement-NoComercial-SenseObraDerivada 3.0 Espanya de Creative Commons](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0/es/)

FITXA DEL TREBALL FINAL

Títol del treball:	<i>Comunicacions peer-to-peer entre vehicles i/o vehicles i estacions fixes</i>
Nom de l'autor:	<i>Jordi Solsona Esteve</i>
Nom del consultor:	<i>José López Vicario</i>
Nom del PRA:	<i>Xavi Vilajosana Guillen</i>
Data de lliurament (mm/aaaa):	<i>Juny/2016</i>
Titulació o programa:	<i>Màster Universitari d'Enginyeria de Telecomunicació UOC-URL</i>
Àrea del Treball Final:	<i>Telemàtica</i>
Idioma del treball:	<i>Català</i>
Paraules clau	<i>VANET, Simulació, IoT.</i>

Resum del Treball (màxim 250 paraules):

Una de les característiques de la societat actual és el creixent parc automobilístic el qual genera els reptes de millorar la seguretat viària i optimitzar fluxos de transit.

Si bé és cert que les millores en matèria de seguretat passiva en el disseny actual dels automòbils ha millorat sensiblement en els últims anys, per regla general, aquests tenen un àmbit d'actuació limitat al propi vehicle, de manera que l'abast de la informació recaptada es limita a la que pugui obtenir únicament la xarxa de sensors del propi automòbil.

La resposta a aquesta limitació ve donada per l'establiment de xarxes de comunicacions entre vehicles o entre vehicle i infraestructura, per la qual la informació recaptada individualment per cada vehicle es posa a disposició de la resta de vehicles als quals sigui susceptible de ser útil per tal d'evitar accidents de trànsit, evitar embussos o enviar informació de serveis.

Aquest tipus de xarxes anomenades VANET (Vehicular Ad-hoc NETWORKS), les quals s'emmarquen dins el paradigma de IoT, són objecte d'anàlisi teòric dels principals elements que les componen, les característiques de l'entorn, les aplicacions, els reptes a superar, els possibles protocols alternatius, les capes que les componen, gestió de rutes, els principals estàndards actualment existents, etc..

L'anàlisi teòric ve complementat per un exemple de simulació basat en programari lliure pel qual s'apliquen els principals conceptes teòrics descrits a la primera part del TFM.

Abstract (in English, 250 words or less):

One of the characteristics of modern society is the growing number of cars which generates the challenges of improving road safety and optimizing traffic flows.

It is true that improvements in terms of passive safety in the current design of cars has improved substantially in recent years, but in general terms, they have a limited scope focused in the vehicle itself, that means that the scope of this information collected is limited to what can be gathered only from the sensor network's own car.

The answer to this limitation is due to the establishment of communication networks between each vehicle and infrastructure, for which the information collected for each individual vehicle now is available to the rest of vehicles, which is likely to be useful in order to prevent accidents, avoid traffic jams or send information services.

This type of networks is called VANET (Vehicular Ad-hoc NETWORKS), which are part of IoT paradigm, are subject of theoretical analysis of the main elements that make up the characteristics of the environment, applications, challenges to overcome, the possible alternative protocols, the layers that make up, the routing management, the major existing standards, etc..

The theoretical analysis is supplemented by an example of simulation, based on open source software, where the main concepts explained in the first part of the present TFM are applied.

Paraules clau (entre 4 i 8):

VANET, RF, vehicle, simulació, IoT, sensors, mobilitat.

Índex

1.	Introducció.....	5
1.1.	Context i justificació del Treball	5
1.2.	Objectius del Treball	5
1.3.	Enfocament i mètode seguit.....	6
2.	Context tecnològic.....	7
2.1.	Aplicacions	9
3.	Elements bàsics d'una xarxa VANET	11
3.1.	On Board Unit.....	13
3.2.	Road Side Unit	16
3.3.	Xarxes d'accés alternatives.....	18
3.4.	Models de mobilitat.....	22
3.5.	Anàlisi de la capa física	26
3.5.1.	Classificació teòrica del canal	28
3.5.2.	Models de propagació	30
3.6.	Protocols de gestió de rutes	32
3.6.1.	Protocols proactius.....	32
3.6.2.	Protocols reactius.....	34
3.6.3.	Valoració teòrica del protocols d'enrutat	36
3.7.	Anàlisi d'estàndards i protocols alternatius.....	38
3.8.	Estàndard americà	39
3.8.1.	Descripció general.....	39
3.8.2.	Capa física	41
3.8.3.	Capa d'enllaç de dades.....	45
3.8.4.	Capes de xarxa i transport: IEEE 1609.3 (WSMP).....	49
3.9.	Estàndard europeu	53
4.	Simulació.....	57
4.1.	Descripció.....	59
4.2.	Entorn de simulació	62
4.3.	Resultats obtinguts	69
4.3.1.	Valors per defecte	69
4.3.2.	Augment de la potència de transmissió.....	71
4.3.3.	Disminució del nombre de nodes	72

4.3.4. Canvi del model de propagació	74
4.3.5. Canvi del model de gestió de rutes	75
4.3.6. Evolució de les prestacions conforme augmenta el nombre de nodes	77
4.3.7. Evolució de les prestacions amb l'augment de la velocitat dels nodes	78
4.4. Conclusions.....	80
5. Conclusions finals.	81
6. Glossari.....	83
7. Bibliografia	85
7.1. Recursos web.....	85
7.2. Llibres.....	89

Llista de figures

Figura 1 Entorn d'operació d'una xarxa VANET	11
Figura 2 On board Unit.....	14
Figura 3 Ubicació i diagrama radiació d'antena a OBU	15
Figura 4 Comunicacions V2I i V2V	17
Figura 5 Xarxa mallada basada en wi-fi	21
Figura 6 Simulador aïllat.....	24
Figura 7 Simulador de trànsit i xarxa embeguts	24
Figura 8 Simulador federat.....	25
Figura 9 Modelació canal RF ITU R1411	31
Figura 10 Comparativa flooding tradicional vs OLSR	33
Figura 11 Torre protocols estàndard VANET americà (DSRC)	39
Figura 12 Comparativa OSI vs DSRC	39
Figura 13 Assignació espectre radioelèctric DSRC	40
Figura 14 Estructura trama PPDU	44
Figura 15 Relació MPDU amb PPDU	45
Figura 16 Diagrama implementació QoS a DSRC	47
Figura 17 Relació control d'accés AC amb paràmetres de transmissió	48
Figura 18 Distribució temporal canals CCH i SCH	49
Figura 19 Estructura de la trama WSMP	51
Figura 20 Estructura de la trama WSA.....	51
Figura 21 Comparativa torre OSI vs C-ITS.....	53
Figura 22 Espectre freqüencial utilitzat per ITS-G5.....	54
Figura 23 Aplicació de Geonetworking.....	55
Figura 24 Evolució temporal ns-3.....	60
Figura 25 Esquema de l'escenari a simular.....	65
Figura 26 Representació gràfica mitjançant MATLAB del model RWM	66
Figura 27 Valors per defecte simulador VANET ns-3.....	70
Figura 28 Taxa entrega paquets respecte el temps a valors per defecte	70
Figura 29 Goodput respecte el temps a valors per defecte	70
Figura 30 Taxa entrega de paquets respecte el temps amb augment de potència de transmissió.....	71
Figura 31 Goodput respecte el temps amb augment de potència transmissió .	72

Figura 32 taxa d'entrega de paquets respecte el temps amb disminució del nombre de nodes	73
Figura 33 Goodput respecte el temps amb disminució del nombre de nodes ..	73
Figura 34 Taxa d'entrega de paquets respecte el temps amb model ITU R1411 LOS	74
Figura 35 Goodput respecte el temps amb model ITU R1411 LOS	75
Figura 36 Taxa d'entrega de paquets respecte el temps amb gestió de rutes OLSR.....	76
Figura 37 Goodput respecte el temps amb gestió de rutes OLSR	76
Figura 38 Taxa d'entrega de paquets respecte el temps amb gestió de rutes DSDV	76
Figura 39 Goodput promig respecte el temps amb gestió de rutes DSDV	77
Figura 40 Goodput respecte el nombre de nodes	78
Figura 41 Goodput respecte la velocitat dels nodes.....	78

1. Introducció

1.1. Context i justificació del Treball

El context en el qual s'emmarca el present TFM és el de la creixent aportació de solucions tecnològiques en els vehicles en matèria de sensors i comunicacions.

Aquest conjunt d'aportacions tecnològiques justifiquen l'aparició de nous estàndard de comunicació basats en xarxes vehiculars, les quals són objecte d'anàlisi teòric i simulació en el present TFM.

1.2. Objectius del Treball

En línies generals, un dels objectius consisteix en demostrar les habilitats i capacitats obtingudes en el Màster Universitari en Enginyeria de Telecomunicació.

Concretament es tracta de presentar un projecte d'aplicació de la tecnologia en els vehicles i infraestructura viària, amb l'objectiu de millorar la seguretat vial basant-se en les xarxes VANET. *Vehicular Ad hoc NETWORKS* de les quals se'n fa en primer terme la descripció teòrica de l'arquitectura del sistema, aplicacions, limitacions, estàndards, etc..

A la segona part del TFM té l'objectiu de presentar mitjançant l'ús del simulador de programari lliure ns-3 una aplicació concreta de comunicacions en xarxes VANET per les quals diferents vehicles s'intercanvien missatges relatius a l'entorn de circulació, on a partir de la simulació de la transmissió i recepció de fluxos de dades, velocitats dels vehicles, models de propagació, etc.. s'obtindran uns resultats que permetin obtenir unes conclusions.

1.3. Enfocament i mètode seguit

La primera part del TFM segueix una estratègia clarament basada en l'estudi teòric però a l'hora crític i comparatiu amb tecnologies similars.

Pel que fa a la segona part, la simulació que es porta a terme és de caire purament pràctic posant el focus en la simulació i descartant els aspectes relacionats amb la implementació física del hardware que quedarien fora de l'abast del present TFM.

2. Context tecnològic

L'entorn actual de circulació constant de milions de vehicles sota molt diverses condicions arreu del món, propicia l'existència d'un factor de risc d'accident basat en l'error humà.

Per tal de minimitzar aquest error humà, en la mida del possible, actualment ja hi ha solucions per millorar les seguretat vial basades en seguretat passiva, les quals a grans trets es basen en una xarxa de sensors i actuadors instal·lats individualment a cada vehicle.

Per exemple els sistemes d'airbag, ABS, ESP, càmeres de visió, acceleròmetres, etc.. Aquest conjunt d'informació generada s'utilitza per millorar la seguretat individual del passatge de cada vehicle.

El canvi de paradigma introduït per les xarxes VANET es fonamenta en que la informació generada pels sistemes de seguretat propis de cada vehicle passa a ser compartida amb la resta de vehicles que comparteixen el mateix tram de carretera.

L'aparició d'aquest nou model de gestió de la informació i les comunicacions entre vehicles directament, o indirectament a través de la infraestructura, convida a fer l'anàlisi de debilitats, forteses i relació amb els sistemes individuals actualment implantats, el qual es presenta a continuació:

Debilitats

Actualment VANET resulta ser encara un model més teòric que pràctic. Si bé és cert que s'han dut a terme diverses proves pilots en entorns de circulació reals, aquests han estat en àrees molt acotades, tal i com es descriu a la secció d'aplicacions.

En canvi els sistemes de seguretat individual passiva actuals presenten un major nivell de maduresa respecte VANET on la xarxa de sensors i actuadors

fan ús de sistemes de comunicació estandarditzats a nivell mundial com el bus CAN comptant amb gairebé tres dècades d'experiència d'implantació en vehicles comercialitzats al públic general. Per exemple els sistemes ABS i ESP.

Una altra debilitat de VANET és l'absència d'un estàndard únic, els principals són l'americà i l'uropeu.

Fortaleses

El fet de disposar d'informació del conjunt de vehicles que comparteixen un tram de carretera permet detectar amb major precocitat els events potencialment perillosos, per exemple, una esllavissada a la calçada pot ser detectada amb molts més metres i segons d'antelació que amb un sistema de seguretat individual passiva, de manera que les possibilitats d'evitar l'accident són molt majors que amb un sistema convencional de seguretat passiva individual.

Relació entre els actuals sistemes de seguretat individual passiva i VANET

VANET es nodreix de la informació proporcionada pel conjunt de sensors de cada vehicle que conformen els actuals sistemes de seguretat individual passiva.

Quan més es pugui compartir aquesta informació amb els vehicles adjacents, és a dir, com major sigui el nombre de vehicles que formin part de la xarxa VANET, major serà el valor obtingut, ja que aquesta serà més contrastada i podrà ser actualitzada amb major freqüència.

No obstant, cal tenir en compte que l'ample de banda disponible a la xarxa ha de ser suficient per a donar servei a tots els usuaris.

2.1. Aplicacions

Les possibles aplicacions de les xarxes VANET són múltiples. A continuació s'indica un conjunt de possibles aplicacions basades en avisos al conductor amb l'objectiu de millorar la seguretat vial:

- Violació d'intersecció.
- Frenada electrònica.
- Trànsit en sentit contrari.
- Estabilitat precària.
- Vianant a la carretera.
- Optimització dels fluxos de trànsit.

Un exemple d'aplicació implementat és el que es troba relatat a la següent web de ITS (Intelligent Transportation System) [1], l'agència de transports nord-americana, per la qual, entre els anys 2007 i 2008, va desenvolupar un pilot de proves amb la col·laboració de varis fabricants d'automòbils com Ford, General Motors, Honda, Toyota, etc..

Aquest pilot consistia en la circulació de 87 vehicles per una ruta prefixada en la qual hi havia 13 interseccions, les quals eren degudament monitorades amb sensors, càmeres, etc.. Ídem per als vehicles que duien GPS, sensors de velocitat, acceleració, etc. Els conductors rebrien un avís visual i/o acústic en cas de detectar una potencial violació de les normes de circulació en aproximar-se en alguna de les interseccions de test.

Tal i com s'indica la web del ITS [1] els resultats obtinguts, van ser altament satisfactoris.

Per una altra banda, mencionar que s'han dut a terme mesures en entorns reals de circulació per part de la Universitat Politècnica de València [2] i la Universitat Miguel Hernández a Elx [3] en els quals s'han obtingut resultats a nivell d'avaluació de l'enllaç RF en diferents entorns. Urbà, suburbà, rural, etc..

Destacar en el document de la Universitat Politècnica de València [2], el detall de la instal·lació física de l'antena tipus monopòl en el vehicle aprofitant l'estructura metàl·lica del sostre, així com la modelització del canal RF duta a terme mitjançant un generador de senyal i un analitzador de xarxa vectorial (Vector Network Analyzer – VNA).

3. Elements bàsics d'una xarxa VANET

Una xarxa VANET està formada per una sèrie d'elements que envien i reben paquets de dades, aquests elements s'anomenen nodes, i poden tenir una ubicació fixa o mòbil.

Els nodes mòbils s'anomenen OBU (On Board Unit) i estan instal·lats als vehicles. Mentre que els nodes fixes s'anomenen RSU (Road Side Unit) i solen estar ubicats en el mobiliari urbà com els semàfors, cartells de senyalització vial, etc..

A la següent figura extreta de [23] es mostra esquemàticament l'entorn típic d'operació d'una xarxa VANET, en la qual es poden observar els diferents OBUs en alguns vehicles, mentre que al marge de la carretera hi ha representat una RSU:

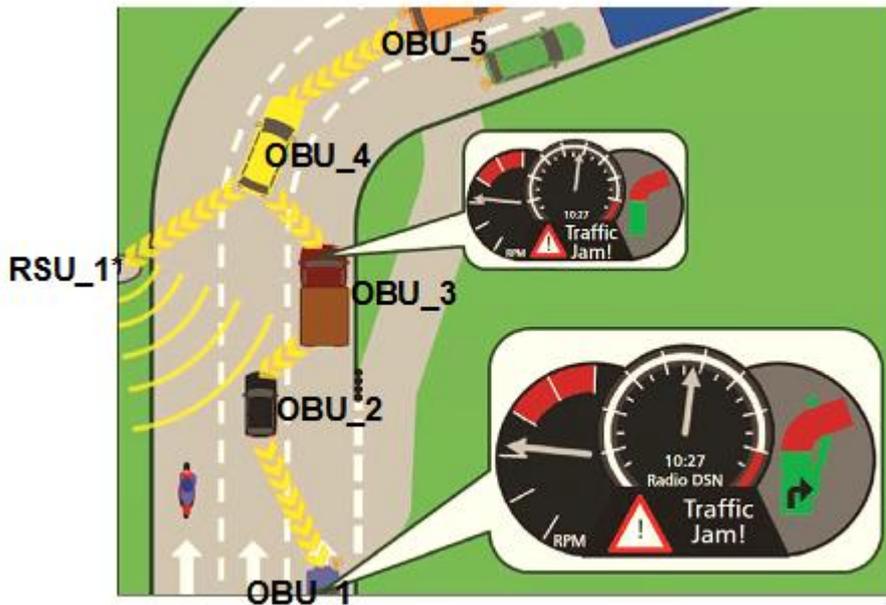


Figura 1 Entorn d'operació d'una xarxa VANET

Es pot observar en les fletxes i ones grogues simbolitzant de les comunicacions entre els OBU i/o RSU.

Quan la comunicació s'estableix entre dos OBU, aquesta s'anomena V2V (Vehicle To Vehicle), mentre que quan la comunicació es du a terme entre un

OBU i un RSU, llavors la comunicació es catalogada com a V2I (Vehicle to Infrastructure).

A la figura 1 s'observa que la xarxa VANET és mallada i descentralitzada en la qual es propaga el missatge d'embús de trànsit, en aquest cas "Traffic Jam", als nodes, per proximitat, susceptibles d'estar interessats en disposar d'aquesta informació.

En els següents dos apartats es descriurà amb major detall em funcionament del OBU i el RSU.

3.1. On Board Unit

El OBU o On Board Unit consisteix en l'equipament instal·lat al vehicle, encarregat d'emmagatzemar i processar la informació rebuda tant del propi vehicle com de l'exterior de forma sense fils de la resta de nodes de la xarxa VANET.

Aquest equipament està compost pels següents elements:

- Sensors.
- Bus de comunicacions.
- Transceptor inalàmbic i antena.
- CPU i memòria no volàtil.

Sensors

El vehicle incorpora una sèrie de sensors que s'encarreguen de recollir informació que sigui susceptible de ser d'interès tan per ell individualment com per al conjunt d'usuaris de la xarxa viària.

Una de les principals dades a obtenir és la posició, però ni ha d'altres com la temperatura, intensitat lluminosa i la velocitat que també són importats.

Bus de comunicacions

La informació recaptada pel conjunt de sensors ha de ser transportada d'una manera fiable, eficient i el més simple possible.

A la següent figura extreta de [5], es pot observar, a tall d'exemple, el conjunt de sensors que poden estar presents en un vehicle actual, els quals estan connectats majoritàriament per un bus de comunicacions estàndard del tipus CAN (Controller Area Network).

