

# Simulação do uso de redes veiculares em situações de emergência numa auto-estrada Portuguesa

Jacqueline Jardim,  
Inesc-ID/IST

Teresa Vazão,  
Inesc-ID/IST

Jorge Lopes,  
Brisa Inovação

**Resumo** – As redes veiculares (a.k.a.) VANETs (*Vehicular Ad-Hoc Networks*) oferecem novas formas de aumentar a segurança rodoviária através da disseminação de informação relativa a condições de circulação adversas ou a acidentes. No entanto, a disseminação de informação crítica para a segurança e bem-estar dos condutores tem elevados requisitos de tempo e fiabilidade, uma vez que as mensagens têm que ser recebidas, atempadamente, por todos os veículos envolvidos numa situação potencialmente perigosa, de forma a assegurar que medidas adequadas são tomadas para prevenir que a situação se concretize/escale. Garantir que tais requisitos são cumpridos corresponde a um desafio considerável devido à deterioração do desempenho característico dos sistemas de comunicação sem fios. Torna-se, assim, crucial recorrer a técnicas de simulação fiável e em larga escala para validar o conceito, numa fase que antecede a implementação de tais sistemas e integração dos mesmos na indústria automóvel.

Neste artigo, é realizado um estudo de simulação realística e em larga escala de uma situação de emergência, baseado em dados reais de tráfego rodoviário recolhidos numa auto-estrada Portuguesa. Foram avaliados aspectos tais como a inclusão de unidades fixas de comunicação ao longo de um troço da auto-estrada e o desempenho da rede veicular ao notificar todos os veículos, direta- ou indiretamente, envolvidos nos diferentes cenários de acidente modelados neste mesmo troço. Após uma análise de resultados, verificou-se que, de uma forma geral, obtém-se um menor atraso na recepção da notificação de acidente quando as unidades fixas de comunicação são incluídas na infra-estrutura de rede. Esta melhoria no desempenho da rede não só permitirá com que os condutores dos veículos mais próximos do local de acidente reajam atempadamente e em segurança, como os que se encontrem mais distantes possam optar por sair da auto-estrada, de forma a evitar um eventual congestionamento de tráfego rodoviário.

**Palavras-Chave** — Acidente, Aplicações, Auto-estrada, Geocast, GPSR, I2V, Mobilidade, Modelação, Rede Veicular, Segurança Rodoviária, Simulação, RSU, VANET, Veículos, V2I, V2V.

## I. INTRODUÇÃO

O desenvolvimento de novas tecnologias de redes sem fios e a existência de sistemas embebidos de baixo custo e elevadas capacidades computacionais potenciou o aparecimento das redes veiculares, quer a nível de investigação, quer a nível de mercado. Este tipo de rede

possibilita a comunicação entre veículos (*Vehicle-to-Vehicle* – V2V) e entre estes e a infra-estrutura rodoviária (*Vehicle-to-Infrastructure* – V2I).

O principal interesse nas VANETs surge pela possibilidade de utilização de novos paradigmas de segurança rodoviária, baseados na cooperação entre as diversas entidades envolvidas na comunicação, que permitam melhorar, de forma significativa, a segurança rodoviária e promover a mobilidade sustentável. Todavia, dada a criticidade deste tipo de aplicações, são necessários estudos de simulação em ambientes de grande escala e condições tão próximas quanto possível da realidade, para que se possa verificar as potenciais vantagens da tecnologia antes de se iniciar a sua introdução nos veículos e nas infra-estruturas.

Este trabalho pretende analisar a exequibilidade do uso de redes veiculares em cenários de auto-estrada para resposta a situações de acidente. Pretendem-se avaliar três aspectos diferentes:

- O impacto do uso de *Roadside Units* (RSUs) no processo de notificação de acidente, de forma a avaliar a necessidade de investir na sua instalação.
- A capacidade de avisar atempadamente os veículos que se encontram próximos da zona de acidente, de forma a evitar choques em cadeia.
- A capacidade de avisar os veículos que se encontram longe da região acidentada, de forma a garantir que estes possam escolher uma rota alternativa, minimizando o congestionamento de tráfego.

O estudo apresentado em simulação baseia-se no caso real da auto-estrada Portuguesa A5 (Costa do Estoril), a qual interliga a capital, Lisboa, à Costa do Estoril e Cascais. Esta auto-estrada constitui umas das várias auto-estradas sob a responsabilidade da Brisa Concessão.

## II. ESTADO DA ARTE

### A. Aplicações de segurança

O desenvolvimento das redes veiculares possibilita o desenvolvimento de novos tipos de aplicações de segurança rodoviária. Estas aplicações têm por base a cooperação e partilha de informação entre os veículos e o ambiente envolvente, e têm por objectivo alertar o condutor de situações que condicionam as condições de segurança e mobilidade ao longo da viagem.

Em [1], *Toor et al*, efectua-se uma caracterização dos diversos tipos de aplicações e concluiu-se que as aplicações de segurança devem ser utilizadas essencialmente para apoiar em situações de acidente, fornecer informação em cruzamentos e evitar congestionamentos de tráfego. No entanto, são deixadas muitas opções em aberto em relação à arquitectura de protocolos e mecanismos de comunicação mais adequados.

O estudo apresentado em [2] caracteriza mais detalhadamente os tipos de aplicações de segurança rodoviária, definindo aplicações para cinco propósitos diferentes:

- Alerta para características perigosas na infra-estrutura.
- Alerta para condições anormais de circulação.
- Alerta para o perigo de colisão.
- Aviso de choque iminente.
- Notificação de acidente.