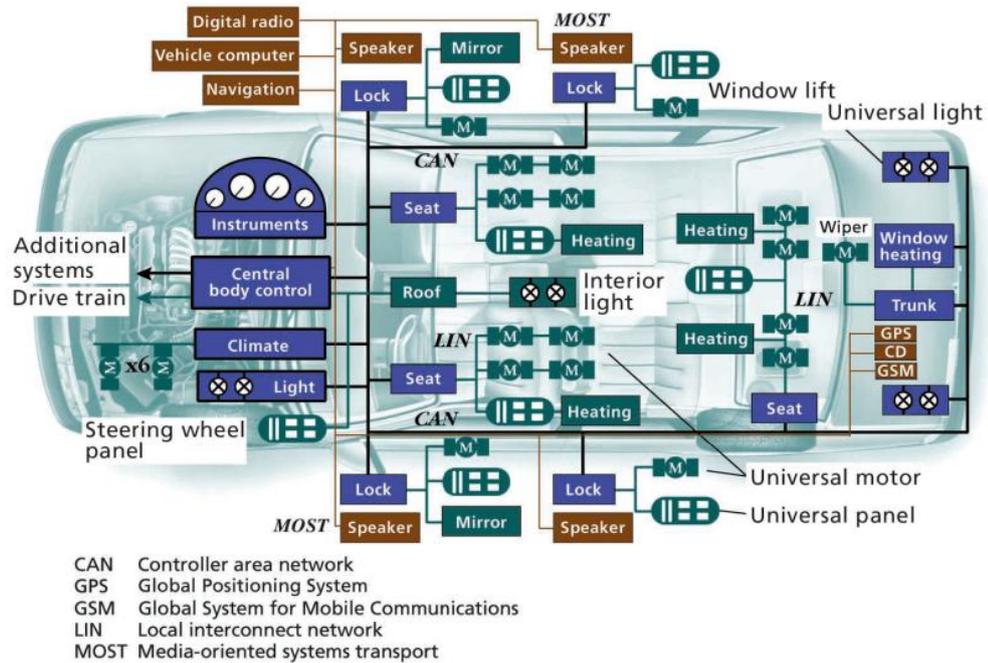


Figura 2 On board Unit

El bus CAN va ser desenvolupat per l'empresa Bosch a mitjans dels 1980s el qual ha sigut adoptat pels principals fabricants d'automòbils.

CAN concep dos modes de transmissió de dades en format sèrie, un a 1 Mbps i l'altre a 125 Kbps, en funció dels requisits de l'aplicació i de la criticitat de que la informació estigui disponible en temps real, com per exemple, les dades del sistema de frens ABS o control d'estabilitat ESP.

Transceptor inalàmbric i antena

Amb l'objectiu de compartir la informació generada pels sensors i els algoritmes de gestió de rutes amb la resta de nodes, és precís implementar el conjunt format per un transceptor i antena que siguin capaços d'establir un canal de comunicació sense fils el més fiable possible.

La ubicació de l'antena és determinant per a la qualitat i fiabilitat del enllaç sense fils, tal i com es descriu a [2]. Cal tenir en compte que donades les característiques morfològiques i estructurals d'un vehicle, el qual està fabricat majorment de metall que provoca reflexions dels senyals

electromagnètics, l'antena haurà d'estar degudament posicionada, tal i com es pot consultar a: [6].

A la següent figura extreta de la web de la Universitat de Chalmers a Suècia [7] es pot observar una proposta d'ubicació d'antena en el vehicle així com el seu patró de radiació i guany:

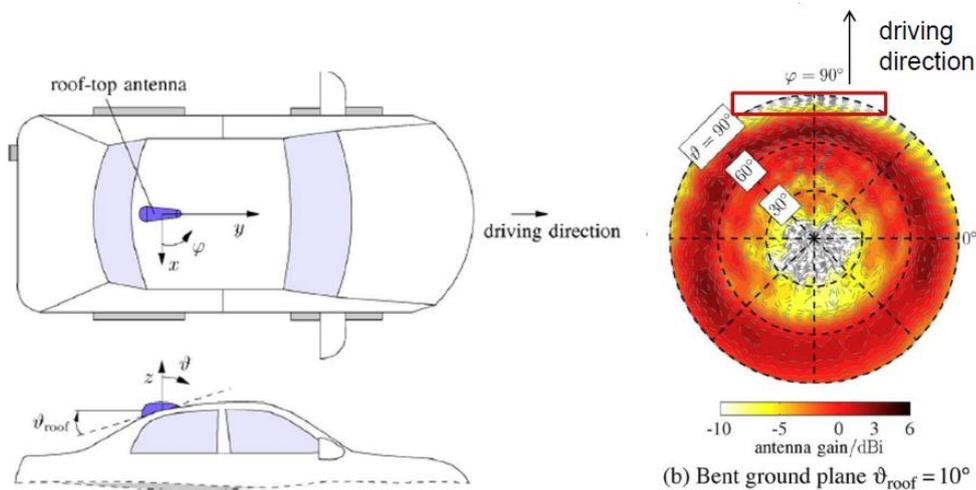


Figura 3 Ubicació i diagrama radiació d'antena a OBU

El diagrama de radiació de l'antena i la potencia d'emissió també són aspectes a tenir en compte.

CPU i memòria no volàtil

Aquests dos elements s'encarreguen d'executar els protocols VANET a tots els nivells: començant per la capa física, seguint per l'enllaç de dades, xarxa IP i aplicacions de gestió de rutes i missatges.

Pel que fa a la memòria no volàtil és molt recomanable que aquesta sigui d'estat sòlid, donades les vibracions a les qual pot estar sotmesa donada la natura de la operativa d'un vehicle.

3.2. Road Side Unit

Les RSU o Road Side Unit són els elements de les xarxes VANET que es caracteritzen pel fet d'estar instal·lades estàticament en punts estratègics de la xarxa viària i tenir connexió directa a una xarxa d'accés WAN a Internet del tipus ADSL, FTTH o GPRS/3G/LTE com a més habituals.

Els objectius de les RSU son bàsicament tres:

- Millora de la seguretat vial en les interseccions o trams crítics per a la seguretat vial.
- Dotar d'accés WAN a la xarxa VANET.
- Augment l'ample de banda disponible en les comunicacions V2I (Vehicle to Infrastructure).

Els sensors de les RSU poden estar, per exemple, al paviment per tal de realitzar la mesura del flux de trànsit, sensors de pàrquing per determinar si una plaça està lliure o no, la instal·lació de llaços inductius connectats als semàfors per tal de poder indicar si algun vehicle està traspasant el semàfor en vermell, etc, etc.

Millora de la seguretat vial en les interseccions

A tall d'exemple il·lustratiu de millora de la seguretat vial, una de les possibles aplicacions de les RSU és la que es mostra a la següent figura extreta de [8], en la qual s'observa com la RSU transmet en mode broadcast als vehicles que s'aproximen a la intersecció reben la informació de l'estat del semàfor. proporcionada en aquest cas pel TMC (Traffic Management Center).

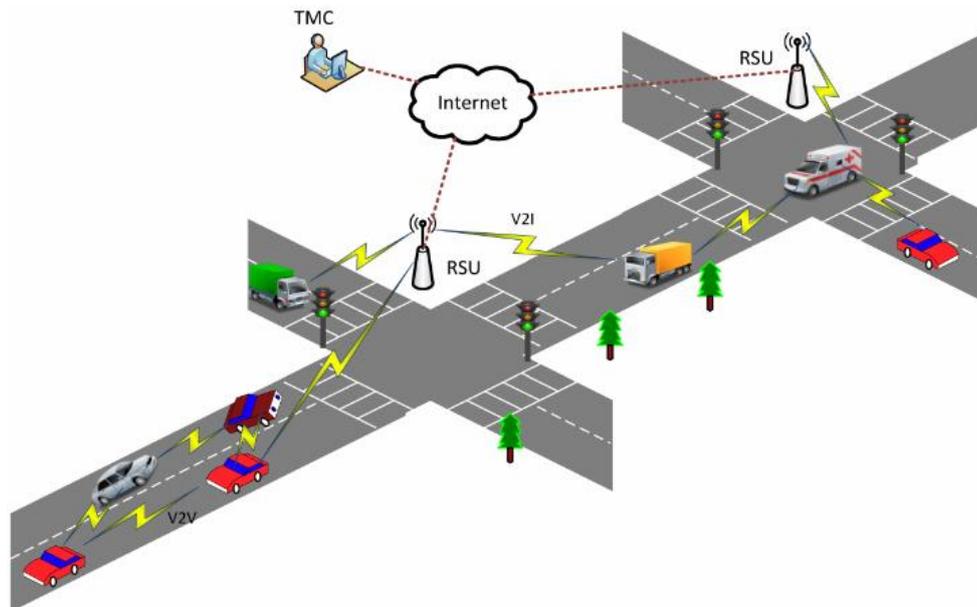


Figura 4 Comunicacions V2I i V2V

D'aquesta manera quan les OBU reben el missatge del estat del semàfor, el processen juntament amb la informació de posició i velocitat que els sensors del vehicle envien a través del bus CAN a la CPU, de manera que si es preveu una imminent situació de perill, s'envia un missatge d'alerta al panell del conductor o inclús s'actua sobre els frens per tal d'evitar la col·lisió amb algun vehicle al travessar la intersecció.

Accés a Internet

Apart de la participació en la millora de la seguretat vial, les RSU també poden assumir el rol de dur a terme funcions de info-entreteniment (infotainment) no només donant accés a Internet, sinó oferint informació contextualitzada amb la ubicació aplicant tècniques de màrqueting, com descomptes en benzineres properes, informació del temps, etc..

3.3. Xarxes d'accés alternatives

Reprement la descripció inicial de les xarxes VANET, en capítols anteriors, com una malla autoorganitzada de nodes de comunicacions ubicats en vehicles (OBU) i infraestructures viaries (RSU), per tal de confrontar aquesta tecnologia amb d'altres alternatives, es pot expressar de forma més estructurada de la següent manera:

Objectiu: Millorar la seguretat vial i donar de serveis de info-entreteniment als usuaris de la xarxa viaria.

Necessitat: Dotar als vehicles de la capacitat necessària per poder compartir paquets de dades que conformin missatges d'alerta pels conductors i info-entreteniment.

Limitacions: Condicions de comunicacions variables amb el temps que provoquen que l'ample de banda pugui ser escàs en la majoria de casos.

Tenint presents aquests tres aspectes, a continuació es realitza l'exercici crític de comparar VANET amb d'altres tecnologies amb diferents topologies que puguin complir els objectius i les necessitats indicades i tenint en compte també les limitacions.

3G/4G

En primera instància es podria considerar que les xarxes 3G aconsegueixen resoldre una de les majors limitacions de les xarxes VANET, que és un major nivell de cobertura global i ample de banda d'uns 50 Mbps per 3G, quan per una xarxa VANET el goodput obtingut en les simulacions pot ser de l'ordre d'uns 17 Kbps o menys.

No obstant, tenint en compte que l'aplicació es du a terme en la xarxa viaria, la presència de túnels no pot ser considerada com a excepcional, i en aquest entorn, les xarxes 3G i les subseqüents 4G, 5G, etc... presenten una clara mancança en l'aspecte de la cobertura.

En canvi les xarxes VANET, donada la seva natura de comunicacions en malla, conformen una xarxa autoorganitzada entre els vehicles de manera que hi ha més garanties de no patir talls de comunicació dins els túnels, ja que no depenen d'un element central que fora del túnel que gestioni les comunicacions.

Per una altra banda el procés de registre a la xarxa 3G també implica un cost econòmic en concepte contracte o prepagament per a la targeta SIM per a cada vehicle, aspecte no necessari amb VANET.

Si bé és cert que en les xarxes 4G i sobretot 5G la latència ha disminuït sensiblement, en les actual i molt més extenses xarxes 3G la latència continua essent superior en termes generals, uns 150ms de promig, mentre que en les xarxes VANET on les distàncies en les comunicacions són molt més curtes i les comunicacions punt a punt, el retard estimat es preveu sensiblement inferior.

L'ús de la xarxa 3G implicaria la dependència de centralitzar les múltiples peticions en un únic servidor, ja que per topologia la intel·ligència del sistema quedaria centralitzada en un sol element, si bé es cert que pot ser redundat, implica l'existència d'un punt de fallada únic i que la probabilitat de saturació en aquest aspecte augmenta respecte una xarxa VANET la qual presenta jerarquia basada en la cooperació entre nodes, de manera que a pesar de les evidents mancances de cobertura de les xarxes VANET donada que seva molt menor implantació que 3G, la caiguda total del sistema resulta ser pràcticament inexistent, es contempla el trencament d'enllaços en els quals els algorismes de gestió de rutes s'han d'encarregar de minimitzar-ne el impacte notificant als nodes adjacents les possibles rutes alternatives.

IEEE 802.11 a/n/ac

Per una altra banda, també es podria plantejar, almenys a priori, la conveniència l'aplicar protocols més coneguts com són IEEE 802.11a/n/ac amb amples de banda màxim teòric de 6.9 Gbps segons la última

especificació IEEE 802.11ac Wave 2 i operant a un rang de freqüències similar a VANET (5 GHz).

Es tracta d'un estàndard orientat principalment a operar en entorns de infraestructura, en el qual les estacions mòbils es connecten a un punt d'accés inalàmbic responsable de gestionar les peticions de connexió, basades en el protocol CSMA/CA, entre les estacions mòbils i la infraestructura.

Si bé és cert que l'estàndard també contempla l'intercanvi de paquets entre dues estacions mòbils amb el mode *ad-hoc*, aquest és d'un sol salt, i per tant la seva implementació en un entorn VANET no resulta factible al requerir múltiples salts.

En la línia d'implementar una xarxa sense fils que permeti múltiples salts existeix el estàndard IEEE 802.11s el qual esta orientat a les xarxes wi-fi mallades (mesh), no obstant, la realitat és que el principals fabricants d'equipament de xarxa han implementat solucions propietàries basades en aquest estàndard però que incompatibles entre ells, requerint inclús en alguns casos la necessitat d'afegir un element adicional anomenat controlador de xarxa (Wireless Lan Controller) que també obliga a que la xarxa deixi de treball en mode totalment cooperatiu, ja que el controlador de xarxa passa a assumir el rol de gestor/concentrador del trànsit essent un punt de fallada única com les xarxes 3G anteriorment descrites.

A tall d'exemple es mostra a la següent figura extreta de la web de Cisco, un dels principals fabricants d'equipament de xarxa, un exemple d'arquitectura de xarxa mesh:

http://www.cisco.com/c/en/us/td/docs/wireless/technology/mesh/7-0/design/guide/MeshAP_70.html

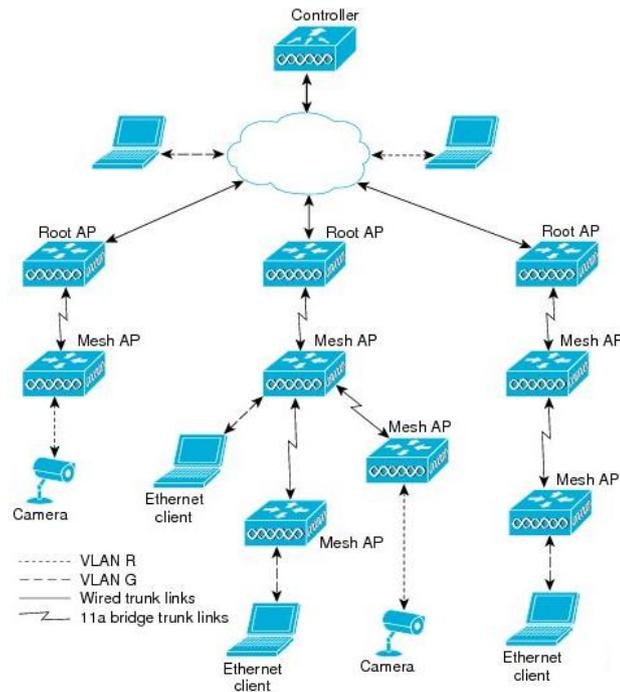


Figura 5 Xarxa mallada basada en wi-fi

Es pot observar a la figura la presència a dalt de tot del 'Controller' el qual gestiona el trànsit de tota la xarxa amb l'inconvenient de ser un punt de fallada única, és a dir, si deixa d'estar en servei, tota la xarxa deixa d'estar en servei.

Un inconvenient addicional de les xarxes mallades basades en IEEE 802.11s i IEEE 802.11a/n/ac és la gestió del transit en mode broadcast, la qual és molt menys eficient, encara que es podria millorar implementant polítiques de VLANs per segmentar el trànsit a nivell lògic, tal i com es mostra a la figura 5, però implicaria la configuració manual del nodes de xarxa, fet que entraria en contradicció amb la filosofia de xarxa cooperativa i autoorganitzada de les xarxes VANET, apart que incrementaria sensiblement els costos de manteniment i gestió de la xarxa.

3.4. Models de mobilitat

Amb l'objectiu de plasmar i categoritzar en forma de simulacions, situacions reals de mobilitat, com a primer cas es plantegen definir models cadascun d'ells ubicats en un nivell determinat, el qual ens dóna una idea del nivell de detall que pretenen descriure. Els tres models plantejats són els següents:

Model de viatge: Basat en la definició de moviments entre anomenats Punts d'Interès, conforme una matriu d'Origen-Destí. Per exemple :

Origen	Plaça Catalunya
Destí	Tibidabo

Model del camí: S'augmenta el nivell de detall respecte el model de viatge. Aquí es defineix cadascun dels trams que conformen un viatge. Seguint l'exemple anterior:

Camí 1	Passeig de Gràcia
Camí 2	Carrer Gran de Gràcia
Camí 3	Avinguda Vallcarca
...	...
Camí N-1	Carretera de Vallvidrera

Model del flux: Augmentem el nivell de granularitat en la definició descrivint la interacció dels vehicles en forma de fluxos.

Si analitzem la mobilitat des del punt de vista de la interacció entre el trànsit i els simuladors de xarxa, podem establir varies analogies que queden plasmades en els següents cinc models identificats a continuació:

Models aleatoris: Es considera la mobilitat vehicular aleatòria en els paràmetres de velocitat, rumb i destí.

Models de flux: Aquest model contempla tres nivells de granularitat:

Microscòpica: on es té en compte l'acceleració i desacceleració per a cada vehicle per tal de mantenir la distància de seguretat.

Macroscòpica: A diferència del model microscòpic, aquí no es consideren els paràmetres d'un vehicle concret, sinó que s'avalua el conjunt des de les vessants del flux, velocitat i densitat on s'hi aplica la teoria de fluids de la física.

Mesoscòpica: Nivell entremig de detall entre els dos anteriors, a grans trets podem definir aquest model com un anàlisi en un període concret d'espai i temps en el qual s'avaluen els comportaments individual i comunament d'un conjunt específic de vehicles.

Models de trànsit: A grans trets, podem dir que aquest model pretén plantejar una equació de tres incògnites: el model de viatge, el model de camí i el temps. Els dos primers models són els ja han estat descrits anteriorment. L'objectiu d'aquest model consisteix en establir correlacions entre aquestes tres variables.

Models de comportament: Aquest model pretén quantificar i transformar en dades pel simulador, el comportament humà. Com és previsible es tracta d'una tasca enormement complexa de preveure. Es proposen varies tècniques, de les quals se'n pot destacar l'aplicació d'intel·ligència artificial, creació de bases de dades de comportaments, etc..