Segundo o mesmo estudo, este tipo de aplicações requer a utilização de novos mecanismos de comunicação que permitam enviar informação para um conjunto de nós não especificado: a disseminação dentro duma área geográfica (*Geocast*) e a disseminação periódica para os nós adjacentes (*Beaconing*). A comunicação *multi-hop* e o *store-and-forward* são ainda utilizados para garantir a recepção de informação por nós que se encontram fora do alcance inicial [3][4] e a correlação para reduzir o tráfego de dados, especialmente em situações de elevada densidade de veículos.

Um aspecto determinante para o desempenho destas aplicações está relacionado com a definição da abrangência do *Geocast* e com o tempo de validade da informação de segurança. Em [5], os autores estipulam como valores aceitáveis para um alcance máximo duma comunicação *Geocast* os 250 m e como limite temporal de validade da informação os 10 s. Todavia, um estudo experimental realizado no contexto do projecto Europeu *Cooperative Vehicle-Infrastructure Systems* (CVIS) com um conjunto de aplicações de segurança desenvolvidas pelo consórcio concluíram que o tempo de aviso não deveria ultrapassar os 5 s [6].

Para as aplicações destinadas a alertar os condutores sobre potenciais acidentes, existem outros factores determinantes para o seu sucesso, como sejam a precisão da localização do veículo e da previsão do seu movimento, os quais estão directamente relacionados com o período de tempo entre *beacons*. Estudos reportados em [7] demonstram que uma frequência de 5 Hz garante um desempenho adequado para este tipo de aplicações.

Estudos de desempenho sobre aplicações para evitar acidentes em cruzamentos têm sido também realizados por diversos autores, tais como [8][9]. Todavia, estes estudos não se aplicam ao cenário duma auto-estrada, dados os diferentes padrões de mobilidade e características do próprio cenário.

### B. Aplicações de segurança para situações de emergência

Uma situação potencialmente perigosa pode desencadear a transmissão de mensagens geradas por diversas aplicações

de segurança rodoviária, das quais as mais relevantes para um cenário de acidente são:

- Aviso de travagem brusca (*Emergency Electronic Brake Lights* - EEBL).
- Notificação de acidente (*Post-Crash Warning* - PCW).
- Alerta para o perigo de colisão iminente (*Cooperative Collision Warning* - CCW).

A aplicação EEBL permite que um veículo notifique os veículos à sua retaguarda quando trava subitamente. É especialmente útil em condições de fraca visibilidade, em que os veículos podem não aperceber-se, atempadamente, de que o veículo da frente travou/activou as luzes de travagem. A aplicação PCW notifica os veículos que se aproximam de um local de acidente da presença de um veículo imobilizado, devido a um acidente ou avaria mecânica. Por último, a aplicação CCW mitiga a ocorrência de colisões ao enviar informação periódica acerca da posição, velocidade, aceleração, direcção de cada veículo.

Segundo [10] e [11], estas aplicações podem ser caracterizadas de acordo com diferentes parâmetros, conforme se ilustra na Tabela I.

TABELA I  
CARACTERIZAÇÃO DE APLICAÇÕES DE SEGURANÇA RODVIÁRIA

	EEBL	PCW	CCW
<b>Modo de Comunicação</b>	Geo-broadcast	Geo-broadcast	Geo-broadcast
<b>Cardinalidade</b>	Unidirec.	Unidirec.	Unidirec.
<b>Tipo de Comunicação</b>	V2V	V2I, V2V	V2V
<b>Modo de transmissão</b>	Por evento	Por evento	Periódico
<b>Freq. mín. mensagens (Hz)</b>	~10	~1	~10
<b>Latência máxima (s)</b>	0.1	0.5	0.1
<b>Alcance (m)</b>	~300	~300	~150

## III. CARACTERIZAÇÃO DO CENÁRIO

### A. Informação geral

A auto-estrada A5 é considerada uma das rodovias mais congestionadas do país, principalmente em hora de ponta, uma vez que é um dos principais eixos de acesso à cidade de Lisboa. Nos 25 quilómetros entre Lisboa e Cascais a A5 inclui 12 intersecções com 64 ramos de acesso.

Em termos tecnológicos, a A5 é uma auto-estrada equipada com uma infra-estrutura avançada, constituída por um *backbone*, que interliga um conjunto de sensores, câmaras de videovigilância (CCTV) e painéis de mensagens variáveis (PMVs). Os postes de CCTV estão colocados, lateralmente, em locais que oferecem uma boa visibilidade e os PMVs estão colocados em pórticos sobre-elevados, perpendiculares à A5. Em qualquer dos casos, estes sistemas estão espalhados ao longo de toda a auto-estrada, sendo colocados a cerca de 6 m de altura. Existem sensores nas entradas e saídas, e sensores localizados ao longo dos diversos troços da A5. Actualmente, esta infra-estrutura é utilizada para recolher informação de tráfego, identificar situações de perigo, detectar acidentes e fornecer informações aos condutores sobre as condições de circulação. Toda a informação é centralizada no Centro de

Coordenação Operacional - CCO, que efectua a gestão de todas as auto-estradas concessionadas pelo grupo Brisa.

A diversidade de equipamento de sensorização disponível permite recolher informação de natureza diversa, tal como a intensidade e a densidade do tráfego, a classe e peso dos veículos, e a velocidade média. Esta informação é enviada e processada nos sistemas centrais para processamento estatístico e enviada, em tempo quase-real, para os PMVs.

### B. Caracterização do tráfego

Existe um registo histórico de informação de tráfego que permite modelar o tráfego de forma macroscópica [1]. Este registo contém a indicação da intensidade média de tráfego em diferentes locais, medida a cada 10 minutos. Complementarmente, existe também um registo da matriz origem-destino para cada um dos acessos da A5. Tendo por base a análise da informação registada foi possível determinar a intensidade de tráfego em diferentes troços ao longo do dia. A Tabela II resume os valores obtidos nos três troços mais representativos, em diferentes períodos do dia: o período de menor tráfego (2:00-3:00 h), o período de maior tráfego (8:00-9:00 h) e um período de tráfego médio (13:00-14:00h).

TABELA II  
INTENSIDADE DO TRÁFEGO NA A5 (VEH/H)

	2:00-3:00h	8:00-9:00h	13:00-14:00h
Cascais – Alvide	18	1076	526
Carcavelos – Oeiras	25	2571	1501
Linda-a-Velha– Miraflores	222	6300	1850

### C. Caracterização das condições de acidente

Para além do histórico de tráfego, a Brisa dispõe ainda de informação que permite identificar os locais mais propensos à ocorrência de acidentes e definir as causas mais frequentes. De acordo com dados disponibilizados pela Brisa, existem cinco zonas mais críticas.

A primeira zona ocorre no troço Cascais-Alcabideche, no sentido Cascais-Lisboa, entre as saídas 9 e 10. A causa principal de acidentes consiste na combinação de ventos fortes e excesso de velocidade, que resulta no despiste do veículo e, possivelmente, em acidente. A segunda zona situa-se junto à CREL, nas proximidades da saída 6, no sentido Lisboa-Cascais. Nesta zona, os acidentes são causados, principalmente, pela variação súbita da densidade de tráfego na curva que precede imediatamente a saída. Os condutores que se deslocam em excesso de velocidade não estão cientes da formação rápida de uma fila junto à saída e são obrigados a reduzir a velocidade bruscamente. Os dois locais seguintes situam-se próximos da saída para o Estádio Nacional: a curva apertada, aliada ao excesso de velocidade dos veículos são a principal causa de acidente. A última zona está localizada perto da saída 5, no sentido Lisboa-Cascais, em direcção a Carnaxide/Linda-A-Velha. Mais

uma vez, a principal causa de acidente é o excesso de velocidade.

Conforme se pode constatar da descrição anterior dos cinco locais identificados, a causa mais comum de acidente é o excesso de velocidade. Todavia, em certas situações, os acidentes ocorrem em condições de tráfego elevado, enquanto noutras podem ocorrer mesmo quando o tráfego é esparso. Assim sendo, é fundamental modelar a ocorrência de acidentes em diferentes condições de tráfego.

## IV. REDE VEICULAR DE SUPORTE ÀS APLICAÇÕES DE EMERGÊNCIA

### A. Arquitectura da rede veicular

Um dos aspectos fundamentais a equacionar no desenho uma rede veicular prende-se com a necessidade de utilização de unidades de comunicação fixas (RSUs), devidamente posicionadas para aumentar a abrangência da comunicação, de forma a assegurar uma melhor conectividade.

No caso da A5, já existe uma infra-estrutura de rede, pelo que é relativamente fácil encontrar locais adequados à colocação das referidas RSUs, nomeadamente os locais de melhor visibilidade, onde estão, actualmente, colocadas as câmaras de CCTV ou os PMVs. Todavia, é necessário garantir que existe uma melhoria significativa de desempenho, que justifique o investimento a realizar nas RSUs. Assim sendo, serão considerados dois cenários distintos:

- Rede veicular sem RSUs que suporta apenas comunicação Veículo-a-Veículo (V2V).
- Rede veicular com RSUs que também suporta comunicação Veículo-a-Infraestrutura (V2I/I2V).

Fig. 1 representa o caso mais completo, dum rede que contém RSUs e que permite a comunicação V2V e V2I/I2V.

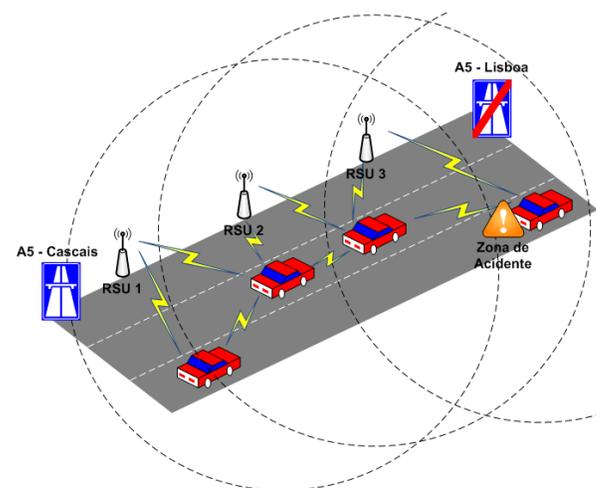


Fig. 1 – Arquitectura de rede de uma VANET

Numa situação real, os veículos e as RSUs poderão estar equipados com antenas com diferentes características, sendo aconselhável que as antenas das RSUs tenham um maior alcance e que estejam localizadas acima da altura dos

veículos de forma a evitar que estes funcionem como obstáculo à propagação do sinal [12].

### B. Arquitectura dum nó

A Fig. 2, ilustra a arquitectura para os nós da rede, que deve ser semelhante para todos os nós, e deve ser adaptável a diversos tipos de aplicações. Assim sendo, veículos e RSUs suportam um conjunto de aplicações de segurança rodoviária, sendo a informação gerada por estas aplicações disseminada dentro duma dada área geográfica com recurso a um protocolo de transporte não fiável e a um protocolo de encaminhamento geográfico: o GPSR (*Greedy Perimeter Stateless Routing*) [13]. O protocolo de encaminhamento geográfico foi modificado para suportar a comunicação dentro duma área geográfica, limitada, ou não, a um conjunto restrito de nós. Em termos de acesso ao meio e transmissão física de dados, são utilizados os protocolos implementados na norma IEEE 802.11p, na qual os sistemas WAVE (*Wireless Access in Vehicular Environments*) se baseiam.