Models basats en traces: Finalment, aquest model té com a objectiu complementar els models anteriors, prenent dotar-los de major precisió aportant dades addicionals basades en la observació de la mobilitat en trams concrets, per tal de poder extrapolar patrons.

El tercer punt de vista aportat per modelitzar la mobilitat i la seva representació en un entorn de simulació, es focalitza precisament en la relació entre aquests dos elements, és a dir, de quina manera es comparteix la informació entre el simulador de trànsit i el simulador de xarxa:

Aïllat: Aquesta és la configuració més simple i amb menys prestacions. La comunicació entre el simulador de trànsit i el simulador és unidireccional:

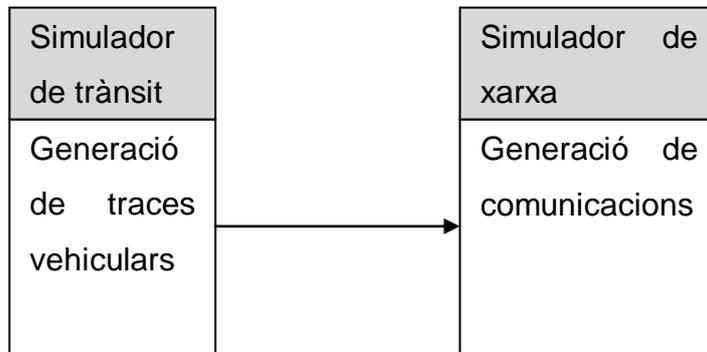


Figura 6 Simulador aïllat

Embegut: Amb l'objectiu de dotar de bidireccionalitat a la comunicació entre ambdós simuladors, aquests s'integren en un únic sistema:

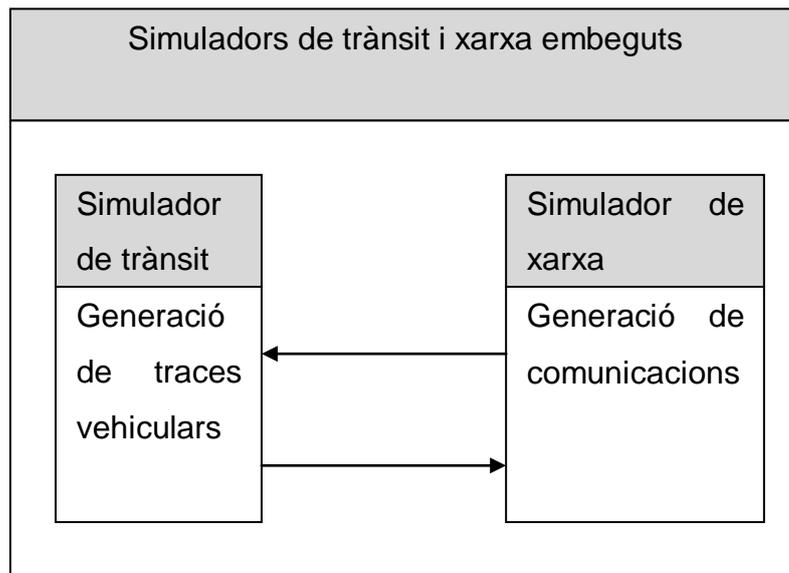


Figura 7 Simulador de trànsit i xarxa embeguts

Federat: Aquest és el model més elaborat dels presentats fins ara. En aquest cas la comunicació entre el simulador de trànsit i el simulador de xarxa és bidireccional com en el cas embegut, però ara entremig d'ambdós simuladors hi ha una interfície de comunicacions que possibilita que ambdós simuladors puguin treballar en paral·lel i obtenir un resultat coherent i amb majors prestacions, ja que per exemple es poden modificar en temps real els

patrons de mobilitat en funció dels fluxos de xarxa. És a dir, s'obté un major nivell de dinamisme en la interactivitat entre ambdós simuladors.

No obstant, un dels possibles inconvenients d'aquest sistema és la introducció d'una latència addicional que pot ser crítica per a càlculs que requereixin un molt baix temps de resposta, per exemple, la gestió d'un avançament de vehicle amb invasió del carril contrari.

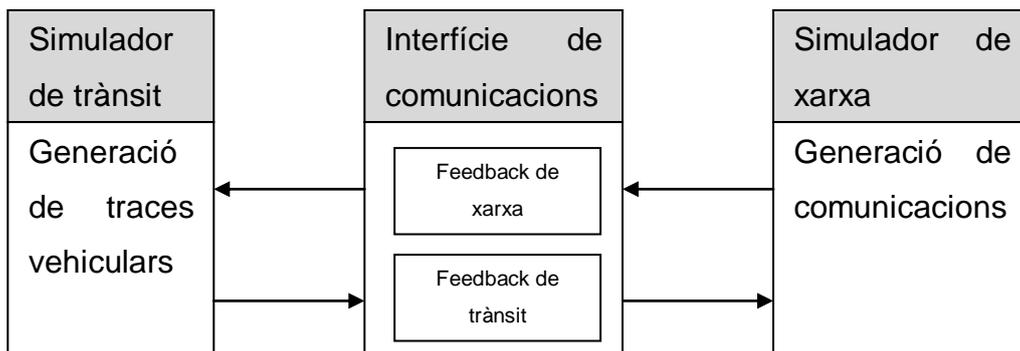


Figura 8 Simulador federat

3.5. Anàlisi de la capa física

L'objectiu d'aquest capítol consisteix un augmentar el nivell de detall en la descripció dels elements que componen una xarxa VANET, concretament es posa el focus en l'entorn en el qual s'ha de propagar els senyals RF i les seves possibles opcions de modelització de canal.

A partir d'aquí indicar que les característiques bàsiques d'un entorn V2V són les següents:

- Transmissor i receptors mòbils.
- Antenes ubicades a una alçada relativament baixa respecte del terra.
- Freqüència de Doppler habitualment elevada.
- Canal RF estadísticament no estacionari.

Les dues primeres característiques són bastant evidents de percebre, no obstant les dues següents mereixen una explicació addicional que les justifiqui:

Es diu que en un entorn V2V la freqüència Doppler és habitualment elevada perquè al ser mòbils l'emissor i receptor i tenir una velocitat relativa variable amb el temps, la longitud d'ona del senyal emès s'escurça o s'allarga en funció de si els vehicles s'apropen o s'allunyen, i en conseqüència la freqüència de Doppler es veu modificada, tal i com es pot deduir en les següents expressions:

$$f_m = \frac{v}{c} \cdot f_c$$

On f_m correspon al màxim desplaçament que pot patir la freqüència original f_c en que es transmet el senyal que és de l'ordre de 5 GHz.

c és la velocitat de la llum : $3 \cdot 10^8$ m/s.

v correspon a la velocitat en que es desplaçar el transmissor respecte el receptor.

A partir d'aquí podem definir la freqüència de Doppler f_d com:

$$f_d = \frac{v}{\lambda} \cdot \cos\theta$$

On v és la velocitat de receptor respecte la velocitat del transmissor.

Un valor positiu de $\cos\theta$ implica que el transmissor i el receptor s'estan allunyant. En canvi, valors negatius de $\cos\theta$ expressen que el transmissor i el receptor s'estan apropant.

Per tant, la freqüència del senyal rebut f_r correspon a la diferència entre la freqüència original f_c i la freqüència de Doppler f_d :

$$f_r = f_c - f_d$$

Aquesta variació en la freqüència del senyal rebut genera l'anomenat *fading* temporal, pel qual la resposta impulsional del canal és variant amb el temps (*fast fading*) o quan la resposta impulsional del canal varia amb una cadència inferior al temps de transmissió del símbol llavors s'anomena *slow fading*. La conseqüència d'aquest efecte és una davallada en l'eficiència de l'enllaç.

Per una altra banda, es diu que el canal RF és estadísticament no estacionari precisament com a conseqüència, entre d'altres factors que s'indicaran a continuació, de la variabilitat de la freqüència de Doppler, és a dir, que les característiques que afecten a la propagació de les ones, són variants amb el temps.

Aquestes característiques, apart de la freqüència de Doppler també són el *path loss*, concepte que engloba els fenòmens de la pèrdua en espai lliure,

refraccions, difraccions, reflexions, pèrdues per acoblament i absorcions, etc... Aquests paràmetres varien en funció de la orografia del terreny, de la matèria i geometria dels objectes de l'entorn, etc.. El conjunt d'aquest efectes és modelitzat mitjançant l'expressió d^n , on d correspon a la distància i n al *path loss exponent* el qual sol prendre un valor de 2 en entorns d'espai lliure, elevant-se a valor superiors conforme augmenten els elements físics susceptibles d'afectar negativament a la propagació del senyal electromagnètic.

L'efecte multi camí també serà present, donades les reflexions del senyal RF transmès amb la resta de vehicles i altres element de l'entorn. Aquestes reflexions provocaran que el receptor rebi més d'una copia del senyal transmès però amb diferents retards, fet que provoca l'aparició de ISI (Interferència Inter Simbòlica), la qual determina el nivell de selectivitat del canal RF, aspecte a tenir en compte de cara a determinar quina ha de ser la longitud del prefix cíclic de la modulació OFDM emprada en VANET per tal de mitigar-lo en la mida del possible.

3.5.1. Classificació teòrica del canal

Un cop conegudes les característiques i limitacions del canal RF en el qual opera una xarxa VANET, ja resulta possible començar a establir els criteris més adequats per identificar el diferents models de canal RF aplicables.

El model de canal RF es defineix generalment com una representació, amb un determinat grau de precisió, de l'evolució de la propagació de les ones electromagnètiques en un entorn determinat.

En base a aquesta definició, en funció del punt de vista que s'apliqui es podran identificar les següents categories de models:

Models deterministes: Els models deterministes pretenen establir un sistema pel qual les mateixes entrades produiran sempre les mateixes

sortides. L'avantatge d'aquest model és que pot arribar a obtenir resultats molt precisos, però per tal d'assolir aquest objectiu és necessari poder monitorar amb gran fidelitat totes les entrades del sistema, fet que en el cas d'una xarxa VANET que opera en entorns d'exterior on hi intervien múltiples elements amb comportament variant amb el temps, apart d'un elevat cost computacional, el resultat obtingut podria no ser tot lo precís que es desitjaria a no ser que la xarxa VANET operi en un entorn de laboratori amb les variables d'entrada almenys amb un control acotat.

Models empírics: La definició formal de model empíric indica que aquest es basa en la observació del funcionament d'un sistema i realitzar-ne experiments pràctics que permetin la validació d'hipòtesis plantejades. Aquest model es pot considerar d'aplicació factible, tal i com es relata a [4], tenint en compte la necessitat de poblar constantment les bases de dades amb informació resultant dels experiments per tal de d'assolir un mínim de fiabilitat en els resultats obtinguts. Un altre inconvenient és la necessitat d'implementar la infraestructura necessària per dur a terme la simulació pràctica. Fet que en tractar-se d'una xarxa VANET a poc que es pretengui emular un sistema real la complexitat de dur a terme la simulació pràctica no serà despreciable.

Models estocàstics o probabilístics: Aquí el concepte aplicat és antagònic al determinista, és a dir, basa els resultats obtinguts en base al càlculs de probabilitat i estadística, de manera que s'admet que encara que les condicions d'entrada al sistema aparentment siguin iguals, el resultat obtingut no té perquè ser sempre el mateix. Es dedueix que el cost computacional seria inferior al emprat en els models deterministes, però el resultat final teòricament és menys precís. L'avantatge és la no necessitat d'haver d'implementar l'entorn pràctic de simulació VANET amb la seva complexitat inherent.

3.5.2. Models de propagació

En el capítol anterior s'ha fet una classificació teòrica del canal en funció del comportament esperat del sistema, però des d'un vista purament teòric sense entrar en el punt de vista tècnic de propagació dels camps electromagnètics en un entorn concret.

És en el present apartat on es pretenen descriure els diferents models de propagació de camps que posteriorment s'aplicaran a la simulació.

El coneixement d'aquests models permetrà interpretar millor els resultats de les simulació, comparar-los entre ells i extreure'n les pertinents conclusions.

Els models que es descriuran a continuació són el model de Friis, dos rajos i ITU-R-1411 LOS (Line of Sight), d'aquest últim es poden consultar les especificacions completes a [9].

Model de Friis

El model de Friis és un model considerat determinista. Es caracteritza per considerar condicions pràcticament ideals de propagació.

És a dir, només depèn dels paràmetres d'antena com la potència de transmissió (P_t), guanys de transmissió (G_t) i recepció (G_r), longitud d'ona (λ) i distància entre emissor i receptor (d).

Es considera també un entorn sense obstacles, amb visió directa entre transmissor i receptor.

La fórmula de càlcul de la potència rebuda (P_r) conforme el model de Friis és la següent:

$$P_r = P_t \cdot G_t \cdot G_r \cdot \left(\frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2$$

Model de dos rajos

El model de dos rajos, també anomenat model de propagació sobre terra plana, es pot considerar una evolució del model de Friis en el qual es té en compte l'altura de les antenes transmissora i receptora respecte el terra.

Es pot calcular la potència rebuda (P_r) a partir de la següent expressió:

$$P_r = P_t \cdot G_t \cdot G_r \cdot \left(\frac{h_1 \cdot h_2}{d^2} \right)^2$$

On h_1 i h_2 són les altures de les antenes transmissora i receptora respecte el terra.

Model ITU R1411

El model ITU R1411 contempla varis escenaris de propagació del tipus urbà, semi-urbà, residencial, rural, etc... Dins de cadascun d'aquests models hi ha definits diferents models de propagació i coeficients, en funció de si en alguna area concreta hi ha o no visió directa, carrers, terrats, vianants, etc..

A la següent figura extreta de [9] es mostra a tall purament il·lustratiu sobre les capacitats de modelar els detalls de cada entorn particular d'aquest model:

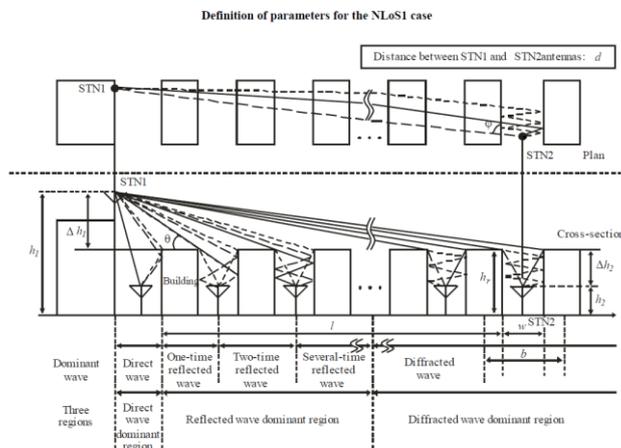


Figura 9 Modelació canal RF ITU R1411

3.6. Protocols de gestió de rutes

L'arquitectura descentralitzada i autoorganitzada de les xarxes VANET motiva l'aplicació de protocols, que permetin gestionar l'enviament dels paquets de dades d'origen a destí, de la manera més eficient possible, tenint en compte l'entorn descrit en capítols anteriors.

Exemples de protocols de gestió de rutes considerats a les xarxes VANET són DSDV, OLSR i AODV. Els quals seran categoritzats, analitzats i comparats a continuació.

Existeixen múltiples estratègies per gestionar el trànsit de paquets, no obstant, a grans trets, els protocols d'enrutat poden se categoritzats en dos grans grups: els proactius i els reactius.

3.6.1. Protocols proactius

Els protocols proactius es caracteritzen pel l'intercanvi constant d'informació de rutes entre els nodes. Aquesta informació s'emmagatzema en taules.

Exemples de protocols proactius són els DSDV (Destination-Sequenced Distance Vector) i el OLSR (Optimized Link state Routing). Els quals es descriuran a continuació:

DSDV

El funcionament del protocols DSDV es basa en el principi del vector-distància, pel qual cada node emmagatzema la següent informació:

- La ruta cap a totes les destinacions conegudes.
- El següent node per arribar el destí.
- El nombre de salts (mètrica) necessaris per arribar al destí.
- Nombre de seqüència: necessari per evitar bucles infinits.

- Temps d'instal·lació: necessari per purgar la taula d'entrades molt antigues.

Quan es trenca un enllaç en el node N, el valor assignat a la mètrica pren el valor d'infinít, i es propaga aquesta informació als nodes adjacents.

Els avantatges d'aquest protocol són la simplicitat i l'absència de latència degut al descobriment de rutes, ja que aquestes s'actualitzen periòdicament.

En canvi el major inconvenient radica en el gran consum d'ample de banda, degut a la actualització constant de les taules. Fet que s'agreuja conforme el nombre de nodes augmenta.

OLSR

Protocol descrit en detall al RFC 3626 [10]. El qual, tal i com apunta el seu nom Optimized Link State Routing, està orientat a millorar l'eficiència dels clàssics protocols basats en la inundació (flooding).

La optimització del flooding es porta a terme limitant l'enviament de missatges de broadcast únicament a alguns nodes de la xarxa identificats com a MPR (Multi Point Relays).

Tal i com podem observar a la següent figura extreta de [11]:

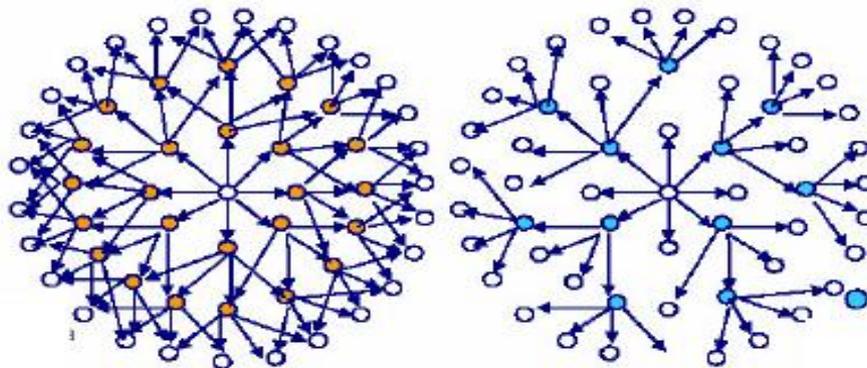


Figura 10 Comparativa flooding tradicional vs OLSR

On el graf de l'esquerra representa una estructura de flooding tradicional on cada cercle taronja representa un retransmissor i el graf de la dreta una estructura on els nodes de color blau representen els MPR.

Es pot observar com el nombre de nodes retransmissors es redueix a més de la meitat, ja que es passa dels 25 nodes originàriament usant protocols de flooding tradicionals a només 11 aplicant-ne OLSR com a versió optimitzada. D'aquesta manera el tamany de les taules de rutes també es veuen sensiblement disminuïdes, tal i com es pot consultar a [11].

Un dels missatges més usat en OLSR és l'anomenat HELLO, el qual és intercanviat freqüentment entre els nodes per tal d'advertir la incorporació d'un nou node a la xarxa, la qualitat del enllaç amb els seus adjacents i si és o no, un node del tipus MPR.

També hi ha el missatge anomenat TC (Topology Control) del qual es dedueix que participa en el procés de descobriment de la topologia de la xarxa, informant sobre l'estat dels enllaços amb els MPR i advertint quant es produeix una ruptura d'enllaç amb algun node.

Finalment destacar els missatges MID (Multiple Interface Declaration) els quals contenen la llista d'adreces IP utilitzades per un node. Aquesta és una característica precisament de les xarxes VANET, ja que en funció de les aplicacions que s'hi executin és possible que un node hagi de gestionar simultàniament amb més d'una xarxa tal i com es descriu a [12].

3.6.2. Protocols reactius

El protocols reactius es caracteritzen per actuar sota demanda, és a dir, quan existeix la necessitat per part d'un node anomenat origen, de comunicar-se amb un altre node anomenat destí.

Un dels grans avantatges respecte els protocols proactius, és el menor consum d'ample de banda, donada la seva filosofia d'enviar paquets de dades pràcticament només en cas de necessitat i no periòdicament com fan els protocols proactius.

No obstant, el major inconvenient dels protocols reactius és el major temps necessari per detectar canvis en la topologia de la xarxa, i el fet de disposar d'informació de rutes menys actualitzades fa que aquestes puguin ser menys òptimes, o que directament ja no siguin vàlides, i en conseqüència l'enviament del paquet d'un node origen a un node destí sigui menys eficient o que calgui retransmetre'l.

El principal protocol reactiu emprat és el AODV (Ad-hoc On demand Distance-Vector routing), el qual es descriu a continuació.

AODV

El protocol AODV pot considerar-se com una optimització del protocol proactiu DSDV recentment descrit.

El procés inicial de descobriment de ruta és el mateix que en DSDV, la diferència rau en el fet de que en aquest cas es requereix d'enllaços bidireccionals per tal de un cop obtinguda la ruta fins al node destí, aquest envia un paquet de resposta (RREP – Route REPLY Message) al node origen per la ruta creada en el procés de descobriment, de manera que els nodes intermitjos reben aquest paquet només han d'emmagatzemar la informació relativa al següent salt i no tota la ruta com calia fer amb DSDV, tal i com es detalla a [14].

Un altre aspecte que contribueix a la optimització de AODV respecte DSDV és la pròpia natura de protocol reactiu, de manera que només actua quan hi ha necessitat d'establir comunicació entre un node origen i un node destí. Per tant, el consum d'ample de banda és molt inferior.

No obstant, AODV conté un aspecte amb un comportament que pot se considerat com a proactiu, aquest és el que afecta al procés de manteniment de les rutes, pel qual els nodes emeten periòdicament i sense petició prèvia missatges del tipus HELLO per tal d'advertir als nodes adjacents que el node emissor segueix en disposició de donar i rebre paquets a la xarxa. En el cas que un node no enviï cap missatge HELLO en un període prefixat es considera que l'enllaç està trencat i per tant s'actualitza la taula d'encaminament amb aquesta nova informació.

3.6.3. Valoració teòrica del protocols d'enrutat

Un cop feta la descripció dels principals protocols d'enrutat emprats en les xarxes VANET, es poden sintetitzar en les següents valoracions:

Els protocols proactius presenten unes millors prestacions en termes d'obtenció de rutes òptimes, no obstant el consum d'ample de banda pot ser excessiu si la qualitat dels enllaços RF entre nodes no és suficient.

En protocols reactius presenten un major consum d'ample de banda però la obtenció de rutes òptimes és menys probable.

Un dels factors que pot permetre escollir el protocol més adient és l'ample de banda disponible. Aquest pot ser estimat en base a la densitat de vehicles amb OBU, com major sigui aquesta, es pot preveure una menor distància entre vehicles, i en teoria, una major capacitat en els enllaços RF, fet que pot aconsellar l'aplicació de protocols reactius. Sobretot DSDV si hi ha una presència constant de RSU que contribueixin a donar encara més ample de banda a la xarxa VANET.

Si la presència de RSU no és excessiva la recomanació teòrica passa per l'aplicació del OLSR que segueix essent proactiu con DSDV però amb un menor consum d'ample de banda.

En canvi, si la densitat de vehicles amb OBU és baixa el més recomanable és implementar protocols d'enrutat reactiu com AODV per tal de no consumir en excés l'escàs ample de banda disponible.

No obstant, cal tenir en compte que aquestes són valoracions teòriques, de manera que resulta complex establir a partir de quins valors d'ample de banda disponible és més convenient implementar un protocol o un altre. Per tant, és recomanable dur a terme simulacions com les que es descriuen en el capítol número 4 del present TFM i idealment corroborar-les amb proves pilot com les descrites en el capítol 2.1.

3.7. Anàlisi d'estàndards i protocols alternatius

Pel que fa a possibles alternatives al protocols de gestió de rutes, proactius i reactius, ja descrits, es podria plantejar en l'aplicació dels protocols de gestió de rutes ja existents i àmpliament provats com els de les xarxes P2P.

En una xarxa P2P les rutes es gestionen les de forma descentralitzada on les taules DHT (Distributed Hash Table) amb topologia d'anell, l'accés a les quals es pot dur a terme mitjançant diferents protocols com Chord.

No obstant, donat que la creació d'aquests protocols es va basar en la implementació en xarxes cablades d'alta capacitat del tipus xDSL o FTTH amb una implantació massiva d'enviaments broadcast, el consum d'ample de banda és massa elevat per ser suportat per una xarxa de nodes mòbils.

Per l'altra banda, també es poden classificar les xarxes VANET en funció de l'origen de l'estàndard que s'hi aplica, tal i com s'explica a continuació:

3.8. Estàndard americà

3.8.1. Descripció general

L'estàndard americà, també anomenat WAVE (Wireless Access in Vehicular Environments) o DSRC (Direct Short Range Communications) , presenta una estructura anàloga a la clàssica torre OSI, tal i com es mostra a la següent figura extreta de [18]:

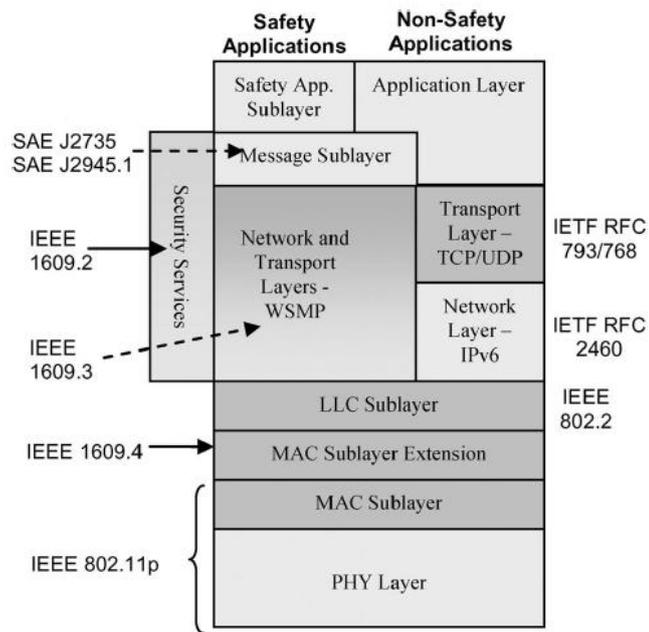


Figura 11 Torre protocols estàndard VANET americana (DSRC)

OSI	DSRC	Protocols DSCR
Aplicació	Missatges V2X i altres	SAE J2735
Transport	TCP/UDP	IEEE 1609.3
Xarxa	IPv6 / WSMP	IEEE 1609.2
Enllaç	Extensions MAC MAC	IEEE 802.11p IEEE 1609.4
Física	PHY	IEEE 802.11p

Figura 12 Comparativa OSI vs DSRC

El protocol IEEE 802.11p, està fortament basat en el IEEE 802.11a de les xarxes wifi actuals, el qual es diferencia a grans trets en un

mecanisme d'autenticació més àgil. Qualitat de servei basada en cues, en funció de la criticitat de l'aplicació, mentre que wi-fi es basa en CSMA/CA, és a dir, un protocol molt susceptible a les col·lisions.

Donat que l'entorn d'operació d'una xarxa VANET, donat l'entorn d'intempèrie i mobilitat dels nodes, és més agressiu per a les comunicacions el interval de guarda fixat originalment en $0,8 \mu s$ en IEEE 802.11a passar a ser de $1,6 \mu s$, al igual que la durada del símbol passa de $3,2 \mu s$ a $6,4 \mu s$ amb l'objectiu de minimitzar la interferència intersimbòlica (ISI) provocada per l'efecte multicamí.

A les capes d'enllaç de dades, xarxa i transport hi ha la família de protocols IEEE 1609, concretament 1609.4 per a la commutació de canals. 1609.3 per a serveis de xarxa i 1609.2 per a serveis de seguretat.

La FCC (Federal Communication Commission) ha assignat el rang de freqüències de 5850 a 5925 MHz. En el qual hi ha la distribució de canals mostrada a la següent figura extreta de [2].

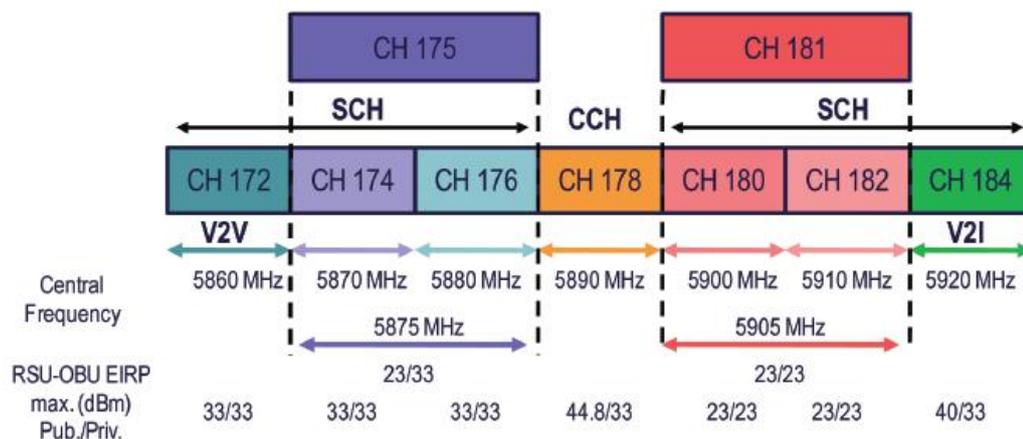


Figura 13 Assignació espectre radioelèctric DSRC

On d'entrada es poden observar dos tipus de canals: Els SCH (Service Channel) i els CCH (Control Channel).

El únic CCH és el nº 178 i s'utilitza per dur a terme les comunicacions en mode broadcast per a les aplicacions de seguretat.

La gestió dels SCH i CCH és responsabilitat de les extensions de la subcapa MAC (IEEE 1609.4) les quals seran descrites més endavant.

3.8.2. Capa física

La capa física està formada per les següents subcapes:

La PMD (Physical Medium Dependent) i la PLCP (Physical Layer Convergence Procedure) d'on es pot deduir pel nom que la PMD és la subcapa que interacciona directament amb el medi RF en el qual es fa ús majorment de la tècnica OFDM.

L'ample de canal definit per a la implementació d'OFDM en IEEE 802.11p és de 10 MHz amb 52 subportadores en les quals s'hi poden aplicar quatre tipus de modulacions en funció de la relació senyal a soroll del enllaç RF: BPSK, QPSK, 16-QAM i 64-QAM amb la corresponent aplicació de correcció d'errors FEC.

A la següent taula es mostra el detall de les modulacions indicades amb les seves respectives taxes de bit, codificacions, data rates i taxa de bit per símbol OFDM:

Tècnica de modulació	Taxa de bit codificat (Mbps)	Taxa de codificació	Taxa de dades (Mbps)	Bits de dades per símbol OFDM
BPSK	6	$1/2$	3	24
BPSK	6	$3/4$	4,5	36
QPSK	12	$1/2$	6	48
QPSK	12	$3/4$	9	72
16-QAM	24	$1/2$	12	96
16-QAM	24	$3/4$	18	144
64-QAM	36	$2/3$	24	192
64-QAM	36	$3/4$	27	216

La subcapa PLCP estableix es mapatge entre les trames MAC i les PDU (Physical Data Units) corresponents a cada símbol OFDM.

La FCC classifica els dispositius, o també anomenats nodes, de les xarxes VANET, en quatre classes (A, B, C o D) en funció de la potència màxima de sortida, i en conseqüència l'abast de l'enllaç RF entre dos nodes, tal i com es mostra a la següent figura:

Tipus de dispositiu	Potència màxima de sortida (dBm)	Abast enllaç RF (metres)
A	0	15
B	10	100
C	20	400
D	28,8	1000

Amb l'objectiu de minimitzar la interferència co-canal, cada tipus de dispositiu ha de transmetre conforme una màscara espectral prefixada, conforme la següent taula:

Freqüència d'offset	±4,5 MHz	±5,0 MHz	±5,5 MHz	±10 MHz	±15 MHz
Classe A	0 dBr	-10 dBr	-20dBr	-28 dBr	-40 dBr
Classe B	0 dBr	-16 dBr	-20 dBr	-28 dBr	-40 dBr
Classe C	0 dBr	-26 dBr	-32 dBr	-40 dBr	-50 dBr
Classe D	0 dBr	-35 dBr	-45 dBr	-55 dBr	-65 dBr

On les magnituds expressades en dBr corresponen a la PSD (Power Spectrum Density).

Tal i com s'ha indicat en el capítol introductor anterior, l'espectre radioelèctric assignat a DSRC va dels 5850 MHz als 5925 MHz, de manera que col·loquialment s'anomena la banda de 5,9 GHz.

Aquest espectre està ocupat per 7 canals de 10 MHz cadascun amb un interval de guarda al principi de l'espectre. Existeix la possibilitat de concatenar dos canals adjacents, doblant-ne la taxa teòrica de bit, no obstant, l'aplicació d'aquesta tècnica implica una major sensibilitat al soroll i a la interferència intersimbòlica.

A la següent taula, extreta de [15] es pot observar esquemàticament les prestacions del sistema en funció de l'ample de canal emprat:

Parameters	20 MHz Bandwidth	10 MHz Bandwidth	5 MHz Bandwidth
Bit rate (Mbit/s)	6, 9, 12, 18, 24, 36, 48, 54	3, 4.5, 6, 9, 12, 18, 24, 27	1.5, 2.25, 3, 4.5, 6, 9, 12, 13.5
Modulation mode	BPSK, QPSK, 16QAM, 64QAM	BPSK, QPSK, 16QAM, 64QAM	BPSK, QPSK, 16QAM, 64QAM
Code rate	1/2, 2/3, 3/4	1/2, 2/3, 3/4	1/2, 2/3, 3/4
Number of subcarriers	52	52	52
Symbol duration	4 μ s	8 μ s	16 μ s
Guard time	0.8 μ s	1.6 μ s	3.2 μ s
FFT period	3.2 μ s	6.4 μ s	12.8 μ s
Preamble duration	16 μ s	32 μ s	64 μ s
Subcarrier spacing	312.5 kHz	156.25 kHz	78.125 kHz

Els canals poden ser de dos tipus, de servei o de control: SCH (Service CHannel) o CCH (Control CHannel).

Pel que fa a la subcapa PLCP, aquesta crea l'anomenada PPDU (Physical Protocol Data Unit) a partir de la trama MAC, per tal de generar els símbols OFDM.

L'estructura de la trama PPDU conté els següents camps, tal i com es mostra a la següent figura extreta de [16]:

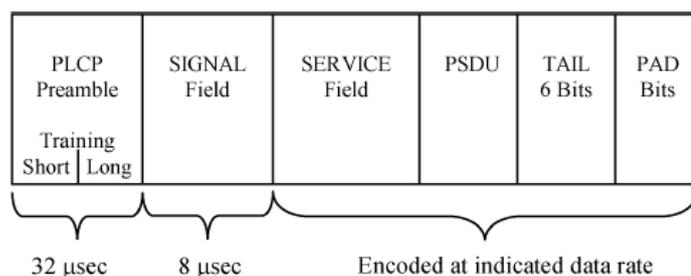


Figura 14 Estructura trama PPDU

On s'observa el preamble el qual du a terme tasques de sincronització i equalització del senyal en el receptor.

El camp SIGNAL conté dues dades. La taxa de dades indicada a la figura N, la longitud de la PSDU (PHY Service Data Unit), i un bit de paritat.

La relació entre els camps PPDU i MPDU es mostra a la següent figura extreta de [16]:

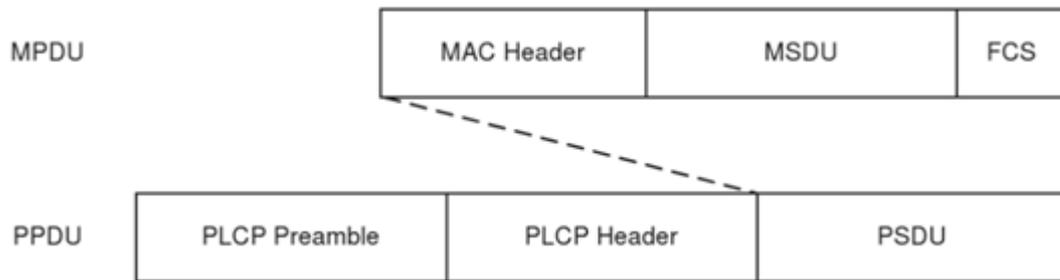


Figura 15 Relació MPDU amb PPDU

Els camps SERVICE i TAIL s'encarreguen de facilitar la operació de l'entrellaçat, és a dir, s'afegeix una seqüència de bits pseudo-aleatòria al flux original amb l'objectiu de d'augmentar la privacitat en les comunicacions i robustesa enfront les interferències.

Finalment, el camp PAD du a terme la funció de que el símbol OFDM codifiqui el nombre correcte de bits d'usuari conforme els indicats a la taula N en funció de la tècnica de modulació emprada.

3.8.3. Capa d'enllaç de dades

El següent esglaió després de la capa física correspon a la capa d'enllaç de dades, també coneguda com a cap MAC (Medium-Access Control).

L'objectiu principal de la capa MAC consisteix en l'establiment de les regles necessàries per poder accedir al medi inalàmbric (subcapa MAC) i gestionar la integritat de les transmissions

La capa MAC està formada per dues subcapes: La subcapa MAC i la subcapa LLC (Logical Link Layer).

SUBCAPA MAC

Tal i com s'ha explicat en capítols anteriors, el protocol IEEE 802.11p està basat en l'estàndard IEEE 802.11a de les populars xarxes wifi. No obstant una de les principals diferències està en el fet de que en una xarxa VANET no existeix la figura de l'access point (AP). És a dir, del node central anomenat STA (STAtion) el qual una de les funcions que té consisteix en propagar el BSS (Basic Service Set) i actuar com a passarel·la d'accés sense fils a la xarxa cablada LAN (Local Area Network) tal i com es descriu detalladament a [17].

IEEE 802.11p introdueix el concepte distintiu respecte IEEE 802.11a de OCB (Outside the Context of a BSS), mitjançant el qual les trames enviades contenen un cap d'adreça destí única (unicast) o grupal (multicast o broadcast), la qual anirà encapsulada en un missatge curt del tipus WAVE el qual es definirà en capes superiors.

L'accés al medi es gestiona aplicant la tècnica EDCA (Enhanced Distributed Channel Access), la qual està basada en el conegut CSMA/CA (Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance), el qual consisteix l'aplicació dels següents passos:

Un node té necessitat de transmetre una trama. Comença interrogant l'estat del medi.