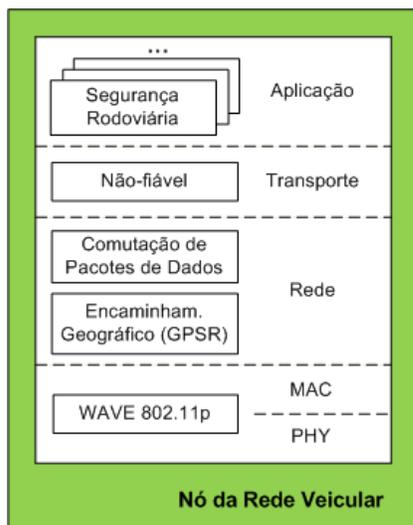


Fig. 2 – Arquitectura dum nó da rede

### C. Aplicações de emergência

Em caso de acidente, é crucial garantir que, em primeiro lugar, o acidente não escale e, em segundo lugar, evitar que se formem longas e demoradas filas de trânsito, cujas caudas também podem implicar travagens súbitas, dando origem a segundos acidentes.

Considera-se que, no instante após acidente, o veículo notifica os que se aproximam pela sua retaguarda, caso os danos causados pelo acidente não o impossibilitem. Os veículos que se aproximam do local de acidente podem encontrar-se num ponto da auto-estrada que precede uma saída, pelo que, ao receber o aviso, podem antecipar a sua saída da auto-estrada. Os veículos que se encontrem muito próximos do local de acidente, a ponto de ter que reduzir drasticamente a sua velocidade quando percebem uma aproximação perigosa ao veículo dianteiro, devem transmitir avisos de travagem súbita/risco de colisão iminente na retaguarda aos restantes veículos.

Esta modelação permitirá analisar a coexistência de diversas aplicações de segurança rodoviária e o seu impacto na comunicação num cenário de emergência.

Do ponto de vista aplicacional, é necessário suportar as três aplicações definidas na secção II.B, nomeadamente:

- **Aplicação PCW** – usada para notificar a ocorrência dum acidente. O veículo acidentado gera notificações durante um curto espaço de tempo. Estas notificações são reenviadas pelos veículos que as recebem, de forma a garantir que a informação chega rapidamente para além da zona acidentada. No entanto, de forma a evitar situações de *broadcast storm*, como as que são descritas em [14], estas notificações são reenviadas apenas da primeira vez que são recebidas através dum mecanismo simples de correlação.
- **Aplicação EEBL** – usada para avisar os veículos duma travagem brusca do veículo da frente. O veículo que trava gera mensagens durante um curto espaço de tempo, a um ritmo relativamente elevado. Estas mensagens não são reenviadas pelos veículos que as recebem.
- **Aplicação CCW** – usada para detectar situações de potencial colisão com base na informação de localização que recebe periodicamente dos seus vizinhos. As mensagens geradas por cada nó tem um carácter exclusivamente local, não sendo reenviadas para os nós que não lhe são adjacentes.

Para uma resposta eficaz a uma situação de emergência é fundamental assegurar que, apesar da coexistência de tráfego de segurança rodoviária proveniente de diferentes aplicações, é possível cumprir os requisitos estipulados anteriormente para cada uma delas, nomeadamente em termos da capacidade de notificar os veículos duma situação de acidente.

## V. MODELAÇÃO DO CENÁRIO DE ACIDENTE

### A. Caracterização do cenário de acidente

De forma a obter resultados fidedignos tentou-se reproduzir, em simulação um cenário de acidente. De entre os vários casos tipo identificados em III.C, escolheu-se o primeiro, por ser aquele onde foram reportados mais acidentes. Este local (+38° 43' 36.84", -9° 24' 20.52"), representado na Fig. 3, encontra-se localizado no troço Cascais – Alvide (sentido Cascais – Lisboa), próximo do km 22.1, numa zona em que a auto-estrada tem 3 vias. A distância entre a saída imediatamente anterior ao local de acidente (10ª saída em direcção a Cascais/Abuxarda) é de, aproximadamente, 1.2 km (marcador de local vermelho da figura). Conforme referido anteriormente, para aproveitar a infra-estrutura existente, as RSUs devem ser colocadas junto aos postes de CCTV ou junto aos PMVs (sinalizados na figura com os marcadores azuis). Contudo, uma vez que a distância entre as mesmas ronda poucas centenas de metros, não haverá necessidade de instalar RSUs em todos os locais. Optou-se assim por incluir na modelação do

cenário apenas RSUs com uma distância média entre as mesmas de cerca de 1 km (RSU 1, 2 e 3).

Conforme foi referido anteriormente, a causa mais frequente de acidentes é o excesso de velocidade. Todavia, os acidentes podem decorrer em situações de elevada intensidade de tráfego, ou mesmo em situações de baixa intensidade. Qualquer um destes cenários pode ter um forte impacto no desempenho da rede veicular, uma vez que o primeiro pode conduzir a uma sobrecarga de tráfego de dados e o segundo pode originar falta de conectividade na rede. Para melhor avaliar o impacto destes dois casos extremos, optou-se por seleccionar os valores registados para o troço de Linda-a-Velha – Miraflores para o período de maior tráfego (8:00-9:00 h) e o valor do troço Cascais-Alvide para o período de menor tráfego (2:00-3:00 h).



Fig. 3 – Troço Cascais-Alvide da auto-estrada A5

### B. Modelo de mobilidade

Para a simulação da mobilidade usou-se o simulador de mobilidade MOVE<sup>1</sup> (*Mobility Model Generator for Vehicular Networks*), uma vez que este se adequa ao cenário em estudo. Este gerador de tráfego rodoviário permite a modelação de cenários com um elevado número de nós, tendo em conta ambos aspectos de macro- e micro-mobilidade [1], e possibilita a interligação ao simulador de rede usado - o ns-3<sup>2</sup> - apresentado na secção V.C.

Tendo por base o cenário anteriormente descrito, foi definido um troço no *Map Editor* do MOVE com as características indicadas nas tabelas III e IV. De salientar que o MOVE não permite a criação de perfis complexos com curvas e desníveis, pelo que não se consegue representar a geografia do troço em questão numa forma rigorosa.

TABELA III  
CARACTERIZAÇÃO DO TROÇO CASCAIS-ALVIDE DA A5

Comprim. do troço (m)	3000 (km 22 – km 25)
Sentido do trânsito	Cascais - Lisboa
Número de vias	2/3
Limite de velocidade (km/h)	120

Para a modelação da mobilidade dos nós foi utilizado *Vehicle Movement Generator* tendo por base os valores de

intensidade de tráfego anteriormente definidos. As RSUs foram representadas com recurso a nós fixos, localizados nas coordenadas exactas dos sistemas de CCTV previamente seleccionados. O modelo de mobilidade usado pelo MOVE é do tipo *Car Following Model* [15][16], conseguindo modelar a aceleração, a travagem ou mudança de faixa em sequência da aproximação de outros veículos e a velocidade constante que permite manter a distância mínima de segurança ao veículo dianteiro. No entanto, não considera a resposta dos condutores a estímulos, o que poderia ser interessante para modelação de situações de acidente.

No modelo utilizado, no instante inicial os veículos encontram-se todos no ponto de partida, correspondente à entrada da auto-estrada. O instante de partida de cada veículo é definido aleatoriamente, seguindo uma distribuição uniforme, com valores compreendidos entre o instante inicial e o instante final da simulação (180 s). O veículo inicia a sua marcha com a velocidade máxima permitida (120 km/h). Esta é uma representação relativamente simples da realidade, uma vez que não tem em consideração a distribuição real dos instantes de partida dos veículos e do seu movimento, podendo desta forma condicionar a densidade de tráfego que se obtém e, conseqüentemente, o desempenho da rede. Todavia, os dados reais existentes não possibilitam uma caracterização mais detalhada.

TABELA IV  
LOCALIZAÇÃO DOS PONTOS MAIS RELEVANTES

	Posição Real	Posição MOVE (m)
Local acidente	km 22.075	2925
Primeira saída	km 23.230	1770
RSU 1	km 24.840	160
RSU 2	km 23.790	1210
RSU 3	km 22.600	2400

A modelação do cenário de acidente foi realizada considerando duas situações distintas: na primeira, o veículo vítima do acidente encontra-se parado, impedindo a circulação numa das faixas de rodagem; na segunda, as três faixas estão bloqueadas, uma pelo veículo acidentado e as restantes, e.g., por veículos de assistência.

### C. Modelação da rede veicular

A simulação do cenário de acidente foi realizada com recurso ao simulador de redes ns-3. A escolha deste simulador derivou do facto de ser uma ferramenta de uso livre, com grande utilização pela comunidade científica, que permite realizar simulações complexas com um nível de detalhe que permite reproduzir de forma bastante fíavel os resultados reais.

A arquitectura da rede veicular é implementada importando o ficheiro de saída do MOVE, que contém a posição de cada nó em cada instante de tempo de simulação. Nas simulações que envolvam comunicação V2I/I2V, as RSUs são nós especiais cuja coordenada de posição se mantém ao longo da simulação. A entrada dos

<sup>1</sup> MOVE - <http://lens.csie.ncku.edu.tw>

<sup>2</sup> ns-3 - <http://www.nsnam.org/>

veículos e o seu movimento é realizada de acordo com o modelo de mobilidade anteriormente descrito.

O facto do *ns-3* não dispor ainda de todos os módulos necessários à simulação de um nó com a arquitectura proposta (Fig. 2) conduziu à necessidade de efectuar adaptações ao modelo proposto anteriormente.

As aplicações anteriormente consideradas são modeladas através de geradores de tráfego CBR (*Constant Bit Rate*), com diferentes configurações de tempo entre geração de mensagens. Por uma questão de simplicidade, todas as mensagens têm o mesmo tamanho (512 bytes), o qual foi definido de forma a assegurar que a informação de segurança já se encontra incluída no pacote, seguindo as indicações definidas em [17], [18] e [19].

Conforme referido anteriormente, a informação da aplicação PCW tem de chegar rapidamente a todos os nós, o que se consegue colocando os nós receptores a reenviar a informação recebida pela primeira vez, enquanto que a informação das restantes aplicações tem um carácter local. Este comportamento foi modelado através da definição do campo *time to live* (TTL) na mensagem, que permite controlar o número de vezes que a mensagem é retransmitida. Assim sendo, para a aplicação PCW foi seleccionado um valor que permite que a mensagem seja retransmitida o número de vezes necessário que permita a sua recepção por nós que se encontrem antes da saída no instante do acidente. Este valor deve ser objecto de parametrização para os diferentes cenários que se possam considerar. De forma a respeitar os princípios funcionais definidos anteriormente, as aplicações PCW e EEBL só se iniciam quando ocorre o acidente. Os valores utilizados encontram-se representados na Tabela V.