Si el medi està disponible el node transmet la trama. Pel contrari, si està ocupat comença un temps d'espera aleatori abans de tornar a intentar la transmissió de la trama.

EDCA incorpora sobre CSMA/CA mecanismes de qualitat de servei basats en cues anomenades AC (Access Categories), tal i com es mostra en la següent figura extreta de [21]:

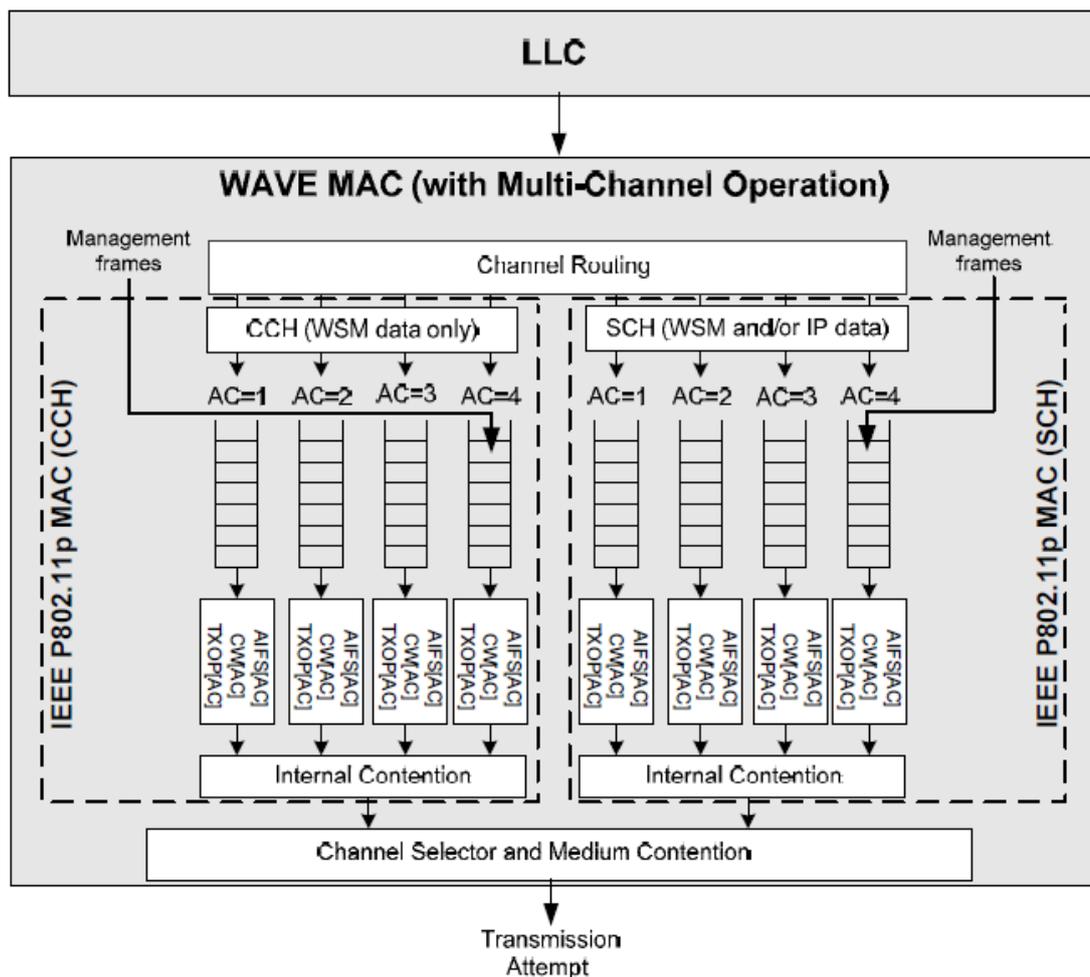


Figura 16 Diagrama implementació QoS a DSRC

En la qual es pot observar també com la capa MAC diferencia els canals de control CCH (Control Channel) dels canals de serveis SCH (Service Channel).

S'observa la intervenció dels següents paràmetres:

- AIFS (Arbitrary Inter-Frame Spacing): Interval mínim de temps d'espera entre que el medi està disponible i que es transmet la trama.
- CW (Contention Window): Finestra de contenció amb cotes mínima i màxima, les quals es calculen en funció de la prioritat assignada i el període de back-off de CSMA/CA aplicat.
- TXOP (Transmit Opportunity): Període de temps en el qual el node pot transmetre tantes trames com li resulti possible. Si TXOP = 1, només es pot transmetre una trama.

AC	CW_{min}	CW_{max}	AIFSN	t_w
0	aCW_{min}	aCW_{max}	9	264 μs
1	$(aCW_{min} + 1)/2 - 1$	aCW_{min}	6	152 μs
2	$(aCW_{min} + 1)/4 - 1$	$(aCW_{min} + 1)/2 - 1$	3	72 μs
3	$(aCW_{min} + 1)/4 - 1$	$(aCW_{min} + 1)/2 - 1$	2	56 μs

Figura 17 Relació control d'accés AC amb paràmetres de transmissió

On el valor numèric associat a AC correspon al tipus de trànsit classificat com a Background, Best effort, Video i Veu. Del 0 al 3 respectivament.

Subcapa LLC

Aplica el estàndard IEEE 802.2 amb l'extensió SNAP (SubNetwork Access Protocol). Cal tenir present que a la capa superior de transport el estàndard IEEE 1609.3 requereix del suport trames del tipus LLC unacknowledged connectionless, la qual està tipificada com a "Type 1" i que permet enviar trames cap a un (unicast) , varis (multicast) o tots les destins (broadcast) de la xarxa.

Extensions de la subcapa MAC

IEEE 1609.4 defineix les extensions de la subcapa MAC, les quals s'encarreguen de gestionar la commutació de les transmissions a través d'un SCH o d'un CCH.

Aquesta commutació es gestiona en el domini temporal, en el qual s'assignen intervals de guarda entre el CCH i el SCH, tal i com es mostra a la següent figura extreta de [18]:

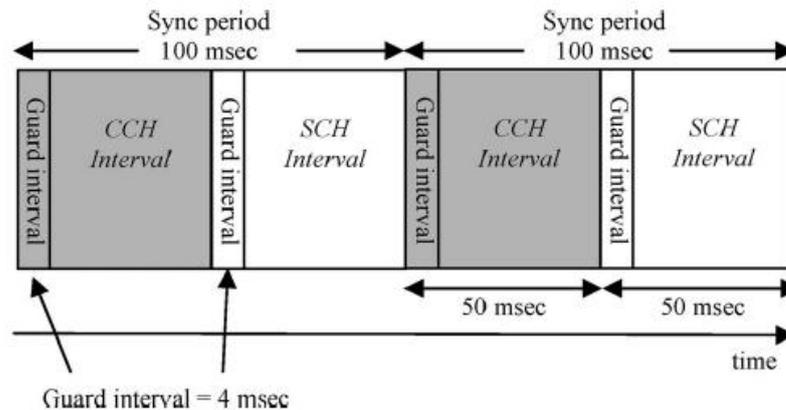


Figura 18 Distribució temporal canals CCH i SCH

On es pot observar que la freqüència de canvi dels SCH i CCH és de 10 Hz.

Per regla general, les trames relatives a comunicacions de seguretat es transmeten en el CCH, mentre que la resta de trames emprades per a usos de info-entreteniment es transmeten pel SCH.

Per tal de prioritzar la transmissió de trames de seguretat, el que es fa és augmentar el interval de transmissió del CCH (CCHI – CCH Interval), però tenint present que el període de sincronisme fixat en 100ms no es pot modificar.

3.8.4. Capes de xarxa i transport: IEEE 1609.3 (WSMP)

L'estàndard IEEE 1609.3 avarca les capes 3 i 4 de xarxa i transport respectivament dins l'àmbit de les aplicacions de seguretat dins d'una xarxa VANET.

Per a la transmissió de paquets d'aplicacions considerades de no seguretat, s'apliquen els protocols TCP/IP estàndards.

El motiu pel qual es descarta l'ús de TCP/IP per a aplicacions de seguretat és minimitzar el tamany de la capçalera del paquet.

El protocol IP està dissenyat principalment per operar en entorns d'interconnexió de xarxes en els quals s'obté la ruta fins al node destí principalment a través de l'adreça IP d'origen i l'adreça IP destí.

En canvi, tal i com s'ha explicat en el capítol del gestió de rutes, a les xarxes VANET s'apliquen protocols basats en transmissions punt a punt auto-organitzades i auto-configurades, on no existeix la figura d'un element central que gestioni les rutes. En canvi la filosofia IP es basa en la intervenció dels routers com a elements centrals de coordinació encarregats d'examinar les capçaleres i reenviar els paquets cap al node destí.

El IEEE 1609.3 ve definit pels protocols WSMP (Wave Short Message Protocol) i WSA (WAVE Service Advertisement) com a responsables de gestionar l'entrega de paquets de dades amb la prioritat indicada.

Cal entendre per servei com la classificació que es fa de la informació intercanviada entre nodes, per exemple avís de semàfor vermell, benzinera propera, etc..

En aquest entorn, els paquets de dades s'anomenen WSM (WAVE Short Messages) i tenen una capçalera amb un tamany màxim de 17 bytes, volum sensiblement inferior als 52 bytes que ocupa com a mínim un paquet UDP/IP.

L'estructura de la trama WSMP es la mostrada a la següent figura extreta de [18]:

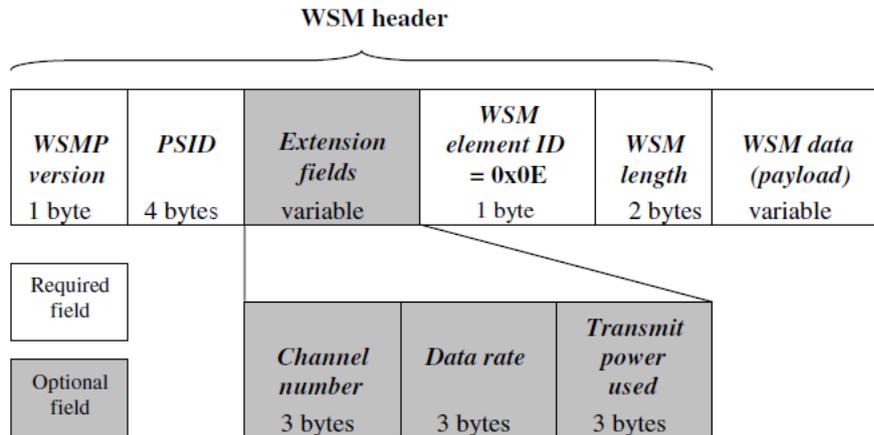


Figura 19 Estructura de la trama WSMP

De la qual cal destacar el camp PSID (Provider Service ID) el qual identifica el tipus de servei vinculat amb el camp que conté les dades a transmetre (payload).

La resta de camps contenen informació descriptiva dels paràmetres de comunicació com el data-rate, canal i potència de transmissió.

A la següent figura extreta de [18] es mostra l'estructura de la trama WSA:

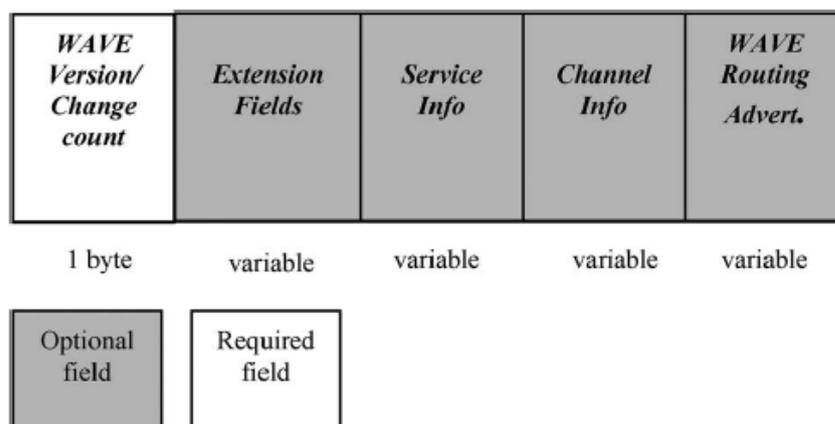


Figura 20 Estructura de la trama WSA

De la qual convé destacar-ne el camp “Service Info” el qual conté un byte etiquetat com a “Service Priority” el qual pot prendre valors de 0 a

63, on 0 correspon a la mínima prioritat i 63 a la màxima assolible per un paquet de dades.

La gestió i prioritació de l'entrega de paquets està fortament condicionada pels següents paràmetres:

- PSID
- "Service Info"
- "Service Priority"

La decisió d'encaminar un paquet vinculat a un determinat servei i una determinada prioritat, segons la documentació consultada a [18] no està totalment estandaritzada, si bé es cert que aquesta decisió, apart dels paràmetres indicats també es contempla la qualitat del enllaç i la disponibilitat de la resta de serveis, cadascun amb la seva prioritat, i que estan en cua d'espera per ser enviats, fet que permet oferir certes garanties no només de que el paquet enviat arribi exitosament al node destí, sinó que aquest ho faci conforme la prioritat establerta.

3.9. Estàndard europeu

L'estàndard europeu anomenat C-ITS (Cooperative – Intelligent Transport Systems), anàlogament a l'americà, també permet establir un paral·lelisme amb la clàssica torre OSI:

OSI	C-ITS	Protocols C-ITS
Aplicació	Missatges V2X i altres	TS 102 539 EN 302 637 TS 19 091 TS 19 321
Transport	TCP/UDP	EN 302 636
Xarxa	IPv6 / BTP GeoNetworking	TS 103 097 TS 102 941
Enllaç	Extensions MAC MAC	EN 302 663 TS 102 724 TS 102 687 TS 103 175
Física	PHY	EN 302 663 (ITS-G5) TS 102 724 TS 102 687 TS 103 175

Figura 21 Comparativa torre OSI vs C-ITS

Les similituds amb l'estàndard americà, apart de l'estructura anàloga a la torre OSI, a grans trets estan en els protocols emprats a la capa física, els quals també estan basats en IEEE 802.11a. Mètode de transmissió OFDM amb 52 subportadores. Modulacions BPSK, QPSK i QAM, Accés al medi CSMA/CA i OCB (Outside the Context of BSS).

Dins la capa MAC, a la subcapa LLC també es basa en el protocol IEEE 802.2 amb l'extensió SNAP (Subnetwork Access Protocol).

La compatibilitat amb IPv6 també és una funcionalitat compartida amb l'estàndard americà.

No obstant existeixen varies diferències, de les quals són presentades a continuació les que presenten una major notorietat:

El rang de freqüències de treball no és exactament el mateix, tal i com es pot observar a la següent figura extreta de [20]:

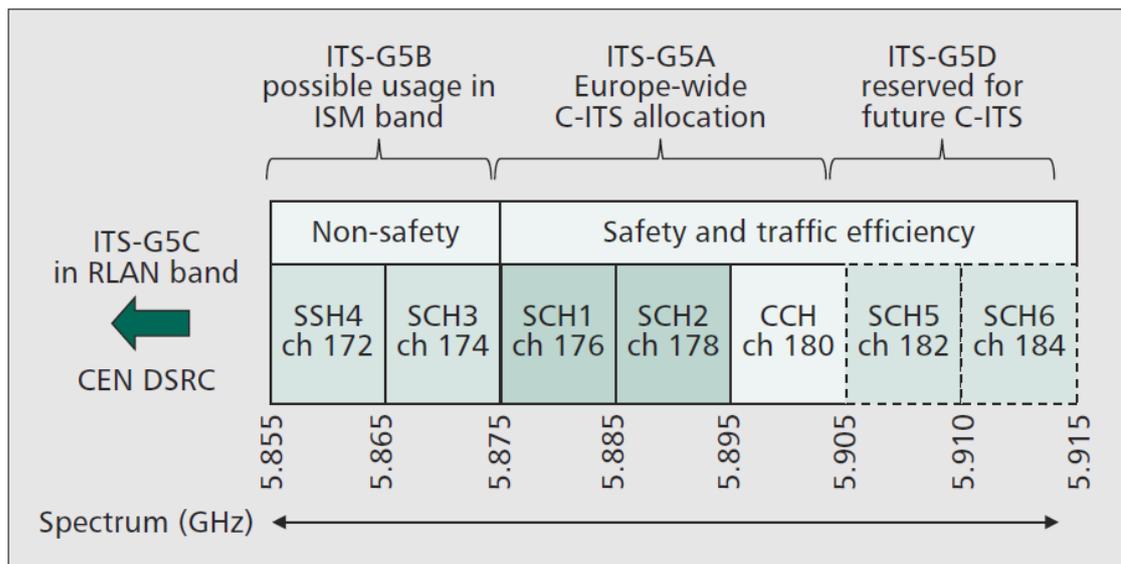


Figura 22 Espectre freqüencial utilitzat per ITS-G5

On es pot observar com el l'estàndard europeu opera dels 5855 als 5915 MHz, mentre que l'estàndard americà ho fa dels 5850 als 5925 MHz.

Pel que fa a les capes de xarxa i transport els estàndards americà i europeu presenten diferències conceptuals. Per la banda americana el protocol, tal i com es pot consultar a [20] el protocol WSMP, ja descrit en capítols anteriors, transmet els paquets WSM en mode broadcast.

En canvi, l'estàndard europeu, d'entrada descarta la transmissió de paquets de les capes de xarxa i transport en mode broadcast, sinó que ho fa en mode d'un o varis salts conforme el protocol anomenat BTP (Basic Transport Protocol) Geonetwork, el qual limita la transmissió de paquets en una ara

física determinada com pot ser un cercle o un el·lipse, tal i com es mostra a la següent figura extreta de [20]:

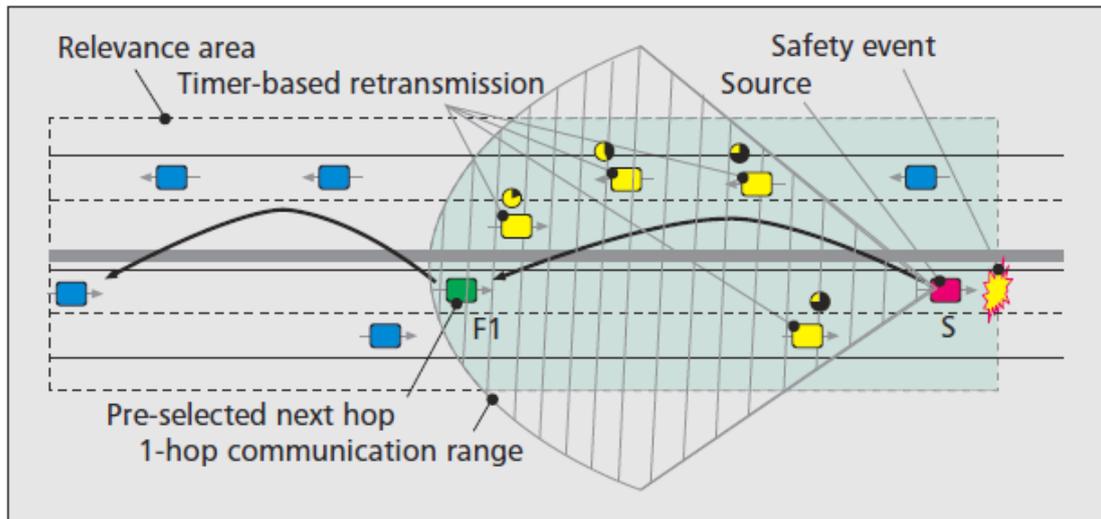


Figura 23 Aplicació de Geonetworking

A diferència dels protocols d'enrutat típicament usats en l'estàndard americà com DSDV, OLSR i AODV, amb Geonetworking no és necessari establir i mantenir les rutes, en el seu lloc el que es fa és aplicar diverses tècniques per evitar la duplicitat de paquets rebuts i s'estableix una cadència d'enviament en base a finestres de contenció, tal i com es pot observar a la figura 23 amb els senyals "Timer-based retransmission".