TABELA V  
PARAMETRIZAÇÃO DOS GERADORES DE TRÁFEGO

	PCW	EEBL	CCW
<b>Tamanho das mensagens (B)</b>	512	512	512
<b>Frequência (Hz)</b>	10	10	2
<b>Destino</b>	Todos	Todos	Todos
<b>TTL</b>	64	1	1
<b>Instante de início (s)</b>	$T_{\text{acidente}}$	$T_{\text{acidente}}$	0
<b>Instante de fim (s)</b>	$T_{\text{simulação}}$	$T_{\text{simulação}}$	$T_{\text{simulação}}$

Ao nível de transporte, o modelo de simulação desenvolvido utiliza como protocolo de transporte não fiável o protocolo UDP. Ao nível do encaminhamento foi utilizado um módulo que implementa o protocolo de encaminhamento geográfico GPSR [20], com um serviço de localização semelhante ao que é usado por Karp e Kung na especificação do próprio protocolo [13].

É ao nível da camada MAC que surgem as maiores limitações, uma vez que o *ns-3* ainda não suporta o protocolo 802.11p. Desta forma, foi necessário recorrer ao módulo que implementa a comunicação 802.11 em modo *ad-hoc*. Com esta solução não existe suporte de qualidade de serviço e comutação entre canais, que são mecanismos essenciais à coexistências das aplicações de segurança com outros tipos de aplicações. O facto de não se estarem a

considerar outras aplicações para além das que se relacionam com cenários de emergência reduz fortemente o impacto desta limitação. Pode, no entanto, acontecer que, por incapacidade de se diferenciarem as várias aplicações em uso, o desempenho da aplicação mais crítica - PCW - seja afectado.

A camada física já tem suporte para a norma 802.11p, tendo sido este o modelo utilizado. Para obter resultados de simulação que se aproximem, tanto quanto possível, das condições reais, foi colocado um cuidado especial na escolha dos modelos de propagação. Optou-se pela utilização de um modelo que contabilize as perdas por atenuação do sinal com a distância (*path loss*) e outro que tem conta as perdas devido aos efeitos de dispersão do sinal (*multipath fading*). Assim sendo, usam-se, respectivamente, os modelos *Two Ray Ground Reflection* e o *Nakagami* [21], [22]. O alcance dos diversos tipos de antenas foi modelado com recurso à configuração da potência de transmissão e do ganho da antena. Os valores utilizados encontram-se representados na Tabela VI.

TABELA VI  
PARAMETRIZAÇÃO DOS MODELOS DE PROPAGAÇÃO E DAS ANTENAS

		Veículo	RSU
<b>Modelo Nakagami</b>	<b>Nakagami m-factor</b>	<b>m0</b>	1.5
		<b>m1</b>	0.75
		<b>m2</b>	0.5
<b>Modelo Two Ray Ground</b>	<b>Altura (m)</b>	1.7	6.3
<b>Antenas</b>	<b>Potência de transmissão (dBm)</b>	5	18
	<b>Ganho (dBi)</b>	2	9

## VI. RESULTADOS OBTIDOS

### A. Cenário de teste

Os testes realizados destinam-se a avaliar se os requisitos da aplicação mais crítica (PCW) conseguem ser garantidos, tendo em consideração que existe tráfego proveniente de outras aplicações de segurança em circulação. Esta avaliação foi realizada em vários cenários diferentes:

- Comunicação com e sem RSU.
- Bloqueio de uma ou das três vias.
- Tráfego com baixa e elevada intensidade.

### B. Métricas de avaliação

Para aferir o desempenho da aplicação PCW foram estipuladas métricas de nível de aplicação e de nível de rede.

Do ponto de vista da aplicação, foram definidas as seguintes métricas:

- **Taxa de Aviso** – percentagem de veículos em circulação que receberam a notificação de acidente.
- **Taxa de Aviso Útil** – percentagem de veículos em circulação que receberam a notificação do acidente dentro dos limites de latência e alcance característicos da aplicação PCW.

- **Latência de Notificação** – tempo que decorre desde que o acidente ocorre até que o veículo é notificado.
- **Posição de Notificação** – posição do nó quando recebe a notificação de acidente, medida em relação à coordenada de entrada.

Ao nível da rede, as métricas consideradas foram:

- **Número de hops** – número de nós usados para retransmitir a mensagem.

### C. Resultados obtidos – caso geral

A informação de cada veículo no instante de notificação do acidente é representada através dum conjunto de gráficos do tipo XY, nos quais coordenada X descreve a Latência da Notificação e a coordenada Y a Posição de Notificação.

Ambas, Fig. 4 e Fig. 5 ilustram os valores obtidos na situação de baixa intensidade veicular, e a Fig. 6 e Fig. 7 no caso em que a intensidade é elevada.