El protocol BTP definit conforme l'estàndard EN 302 636-5-1 s'encarrega del multiplexat i desmultiplexat dels missatges a la capa de transport.

Entrar en més detall sobre l'estàndard europeu no forma part dels objectius principals del present TFM, donat que l'exercici de simulació està centrat en el comportament del protocol IEEE 802.11p basat en l'estàndard americà.

S'ha escollit el estàndard americà per dur a terme les simulacions, perquè en el procés de recerca d'informació realitzat, s'ha obtingut molta més informació del estàndard americà que no pas l'europeu, no només en l'àmbit purament teòric, sinó en els casos de proves pilot.

Inclús les proves pilot dutes a terme per Universitats europees, com la de Politècnica de València a [2], mencionada en l'apartat d'Aplicacions, les proves s'ha realitzat treball sobre l'estàndard americà.

Un altre aspecte que no contribueix a un major desplegament de l'estàndard europeu és el fet que cada país membre, d'un total de 27, pot aportar els seus matisos relatius a la regulació en l'ús de l'espectre radioelèctric, de manera que els processos d'estandardització son molt més lents i la justificació en inversió en equipament compatible, més difícil de justificar, degut a possibles incompatibilitats entre diferents països de la Unió Europea.

4. Simulació

L'objectiu de la simulació consisteix principalment en contribuir a l'alineament dels conceptes teòrics descrits fins ara amb els resultats obtinguts fruit de les simulacions.

Aquest alineament es pretén aconseguir modificant una sèrie de paràmetres de la simulació considerats clau, de manera que l'anàlisi dels resultats de simulació obtinguts i la seva posterior comparació permetrà extreure una sèrie de relacions causa – efecte entre el paràmetre modificat i el resultat obtingut.

En definitiva, el que es pretén amb la simulació és trobar l'alineament de la teoria amb la pràctica i identificar els paràmetres més susceptible de ser modificats en un entorn real per tal d'obtenir el resultat desitjat.

Hom pot preguntar-se si la simulació es du a terme per resoldre algun problema existent, la resposta és si. Ja que en termes generals la simulació significa fer un pas sensiblement més assequible en temps i diners, i factible en qüestió de recursos materials que no pas una prova pilot en un tram de carretera, per tal d'assemblar-se el més possible a una situació real de circulació de vehicles.

Per tant, amb la resolució d'aquest problema fent simulacions, s'obtenen com a avantatges l'estalvi de recursos i l'assentament de les bases del disseny i sobretot els primers valors temptatius de parametrització del prototipus.

Els resultats i conclusions obtinguts no només són útils per refermar els conceptes teòrics, sinó que també es pretén que serveixin per a resoldre els problemes de disseny inicial d'un entorn real o almenys un prototip, per exemple, ajustar la potència del transmissió conforme el model de propagació escollit i densitat de nodes, etc..

Existeix documentació en la qual es relaten simulacions basades en ns-3, per exemple a [21] i [23].

Destacar que en les proves pilot dutes a terme en entorns controlats com el de la Universitat de València [2], es conclou amb la necessitat de fer més simulacions i proves pràctiques per tal de que el producte final sigui el més fiable possible.

Pel que fa a la relació existent entre l'estudi teòric descrit a la primera part del present TFM amb les simulacions dutes a terme a continuació, el que es pretén és que el coneixement adquirit en l'estudi teòric contribueixi a comprendre i saber extreure conclusions, ja no només dels resultats obtinguts començant per les simulacions sinó establint les bases de treball futur consistent en el desenvolupament d'un hipotètic sistema real, escurçant el nombre d'iteracions necessàries per tal d'arribar al comportament desitjat.

Per exemple: La teoria indica que l'efecte Doppler augmenta amb la velocitat en que dos nodes s'allunyen o s'acosten l'un de l'altre, per tant aquest serà un factor a tenir en compte en les fases de disseny i implementació d'un sistema real, en funció de si ha de ser operatiu en un entorn urbà i/o d'autopista on les velocitats poden ser majors, però la diferencia de velocitats inferior que a una ciutat on es poden combinar fàcilment vehicles parats amb vehicles circulant a uns 50 km/h.

4.1. Descripció

Tal i com s'ha indicat en els capítols introductoris del present TFM, el procés de simulació es durà a terme des de l'àmbit estrictament teòric.

Existeixen multituds de programaris de simulació, els quals poden ser classificats en primera instància com a software de pagament o de codi obert.

Exemples de programari de pagament són el OPNET Modeler, el qual d'entrada és de pagament, no obstant ofereix una versió d'ús acadèmic sense cost. Qualnet també és un exemple de simuladors de xarxes comercials. SUMO (Simulation of Urban Mobility) és un altre simulador de codi obert de trànsit rodat.

En aquest cas s'ha escollit la opció de codi obert per motius econòmics, pràctics i pel fet que els simuladors de codi obert d'entrada ja donen accés a una gran quantitat d'informació, fet que ha permès avaluar sense cost econòmic la viabilitat d'aquesta opció.

Els criteris aplicats a l'hora d'identificar el programari de simulació més adequat ha estat els següents:

- Capacitat per adaptar-se a l'entorn de les xarxes VANET.
- Volum i varietat d'informació disponible lliurement.
- Recursos hardware assumibles.
- Experiència.
- Facilitat d'ús.

En base a aquests criteris, s'ha identificat el simulador ns-3 com el que s'hi aproxima amb major mesura respecte la resta de simuladors citats anteriorment.

ns-3 és un simulador de xarxes IP orientat a entorns de recerca i ús educatiu amb llicència del tipus GNU GPLv2, el qual rep suport a nivell financer i organitzatiu per part de l'anomenat ns-3 Consortium, el qual compta amb la Universitat de Washington, entre d'altres, com a membres fundadors.

Els inicis de ns-3 es remunten a l'any 2009, quan el seu predecessor el ns-2.33 va finalitzar la seva etapa. No obstant, els seus orígens primaris es remunten als principis de la dècada dels 90, tal i com es mostra a la següent figura extreta de <https://www.nsnam.org/> la web de referència del consorci ns-3.

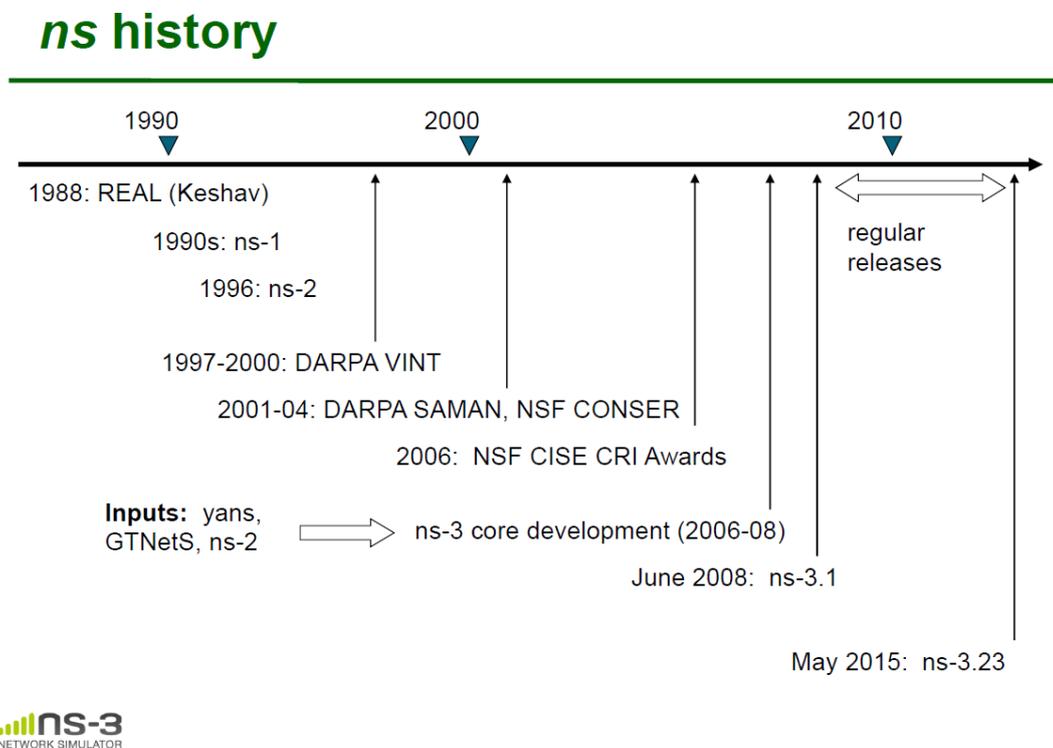


Figura 24 Evolució temporal ns-3

Els llenguatges de programació de ns-3 són bàsicament python i C++. A partir dels quals estan disponibles llibreries i kits de desenvolupament (SDKs) a partir del qual es poden generar scripts i eines per a propòsits particulars.

Els sistemes operatius suportats teòricament són linux, FreeBSD i microsoft windows, no obstant les llibreries i documentació disponibles per al linux són

sensiblement més extenses que per a la resta. És per aquest motiu que s'ha decidit dur a terme les simulacions en base a un sistema linux, concretament Factoria 23 (64 bits) workstation, com a màquina virtual mitjançant l'eina Virtualbox per a Windows 8.1 en un PC amb 4 GB de RAM i processador intel Core i5 de 3^a generació amb 4 processadors lògics.

4.2. Entorn de simulació

Un cop instal·lat Virtualbox al PC, cal descarregar la distribució Fedora des de <https://getfedora.org/es/workstation/download/>. El procés d'instal·lació de la màquina virtual requereix prèviament de l'activació del suport limitat a la virtualització del hardware anomenada VT-x pel cas de CPUs intel. Aquesta activació es du a terme a la BIOS del PC.

Per tal d'arribar a un compromís entre les prestacions de la màquina virtual i del PC en el qual s'hi executa, s'ha establert assignar a la configuració de Virtualbox 1269 MB de RAM i 2 processadors lògics.

A partir d'aquí, un cop instal·lada i configurada la màquina virtual es defineix un usuari amb permisos d'administració, cal seguir el procediment indicat a la web de referència de ns-3 (<https://www.nsnam.org>) on en primera instància cal instal·lar la GNU toolchain juntament amb altres eines d'utilitat com el compilador `gcc`, l'eina `scons` per la execució de scripts desenvolupats en `python`:

```
[jordi@localhost ~]$ yum install libxml2 libxml2-devel  
[jordi@localhost ~]$ yum install gcc gcc-c++ make automake autoconf binutils  
[jordi@localhost ~]$ yum install openssh-server openssh-clients openssl  
[jordi@localhost ~]$ yum install python python-devel mercurial bzip2  
[jordi@localhost ~]$ yum install scons flex bison  
[jordi@localhost ~]$ yum install tcpdump valgrind gdb emacs
```

Arribats a aquest punt, ja s'està en disposició d'instal·lar el simulador ns-3 pròpiament dit, executant les següents comandes:

```
[jordi@localhost ~]$ cd ~
[jordi@localhost ~]$ mkdir repos
[jordi@localhost ~]$ cd repos
[jordi@localhost repos]$ hg clone http://code.nsnam.org/ns-3-allinone
[jordi@localhost repos]$ cd ns-3-allinone
[jordi@localhost ns-3-allinone]$ ./download.py
[jordi@localhost ns-3-allinone]$ ./build.py
[jordi@localhost ns-3-allinone]$ cd ns-3-dev
[jordi@localhost ns-3-dev]$ ./test.py
[jordi@localhost ns-3-dev]$ ./waf --regression
```

Un cop instal·lat ns-3 a la màquina virtual es poden consultar a la carpeta *examples* diferents casos de codi executable classificats en carpetes segons l'aplicació, inclús hi ha exemples dedicats a aplicacions *wireless*, no obstant aquests són relatius a xarxes wifi : 80211n-mimo.cc , wifi-tcp.cc, etc.. però cap exemple focalitzat en les xarxes VANET on s'hi puguin aplicar els seus propis protocols com 802.11p.

És per aquest motiu que s'ha dut a terme una recerca d'un simulador que permeti avaluar el comportament d'una xarxa VANET, almenys en la capa física i que permeti variar-ne els principals paràmetres per tal de poder comparar els diferents resultats i extreure'n les pertinents conclusions.

El resultat d'aquesta recerca està públicament disponible a <https://www.nsnam.org/wiki/AnnualTraining2015> És a dir, a l'encontre anual de formació en ns-3 celebrat els 11 i 12 de Maig de 2015 a Barcelona, on s'hi pot consultar informació específica de xarxes VANET en general i del protocol 802.11p corresponent a l'estàndard americà en particular.

Entre la documentació disponible hi ha l'arxiu "veh-com-training-sources.zip" descarregable directament des del següent enllaç:

<http://www.nsnam.org/tutorials/consortium15/veh-com-training-sources.zip>

el qual conté diferents rutines d'avaluació de xarxes VANET en la capa física, en el qual cal destacar com al més complet l'arxiu "vanet-routing-compare.cc", el qual permet variar els arguments determinants per extreure conclusions de cadascuna de les simulacions.

El simulador de trànsit generarà una sèrie de traces vehiculars en funció dels següents paràmetres:

- Nombre de nodes [nodes]
- Potència de transmissió en dB [txp]
- Protocol de gestió de rutes entre nodes [protocol]:
 - OLSR <1>
 - AODV <2>
 - DSDV <3>
- Model de pèrdues del canal [lossmodel]
 - Friis <1>
 - ItuR1411los <2>
 - TwoRayGround <3>
- Model d'esvaïment [fading]
 - none <0>
 - Nakagami <1>
- Variant del protocol IEEE 802.11 aplicada [802.11mode]
 - 802.11p <1>
 - 802.11b <2>
 - WAVE-PHY <3>
- Velocitat dels nodes en m/s [speed]
- Escenari [scenario]
 - Parking Lot <1>
 - Highway <2>
 - Tracefile <3>

Es pot observar com els principals paràmetres susceptibles de ser modificats estan alineats amb els conceptes descrits a l'apartat teòric del present TFM,

com són els protocols de gestió de rutes, models de propagació de canal, la velocitat dels nodes la qual està relacionada amb l'efecte Doppler, etc..

El punt de partida de les simulacions consisteix en executar el script sense modificar cap valor en els arguments de programa, és a dir, amb els seus valors per defecte, ja que l'argument 80211Mode, per defecte ja pren el valor de 1, és a dir 802.11p.

L'objectiu d'aquesta simulació amb els valors per defecte és doble: per una banda es pretén descriure el significat dels paràmetres resultants obtinguts en la línia de comandes i arxius de sortida, i per l'altra banda, es pretén mostrar gràficament el rendiment de la xarxa VANET per tal d'establir-ne els valors de referència que es modificaran en les successives simulacions.

A la següent figura es mostra gràficament l'entorn sobre el qual es porten a terme les simulacions. Es tracta de l'esquema en dues dimensions d'un aparcament en el qual hi ha una separació entre vehicles de 5 metres en l'eix horitzontal i 20 metres en l'eix vertical:

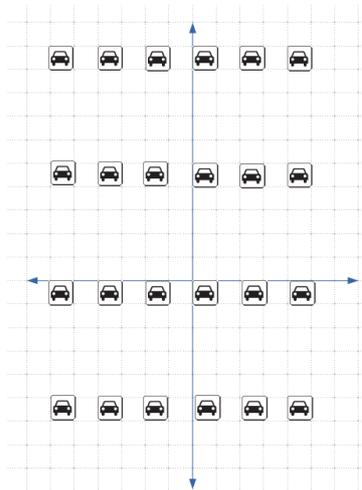


Figura 25 Esquema de l'escenari a simular

Cadascun dels vehicles transmet paquets de dades de 200 bytes 10 cops per segon.

Els vehicles, per defecte, tenen assignada una velocitat inicial de 20 m/s però que es veu afectada pel model de mobilitat anomenat RWP (Random

Waypoint Model) el qual es caracteritza a grans trets pel fet de que cada node es trasllada cap a una destinació de coordenades aleatòries a una velocitat que pot anar de 0 a al màxim predeterminat, en aquest cas inicial 20 m/s.

Un cop el node a arribat al destí, està parat un temps aleatori, també acotat, i executa una nova iteració de moviment aleatori fins que acaba de el temps de simulació, tal i com es pot consultar a [22].

Aquest comportament, es pot representar gràficament a la següent figura extreta de la web del popular software de càlculs matemàtics i simulacions MATLAB:

<http://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/30939-random-waypoint-mobility-model>

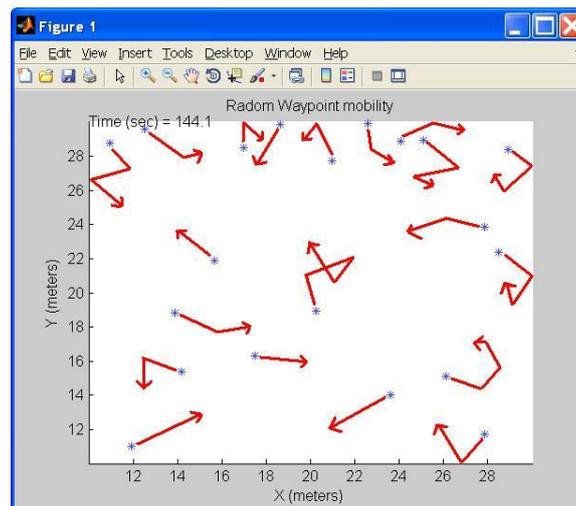


Figura 26 Representació gràfica mitjançant MATLAB del model RWM

En el capítol 3.4 s'han analitzat els diferents models de mobilitat aplicats al procés de simulació, on s'explicava que aquests models es poden analitzar des de tres punts de vista.

A continuació es durà a terme el procés d'alineació entre la simulació i el concepte de cadascun dels tres punts de vista de model del mobilitat:

1.- Nivell de detall de la ruta entre origen i destí.

La simulació està basada en moviment d'origen a destí, sense contemplar les coordenades dels punts intermitjos, per tant, s'aplica el model de viatge.

2.- Interacció entre el trànsit i els simuladors de xarxa.

Tal i com s'ha comentat recentment, el model RWP es fonamenta en l'aleatorietat, per tant el model aplicat és l'aleatori.

3.- Manera en que es comparteix la informació entre el simulador de trànsit i el simulador de xarxa.

El model de simulador emprat és el aïllat, ja que en primera instància es generen les traces vehiculars i un cop han estat generades, aquestes són enviades al simulador de xarxa que generarà les comunicacions i mostrarà els resultats de la simulació.

Es pot observar que els tres models de mobilitat aplicats a la simulació són els mes simples, això és degut a que es recomana abans de dur a terme simulacions més complexes que puguin simular, per exemple, un entorn de circulació urbana, amb caracterització tram a tram, aplicant models més complexes com el de flux amb diferents nivells de granularitat, és important fonamentar les bases amb un exemple més simple i a partir d'aquí anar augmentant progressivament el grau de complexitat.

Seguint amb l'establiment de paral·lelismes entre la teoria i la simulació , a continuació s'analitza l'analogia entre la simulació i models teòrics de canal descrits a l'apartat 3.5.1: deterministes, empírics i estocàstics o probabilístics.

El resultat final que s'obté de la simulació depèn exclusivament dels paràmetres d'entrada, per tant, els paràmetres que no s'hagin contemplat, per exemple la temperatura o humitat relativa de l'ambient, no afectaran al resultat final.

És per aquest motiu, també, que encara que es repeteixi la simulació N vegades, si els paràmetres d'entrada no varien, el resultat final serà sempre el mateix.

Per tant, a la simulació hi aplica un model de canal determinista.

4.3. Resultats obtinguts

L'objectiu d'aquest apartat consisteix en mostrar la informació necessària per avaluar i comparar el comportament d'una xarxa VANET sota uns paràmetres concrets.

Per tal d'avaluar aquest comportament, cal identificar uns paràmetres que puguin aportar la informació suficient per extreure'n conclusions directament.

En base a aquesta premissa s'han identificat els següents paràmetres com els més adients ja que són els que donen la informació més descriptiva i precisa sobre el rendiment de la xarxa:

- **Taxa d'entrega de paquets:** Expressat en percentatge respecte el nombre de paquets enviats i que han arribat en destí exitosament.
- **Goodput:** És el Throughput a nivell d'aplicació. És a dir, s'exclouen les capçaleres de protocols i les retransmissions.

S'ha descartat l'anàlisi del paràmetre de sortida relatiu al 'overhead' de les capçaleres físiques (MacPhyOverhead) encara que la informació proporcionada per aquest paràmetre, en teoria, és indicativa de l'eficiència dels protocols d'accés a la xarxa (CSMA/CA), els resultats obtinguts en les diferents simulacions realitzades han estat excessivament semblants, de manera que no podien aportar informació rellevant en la comparativa entre simulacions.

4.3.1. Valors per defecte

A continuació es mostren els resultats obtinguts després d'executar el simulador conforme els paràmetres per defecte corresponents a l'escenari n°1 que correspon a una area d'aparcament (parking lot) en la qual hi ha 20 nodes (vehicles) separats entre si 5 metres en l'eix horitzontal i 20 metres en l'eix vertical.

El principals valors per defecte aplicats són els següents:

Potència de transmissió	7,5 dBm
Protocol de gestió de rutes	AODV
Model de pèrdues de canal	TwoRayGround
Model d'esvaïment	None
Velocitat dels nodes	20 m/s
Nombre de nodes	156

Figura 27 Valors per defecte simulador VANET ns-3

A les següents dues figures es mostra la taxa d'entrega de paquets i goodput en funció del temps, concretament els 10 segons que dura la simulació.

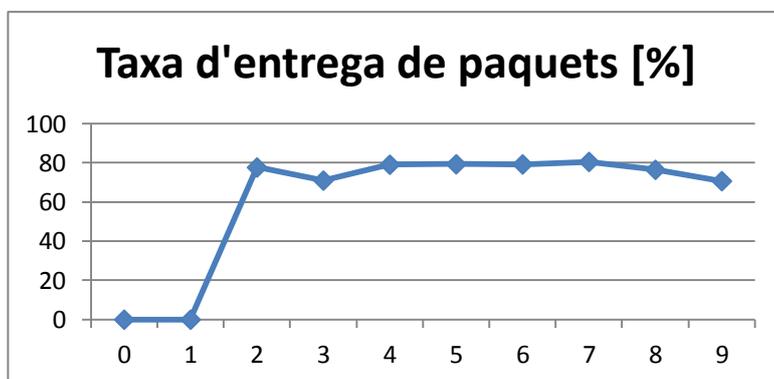
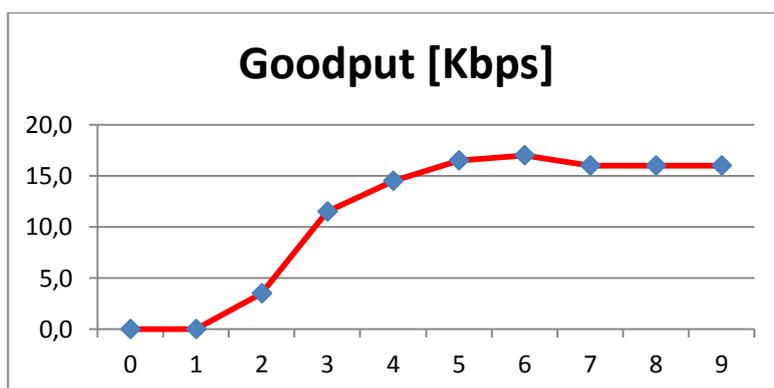


Figura 28 Taxa entrega paquets respecte el temps a valors per defecte



Goodput promig = 12,758 Kbps

Figura 29 Goodput respecte el temps a valors per defecte

Indicar que el simulador no genera aquestes figures directament, el que s'obté després d'executar la simulació és un arxiu en format de full de

càlcul anomenat “vanet-routing.output.csv” del qual s’han extret les dades necessàries per tal d’obtenir l’evolució temporal de la taxa d’entrega de paquets i el goodput i mostrar-lo en format gràfic més vistós i ràpid d’analitzar a primer cop d’ull.

4.3.2. Augment de la potència de transmissió

Per tal de poder avaluar l’efecte dels canvis en els paràmetres de comunicació de la xarxa VANET, és necessari fer només un canvi per tal de poder avaluar amb claredat el canvi de comportament que ha suposat aquesta variació en un paràmetre concret.

El primer paràmetre a variar, és la potència de transmissió dels nodes, la qual per defecte està fixada a 7,5 dB i que s’augmenta a 10 dB. Això és executant el simulador d’aquesta manera:

```
[jordi@localhost ns-3-dev]$ ./waf --run"vanet-routing-compare --txp=10"
```

Els resultats obtinguts són els següents:

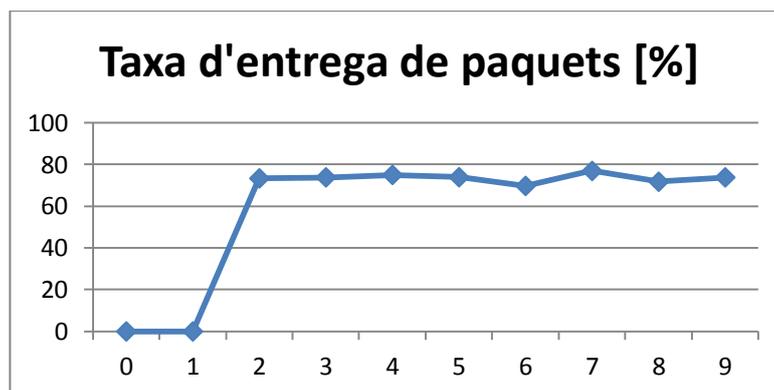
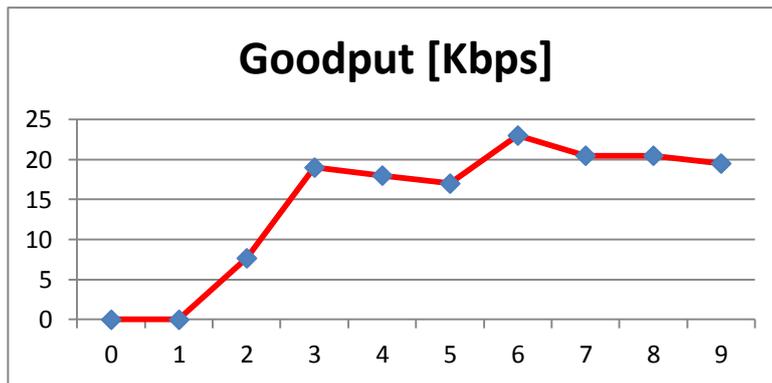


Figura 30 Taxa entrega de paquets respecte el temps amb augment de potència de transmissió



Goodput promig = 16,588 Kbps

Figura 31 Goodput respecte el temps amb augment de potència transmissió

Es pot observar com l'augment de potència no ha suposat un canvi significatiu en la taxa d'entrega de paquets, en canvi el goodput promig ha augmentat un 30% aproximadament.

No obstant cal tenir en compte l'augment de potència transmesa ha estat molt superior a aquest 30%, al passar dels 7.5 dBm (5,62 mW) a 15 dBm (31,62 mW). És a dir un 533% d'augment.

4.3.3. Disminució del nombre de nodes

Tornant als valors originals per defecte en el simulador, a continuació s'avalua el comportament de la xarxa en disminuint el nombre original de nodes fixat a 156, fins a la meitat: 72.

L'execució de la simulació s'ha dut a terme mitjançant la següent instrucció:

```
[jordi@localhost ns-3-dev]$ ./waf --run"vanet-routing-compare --nodes=78"
```

Els resultats obtinguts són els següents:

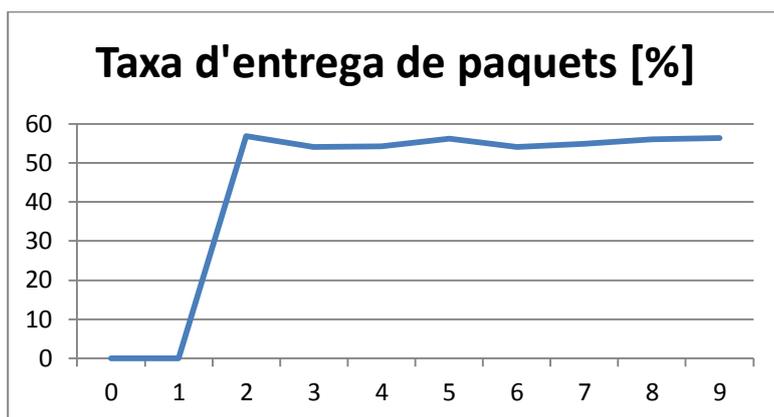


Figura 32 taxa d'entrega de paquets respecte el temps amb disminució del nombre de nodes



Goodput promig = 9,25 Kbps

Figura 33 Goodput respecte el temps amb disminució del nombre de nodes

En aquests cas es poden observar els pitjors resultats obtinguts fins ara, tant en taxa d'entrega de paquets com en goodput.

El motiu d'aquesta disminució del rendiment ve motivat per la pròpia natura de les xarxes VANET, les quals son cooperatives i per tant, com menys nodes contribueixin a al reenviament de paquets, menys rutes possibles hi haurà entre el node origen i el node destí, aspecte que fa minvar la possibilitat d'entregar un paquet en destí de manera exitosa.

El fet que hi hagi menys nodes, propicia també que la distància entre aquests també tendeix a ser major, i en conseqüència augmenta la

degradació del enllaç i les prestacions a nivell de taxa net de bit (goodput) del mateix.

4.3.4. Canvi del model de propagació

Arribats a aquest punt, cal fer notar que el model de pèrdues de canal és el TwoRayGround, o model de propagació en terra plana, anteriorment descrit.

Es podria aplicar el model de Friis de propagació en espai lliure sense tenir en compte el terra, però es descarta perquè s'allunya massa del entorn real d'una xarxa VANET, tal i com es pot consultar a [2], els nodes de comunicacions estan ubicats als sostres metàl·lics dels vehicles que transiten pel terra, per tant, no aplica realitzar una simulació en la qual es tingui present la existència del terra, ja que queda massa allunyat de l'antena.

L'altre model de pèrdues de canal disponible en el simulador és el ITU R1411, el qual es caracteritza per la gran precisió a l'hora de simular diferents entorns, per tant, es considera interessant executar la simulació aplicant el model ITU 1411 LOS (Line Of Sight).

```
[jordi@localhost ns-3-dev]$ ./waf --run"vanet-routing-compare --nodes=78 --lossModel=2"
```

Els resultats obtinguts són els següents:

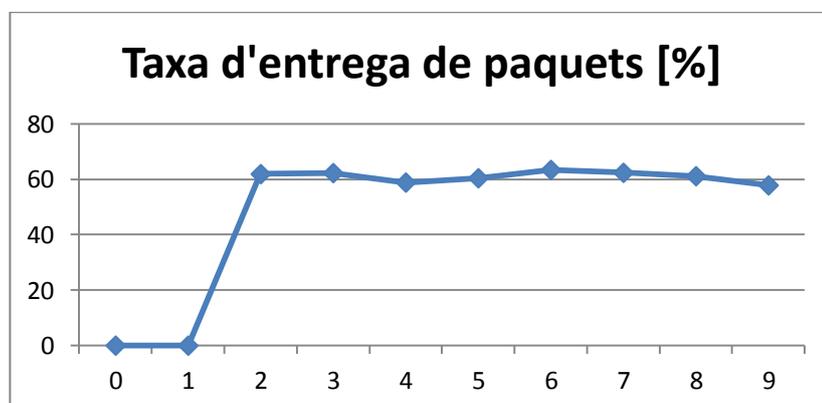
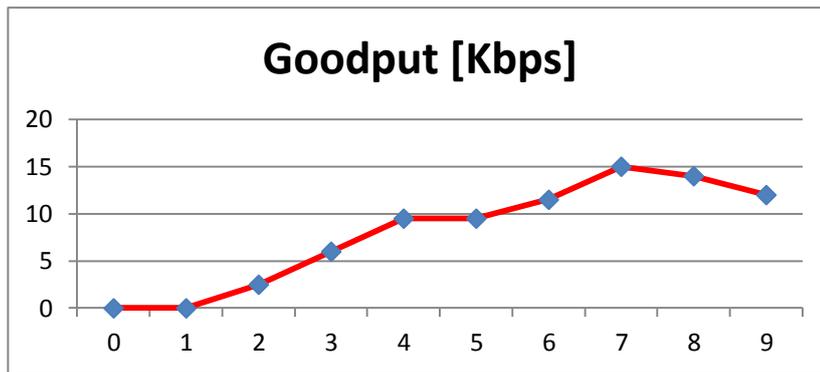


Figura 34 Taxa d'entrega de paquets respecte el temps amb model ITU R1411 LOS



Goodput promig = 8,92 Kbps

Figura 35 Goodput respecte el temps amb model ITU R1411 LOS

En aquest cas es pot observar com el la taxa d'entrega de paquets ha augmentat lleugerament, mentre que l'evolució temporal del goodput ha resultat més constant, en promig ha disminuït una mica.

4.3.5. Canvi del model de gestió de rutes

Un dels paràmetres que també són susceptibles de modificar el rendiment de la xarxa VANET que està essent objecte de la simulació és el model emprat del gestió de rutes.

El simulador permet avaluar el comportament dels 3 models de gestió de rutes descrits en capítols anteriors:OLSR, AODV i DSDV.

OLSR

A continuació es mostren els resultats aplicant el protocol proactiu OLSR:

```
[jordi@localhost ns-3-dev]$ ./waf --run"vanet-routing-compare --
protocol=1 --nodes=78 --lossModel=2"
```

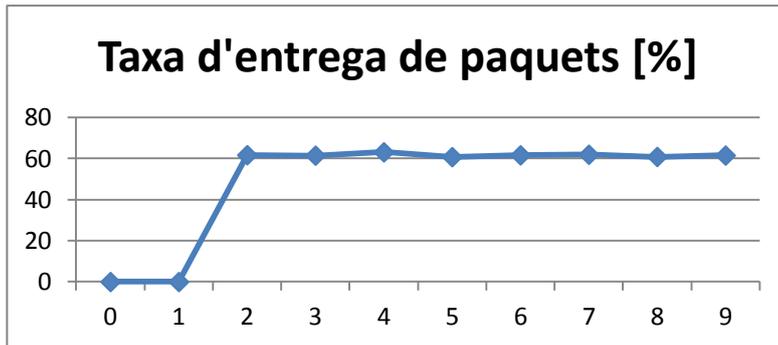
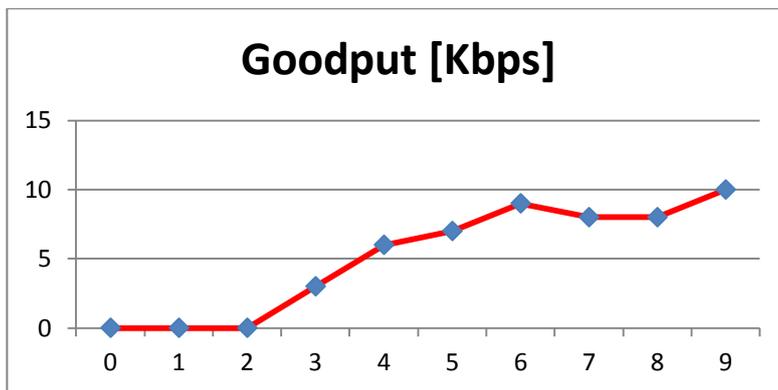


Figura 36 Taxa d'entrega de paquets respecte el temps amb gestió de rutes OLSR



Goodput promig = 6,25 Kbps

Figura 37 Goodput respecte el temps amb gestió de rutes OLSR

DSDV

Els resultats obtinguts al aplicar el protocol proactiu DSDV són els següents:

```
[jordi@localhost ns-3-dev]$ ./waf --run"vanet-routing-compare --
protocol=3 --nodes=78 --lossModel=2"
```

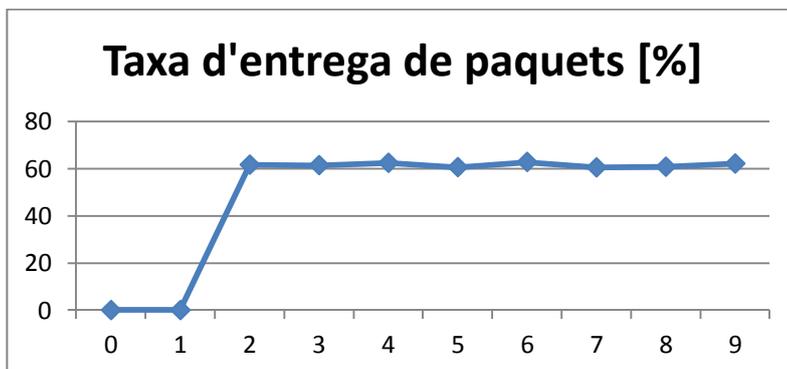


Figura 38 Taxa d'entrega de paquets respecte el temps amb gestió de rutes DSDV



Goodput promig = 9,25 Kbps

Figura 39 Goodput promig respecte el temps amb gestió de rutes DSDV

S'observa com tots els protocols tenen unes taxes d'entrega de paquets bastant similars.

Pel que fa al Goodput, DSDV i AODV tenen unes prestacions bastant similars, però DSDV presenta una evolució més regular, probablement motivat per la seva natura de protocol proactiu que permet disposar de més informació sobre l'estat dels enllaços que componen les rutes i per tant permet identificar amb major precisió la ruta més òptima estabilitzant-ne les prestacions al llarg del temps.