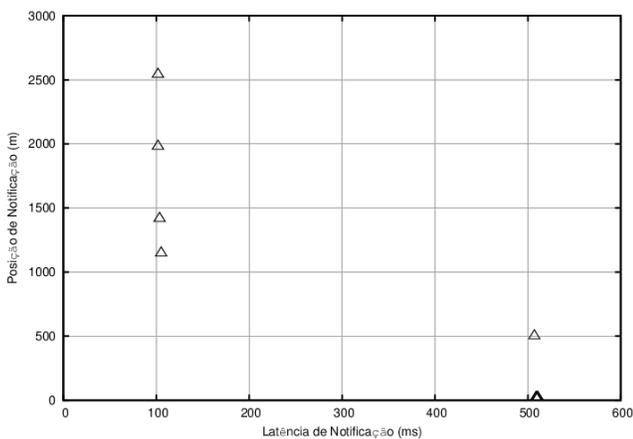


Fig. 4 – Baixa intensidade veicular; Comunicação V2V; 1 via bloqueada

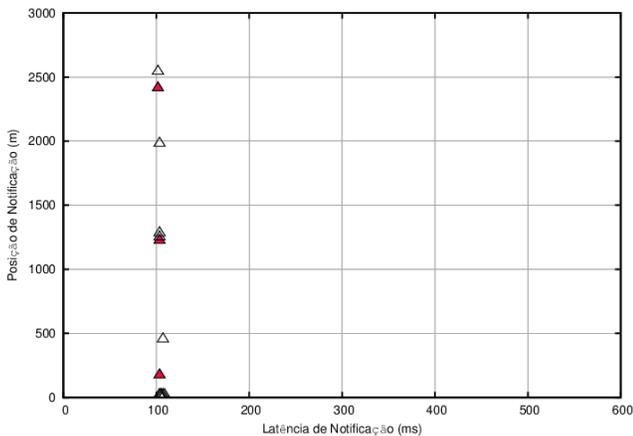


Fig. 5 – Baixa intensidade veicular; Comunicação V2I; 1 via bloqueada

À exceção dos veículos que se encontram mais distantes do acidente, em situação de baixa intensidade de tráfego com comunicação V2V, a maioria dos veículos recebe a notificação muito rapidamente, sendo a Latência de Notificação da ordem dos 100 ms. No entanto, os veículos mais distantes têm latências mais elevadas (cerca de 500 ms), embora consigam ser avisados quando ainda se

encontram longe do local do sinistro. Como se pode observar na Fig. 5, a existência de RSUs (pontos ilustrados a vermelho) vem permitir reduzir o valor da latência para os veículos mais distantes.

Quando a intensidade do tráfego é elevada verifica-se uma maior variação das condições de notificação que se traduz, essencialmente, numa maior dispersão da Posição de Notificação. Relativamente à Latência de Notificação, embora se verifiquem variações de valor, a latência máxima observada é bastante inferior (cerca de 135 ms), uma vez que existem mais veículos capazes de retransmitir a notificação. A existência de RSUs permite que mais nós recebam a notificação mais rapidamente, o que é visível pela maior concentração de pontos junto ao eixo dos Y. Verifica-se ainda que o número de nós distantes que recebem a notificação mais cedo aumenta. Esta situação é particularmente evidente para o caso da RSU 2 ( $Y \approx 1210$  m), conforme se pode confirmar por observação da Fig. 7.

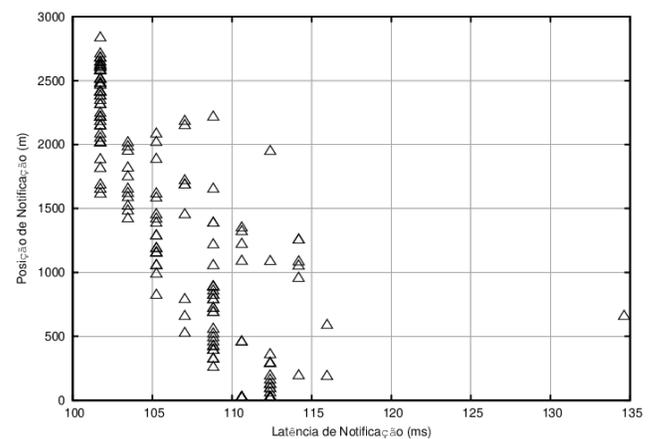


Fig. 6 – Elevada intensidade veicular; Comunicação V2V; 1 via bloqueada

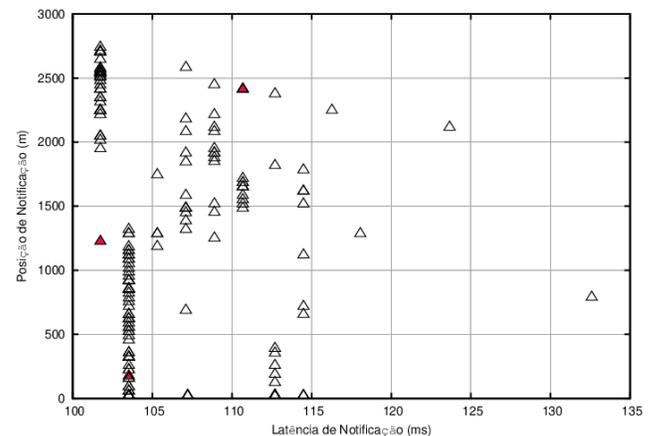


Fig. 7 – Elevada intensidade veicular; Comunicação V2I; 1 via bloqueada

Os resultados apresentados na Fig. 8 e Fig. 9 ilustram o histograma do número de hops utilizado e confirmam as conclusões anteriores. O uso de RSUs reduz o número de hops da comunicação, o que permite reduzir a Latência de Notificação, uma vez que a RSU têm um maior alcance e possibilita a transmissão de informação para nós distantes mais rapidamente.

#### D. Resultados obtidos – condições pós-acidente

Com base na informação recebida pode-se também avaliar em que medida a notificação permitiria aos condutores reagir atempadamente à situação de acidente. Existem duas situações diferentes que devem ser consideradas:

- Os condutores que se encontram na zona do acidente e que têm de ser avisados rapidamente, a fim de reagirem a tempo de evitar acidentes secundários.
- Os condutores que se encontram em rota para a zona do acidente mas ainda a tempo de receber o alerta de forma a poderem desviar-se, seguindo um percurso alternativo, evitando congestionamento.