4.3.6. Evolució de les prestacions conforme augmenta el nombre de nodes

Un cop identificat el protocol DSDV com el que ha obtingut les millors prestacions globals, es simula la evolució del goodput en funció de com van augmentant el nombre de nodes.

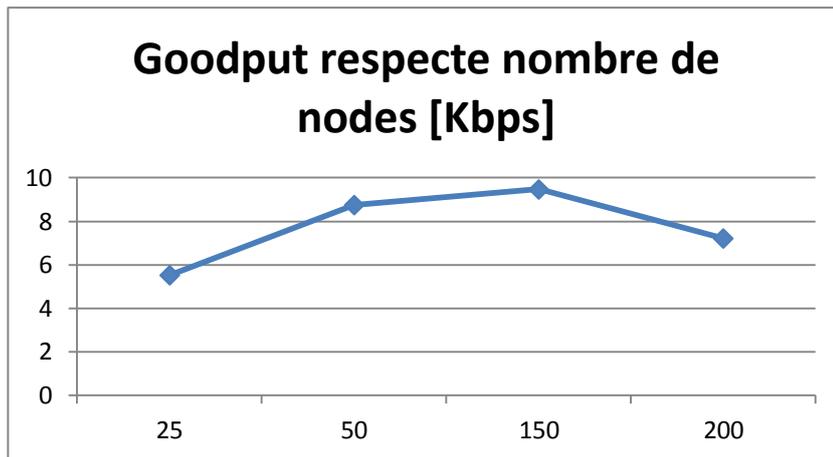


Figura 40 Goodput respecte el nombre de nodes

S'observa com al principi, amb 25 nodes, existeix un dèficit de nodes que perjudica la generació suficient de rutes que permetin millorar el goodput, però quan la xarxa ja disposa d'uns 150 s'arriba al valor màxim de Goodput a partir del qual ja es veu disminuït degut principalment a que el medi es compartit (CSMA/CA) i ja no es poden atendre totes les peticions de comunicació amb la mateixa eficàcia que quan el nombre de nodes era inferior a 150 unitats.

4.3.7. Evolució de les prestacions amb l'augment de la velocitat dels nodes

A la següent figura es pot observar l'evolució del goodput a mida que augmenta la velocitat dels nodes:

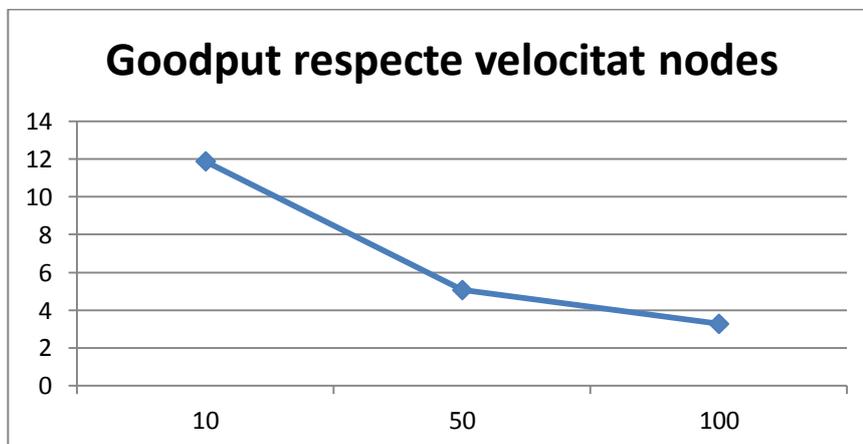


Figura 41 Goodput respecte la velocitat dels nodes

L'augment de la velocitat dels nodes provoca que una major variabilitat respecte el temps dels enllaços RF entre nodes, de manera que la informació disponible de les rutes deixa de tenir validesa més ràpidament, i augmenta la probabilitat d'enllaços trencats i d'elecció de rutes subòptimes, fet que provoca unes menors prestacions globals de la xarxa, i en definitiva una disminució del goodput.

4.4. Conclusions

A continuació, i de manera sintètica, es resumeixen les conclusions relatives específicament a les simulacions dutes a terme:

- L'augment de la potència de transmissió ha suposat un augment la taxa d'entrega de paquets i el goodput promig però en una menor proporció.

La qualitat dels enllaços haurà millorat i en conseqüència el goodput.

- La disminució del nombre de nodes fa disminuir les prestacions del sistema degut a una hipotètica major distància entre nodes que haurà perjudicat la qualitat dels enllaços i menor nombre de rutes possibles.
- El model de propagació que reproduïx amb major fidelitat l'entorn de la xarxa VANET simulada és el ITU R1411 LOS.
- El protocol de gestió de rutes amb majors prestacions es el DSDV. Protocol proactiu de majors prestacions. L'ample de banda de la xarxa ha estat suficient per suportar el major consum respecte els protocols reactius.
- El goodput augmenta amb el nombre de nodes fins a un límit on llavors baixa el rendiment. Menor distància entre nodes ha suposat enllaços més robustos i per tant, major goodput. També més possibles rutes, però el límit de prestacions de CSMA/CA s'ha identificat sobre els 150 nodes.
- L'augment de velocitat dels nodes augmenta la variabilitat de la qualitat dels enllaços respecte el temps, fet que provoca una davallada del goodput. El rumb aleatori dels nodes ha provocat que les rutes perdin vigència amb major celeritat i el protocol de gestió de rutes no les pugui actualitzar al mateix ritme, fet que fa augmentar les retransmissions i disminuir el goodput.

5. Conclusions finals.

Lliçons apreses

La redacció de textos científics en un format més amè i estructurat ha resultat un repte, en el qual es considera que s'ha avançat però amb la consciència de que queda marge de millora. La redacció correcta de la llengua catalana sense faltes d'ortografia també ha resultat una lliçó apresada.

Recerca crítica d'informació, assimilació, filtrat i esquematització.

Capacitat de síntesi per ajustar-se límit de 90 pàgines pel TFM.

Consecució dels objectius

L'objectiu marcat des del principi consistia en desenvolupar un TFM compost per dues parts: l'estudi teòric a la primera, i la simulació a la segona. Per tant, es considera que els objectius, en línies generals, han estat aconseguits, però amb els matisos que s'indiquen a continuació.

Anàlisi crític del seguiment de la planificació

Inicialment es va preveure dedicar aproximadament la meitat del temps disponible al producte presentat, en aquest cas la simulació i les seves corresponents conclusions.

No obstant, la confecció de la part teòrica, composta a grans trets pel disseny inicial de l'índex, recerca, destriament, anàlisi i comprensió d'informació i el redactat de la memòria, ha acabat requerint més temps del inicialment previst.

Aquesta desviació en la planificació ha provocat que aspectes que inicialment estaven previstos d'abordar com la gestió d'un hipotètic projecte d'implantació d'una xarxa VANET ja a nivell comercial va haver de ser descartat al anar observant que la confecció de la part teòrica estava consumint més temps del previst.

La descripció de l'estàndard europeu també hauria sigut desitjable de fer-la més completa, però la manca de temps i el fet de que la simulació fos basada en l'estàndard americà ha propiciat a prendre la decisió de fer-ne una descripció més superficial posant el focus sobretot en les diferències respecte l'estàndard americà. D'aquesta manera s'ha pogut disposar del temps necessari per dur a terme les simulacions, aspecte que s'ha considerat des del principi del TFM com un apartat ineludible.

També s'ha pres la decisió, en la fase final de redacció de la memòria, l'eliminació del capítol de transmissió de dades, perquè els conceptes principals de broadcast i multicast, que s'hi descrivien es repetien en l'apartat dels protocols de gestió de rutes, de manera que tenint en compte el límit de pàgines de TFM i l'aportació de valor d'aquest capítol, finalment s'ha decidit d'eliminar-lo.

A pesar de les desviacions produïdes es considera que la metodologia aplicada ha estat raonablement adequada, ja que ha permès reaccionar a temps i aplicar les mesures correctores pertinents sense haver de renunciar a la confecció de cap dels dos pilars considerats bàsics del TFM amb un mínim de rigor: estudi teòric i simulació.

Línies de futur

Sense dubtes, aprofundir més en les simulacions en diferents entorn, variant més paràmetres, simulant escenaris diferents, que permetin obtenir unes conclusions més acurades i culminar-ho amb una senzilla prova pilot com la duta a terme per la Universitat de València.

El desenvolupament de rutines pròpies en ns-3 també obre un interessant camp d'aplicació.

A nivell teòric, apart de l'anàlisi de l'estàndard europeu anteriorment citat, abordar aspectes de seguretat en les xarxes VANET i aprofundir més l'apartat de protocols de gestió de rutes.

6. Glossari

ABS	Anti Blocking System.
AC	Access Categories.
AIFS	Arbitrary Inter-Frame Spacing.
AODV	Ad hoc On-demand Distance Vector routing.
BSS	Basic Service Set.
BTP	Basic Transport Protocol.
CAN	Controller Area Network.
CCH	Control CHannel.
CCHI	Control CHannel Interval.
CCW	Cooperative Collision Warning.
C-ITS	Cooperative - Intelligent Transport System.
CSMA/CA	Carrier Sence Multiple Access / Collision Avoidance.
CW	Contention Window.
DHT	Distributed Hash Table.
DSDV	Destination - Sequenced Distance Vector routing.
DSRC	Dedicated Short Range Communications.
EDCA	Enhanced Distributed Channel Access.
EIRP	Equivalent Isotropically Radiated Power.
ESP	Electronic Stability Control.
ETSI	European Telecommunication Standard Institute.
FCC	Federal Communication Commission.
FEC	Forward Error Correction.
IEEE	Institute of Electrical and Electronic Engineers.
IoT	Internet of Things.
ITS	Intelligent Transport System.
LCA	Lane Change Assistance.
LLC	Logical Link Layer.
LOS	Line Of Sight.
MID	Multi Interface Declaration.
MPDU	MAC Protocol Data Unit.
MPR	Multi Point Relays.
MSDU	MAC Service Data Unit.
NLOS	Non Line Of Sight.
NS-3	Network Simulator - 3.
OBU	On Board Unit.
OCB	Outside the Context of BSS.
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplexing.
OLSR	Optimized Link State Routing.
OSI	Open Systems Interconnection.
P2P	Peer to Peer.
PLCP	Physical Layer Convergence Procedure.
PMD	Physical Medium Dependent.

PPDU	Physical Protocol Data Unit.
PSD	Power Spectral Density.
PSID	Provider Service ID.
RFC	Request For Comments.
RREP	Route REPLY Message.
RSU	Road Side Unit.
RWP	Random WayPoint Model.
SAE	Society of Automotive Engineers.
SCH	Service Channel.
SNAP	SubNet Access Protocol.
STA	STAtion.
SUMO	Simulation of Urban Mobility.
TC	Topology Control.
TTL	Time To Live.
TXOP	Transmit Opportunity.
V2I	Vehicle To Infrastructure.
V2V	Vehicle To Vehicle.
VANET	Vehicular Ad-hoc NETworks.
VNA	Vector Network Analyzer.
WAVE	Wireless Access in Vehicular Enviroment.
WSM	Wave Short Message.
WSMP	Wave Short Message Protocol.

7. Bibliografia

7.1. Recursos web

1. **ITS International** (Abril 2010). "In-vehicle intersection violation Warning system". [Data de consulta: 12 de Juny de 2016].
<http://www.itsinternational.com/sections/nafta/features/in-vehicle-intersection-violation-warning-system/>
2. **Andrés J. Campuzano, i d'altres** (2012). "Vehicular-to-Vehicular Channel Characterization and Measurement Results". Universitat Politècnica de Valencia. [Data de consulta: 12 de Juny de 2016].
http://www.iteam.upv.es/pdf_articles/20.pdf
3. **J. Gozavez, M. Sepulcre i R. Bauz** (Maig 2012). "IEEE 802.11p Vehicle to Infrastructure Communications in Urban Environments". Universitat Miguel Hernández. [Data de consulta: 12 de Juny de 2016].
<http://www.uwicore.umh.es/V2I-measurement-campaign/>
4. **Qiong Yang, Lin Wang ; Weiwei Xia ; Yi Wu i d'altres** (3-7 Novembre 2014). "Development of on-board unit in vehicular ad-hoc network for highways". 2014 International Conference on Connected Vehicles and Expo (ICCVE). [Data de consulta: 12 de Juny de 2016].
<http://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp?arnumber=7297589>
5. **Anna Maria Vegni, Mauro Biagi i Roberto Cusani** (2013). "Smart Vehicles, Technologies and Main Applications in Vehicular Ad hoc Networks". Universitat de Roma. [Data de consulta: 12 de Juny de 2016].
<http://cdn.intechopen.com/pdfs-wm/42787.pdf>

6. **Guanglin Zhang, Youyun Xu, Xinbing Wang, Xiaohua Tian i més autors** (Maig 2012). "Multicast Capacity for VANETs with Directional Antenna and Delay Constraint". Shanghai Jiao Tong University (Xina). [Data de consulta: 12 de Juny de 2016].
http://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp?arnumber=6180103&filter%3DAND%28p_IS_Number%3A6180086%29

7. **Erik G. Ström.** (2011). "Physical layer for VANETS State of the Art and Future Challenges". Chalmers University of Technology (Suècia). [Data de consulta: 12 de Juny de 2016].
<http://www.hh.se/download/18.43aaafb313382d5f99d80001389/1341267475916/WWVC2011PHYforVANETS.pdf>

8. **Unai Hernandez-Jayo, Aboobeker Sidhik Koyamparambil Mammu i Idoia De la Iglesia** (2014). "Reliable Communication in Cooperative Ad hoc Networks". Deusto Institute of Technology. Bilbao. [Data de consulta: 12 de Juny de 2016].
<http://cdn.intechopen.com/pdfs-wm/47545.pdf>

9. **ITU-R** (Juliol 2015). "Propagation data and prediction methods for the planning of short-range outdoor radiocommunication systems and radio local area networks in the frequency range 300 MHz to 100 GHz". [Data de consulta: 12 de Juny de 2016].
https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.1411-8-201507-!!!PDF-E.pdf

10. **T. Clausen, Ed. P. Jacquet, Ed.** (Octubre 2003). "Optimized Link State Routing Protocol (OLSR)". IETF. [Data de consulta: 12 de Juny de 2016].
<https://tools.ietf.org/html/rfc3626>

11. "UM-OLSR. OLSR routing protocol in NS2". Universitat de Taiwan. [Data de consulta: 12 de Juny de 2016].

http://ant.comm.ccu.edu.tw/course/96_Network_Simulation/1_Lectures/UM-OLSR.ppt

12. **Andreas Tønnesen**, (1 d'Agost de 2004). "OLSR - core functionality". Universitat d'Oslo. [Data de consulta: 12 de Juny de 2016].
http://www.olsr.org/docs/report_html/node20.html
13. **Mohd Umar Farooq, Mohd Pasha, i Mahboob-ul-Haq Atif**. (10-11 Març 2011). "An Approach to Extended Drive Thru Accessto Internet in Multihomed Vanets". Proceedings of the 5thNational Conference; INDIACom-2011. [Data de consulta: 12 de Juny de 2016].
<http://docplayer.net/2984550-An-approach-to-extended-drive-thru-access-to-internet-in-multihomed-vanets.html>
14. **C. Perkins**. (Juliol 2003). "Ad hoc On-Demand Distance Vector (AODV) Routing". Universitat de California. [Data de consulta: 12 de Juny de 2016].
<https://www.ietf.org/rfc/rfc3561.txt>
15. **Rohde & Schwarz** (23 de Juny de 2015). "Intelligent Transportation Systems Using IEEE 802.11p". Empresa Rohde & Schwarz. [Data de consulta: 12 de Juny de 2016].
https://www.rohde-schwarz.com/in/applications/intelligent-transportation-systems-using-ieee-802.11p-application-note_56280-15747.html?rusprivacypolicy=0
16. **Byeong Gi Lee i Sunghyun Choi** (2008). "Broadband Wireless Access and Local Networks: Mobile WiMax and WiFi". [Data de consulta: 12 de Juny de 2016].
https://books.google.es/books?id=Zo5R1MBp1P4C&pg=PA356&pg=PA356&dq=PSDU&source=bl&ots=-vF8-V43G1&sig=tMfTbqrkqQBkRw_WxuCFNLCP2aA&hl=ca&sa=X&ved=0ahUKEwip3-Koy83MAhWBSxoKHVbdCZAQ6AEIWDAl%20-%20v=onepage&q&f=true#v=onepage&q=PSDU&f=false

17. **Stephan Eichler** (30 setembro – 3 outubro 2007). “Performance Evaluation of the IEEE 802.11p WAVE Communication Standard”. 2007 IEEE 66th Vehicular Technology Conference. [Data de consulta: 12 de Junho de 2016].
http://ieeexplore.ieee.org/xpl/login.jsp?tp=&arnumber=4350110&url=http%3A%2F%2Fieeexplore.ieee.org%2Fxppls%2Fabs_all.jsp%3Farnumber%3D4350110
18. **John B. Kenney** (16 de Junho de 2011). “Dedicated Short-Range Communications (DSRC) Standards in the United States”. Proceedings of the IEEE (Volume:99 , Issue: 7). [Data de consulta: 12 de Junho de 2016].
http://ieeexplore.ieee.org/xpl/login.jsp?tp=&arnumber=5888501&url=http%3A%2F%2Fieeexplore.ieee.org%2Fxppls%2Fabs_all.jsp%3Farnumber%3D5888501
19. **Thomas M. Kurihara** (2010). “IEEE Standard for Wireless Access in Vehicular Environments (WAVE)— Networking Services”. IEEE Standards Association.). [Data de consulta: 12 de Junho de 2016].
http://ieeexplore.ieee.org/xpl/login.jsp?tp=&arnumber=5680697&url=http%3A%2F%2Fieeexplore.ieee.org%2Fxppls%2Fabs_all.jsp%3Fisnumber%3D5680696%26arnumber%3D5680697
20. **Andreas Festag** (Dezembro 2014). “Cooperative Intelligent Transport Systems Standards in Europe”. IEEE Communications Magazine. [Data de consulta: 12 de Junho de 2016].
<http://ieeexplore.ieee.org/xpl/login.jsp?tp=&arnumber=6979970&url=http%3A%2F%2Fieeexplore.ieee.org%2Fiel7%2F35%2F6979940%2F06979970.pdf%3Farnumber%3D6979970>
21. **Junling Bu, Guozhen Tan, Nan Ding and Mingjian Liu** (Maio 2014). “Implementation and Evaluation of WAVE 1609.4/802.11p in ns-3”. Dalian University of Technology (China). [Data de consulta: 12 de Junho de 2016].

<http://0-dl.acm.org.cataleg.uoc.edu/citation.cfm?id=2630778&CFID=799480173&CFTOKEN=16448242>

22. **Fan Bai i Ahmed Helmy** (2005). "A survey of mobility models in Wireless Adhoc Networks". University of Southern California (Estats Units d'Amèrica). [Data de consulta: 12 de Juny de 2016].

<http://www.cise.ufl.edu/~helmy/papers/Survey-Mobility-Chapter-1.pdf>

7.2. Llibres

23. **Hannes Hartenstein, Kenneth P. Laberteaux**, "VANET: Vehicular Applications and Inter-Networking Technologies", Primera Edició. John Wiley & Sons, Chichester (UK), 2010. ISBN 978-0-470-74056-9.