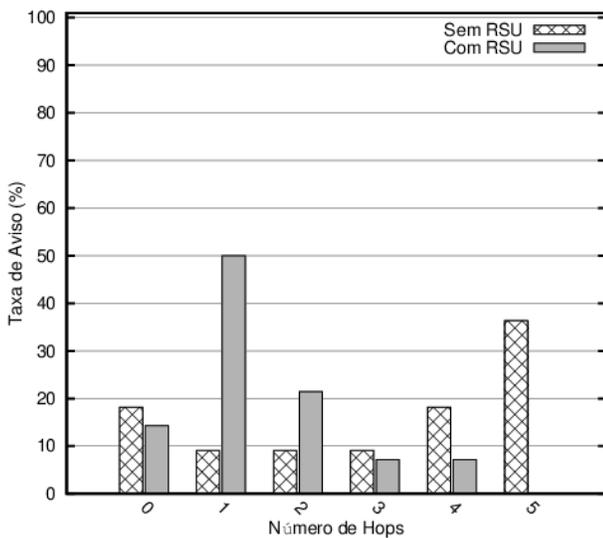


Fig. 8 – Baixa intensidade veicular; Comunicação V2V e V2I; 1 via bloqueada

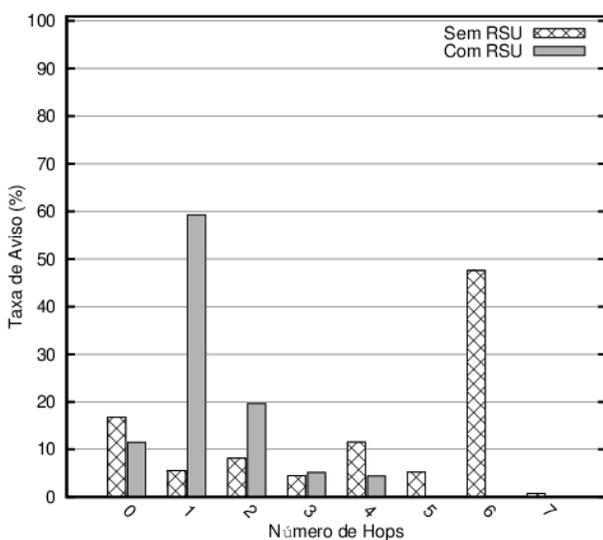


Fig. 9 – Elevada intensidade veicular; Comunicação V2V e V2I; 1 via bloqueada

Tendo por base estas premissas, foi medida a Taxa de Aviso, a Taxa de Aviso Útil e a Latência de Notificação

quer para o caso geral, quer para cada uma das situações anteriormente identificadas. A Tabela VII apresenta os resultados obtidos para cada uma destas métricas.

Neste estudo considerou-se que, no caso geral e no caso dos nós antes da saída, o aviso só era útil se chegasse antes dos 500 ms, enquanto que, para os nós na região de acidente, o valor máximo aceitável era de 105 ms (o valor de latência definido para a aplicação EEBL com uma margem de 5%).

TABELA VII  
RESULTADOS PARA AS DIFERENTES CONDIÇÕES PÓS-ACIDENTE

Estadísticas globais	Total	Antes da saída	Zona de acidente
Taxa de Aviso	100%	100%	100%
Taxa de Aviso Útil	100%	100%	86%
Latência de Notificação Mínima (ms)	101,73	101,73	101,73
Latência de Notificação Média (ms)	106,08	106,26	103,19
Latencia de Notificação Máxima (ms)	132,59	132,59	110,68

#### VII. CONCLUSÕES DE TRABALHO FUTURO

No presente trabalho, procedeu-se à análise do desempenho das redes veiculares em auto-estrada, tendo em conta aspectos tais como a viabilidade da colocação de RSUs ao longo da infra-estrutura, o seu impacto neste mesmo desempenho e a capacidade de possibilitar a recepção atempada de avisos referentes a situações de emergência, de forma a minimizar segundas colisões e mitigar o congestionamento de tráfego. Procedeu-se à análise dos diferentes aspectos recorrendo à modelação e simulação da mobilidade e comunicação entre veículos e, adicionalmente, entre veículos e infra-estrutura rodoviária – as RSUs.

Os resultados obtidos permitem concluir que o uso de RSUs permite melhorar o desempenho das aplicações de segurança rodoviária, na medida em que reduz a latência na recepção de informação. Da análise dos mesmos dados é ainda possível concluir que não é necessário instalar as referidas RSUs em todos os locais onde actualmente existem postes de CCTV ou PMVs, o que terá vantagens significativas em termos de custo.

Dos resultados numa fase pós-acidente, referentes às condições de elevada intensidade, com três vias bloqueadas e inclusão de RSUs, verifica-se que os veículos que se encontram longe da zona de acidente, num ponto que antecede uma saída são todos avisados em tempo útil, i.e., antes dos 500 ms. Dos veículos que se encontram na zona de acidente, i.e., dentro do raio máximo de alcance de 300 m, todos receberam a notificação, porém, apenas cerca de 86% dos mesmos recebeu dentro do limite de latência, i.e., dos 105ms. No entanto, considerando os 500ms da aplicação PCW, verifica-se que todos os nós em estudo receberam a notificação com sucesso, com uma latência abaixo deste valor.

Como trabalho futuro pretende-se avaliar esta situação num protótipo experimental, de pequena escala, que permita avaliar em que medida os resultados obtidos por simulação são representativos da situação real. Este estudo permitirá determinar a importância de aspectos que não se conseguem modelar em simulação, tais como: presença de obstáculos na auto-estrada, a própria geometria real da auto-estrada (desníveis, pontes, curvas entre outros...).

#### AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi financiado por fundos nacionais através da FCT – Fundação para a Ciência e a Tecnologia, no âmbito do projecto PEst-OE/EEI/LA0021/2011.

#### REFERÊNCIAS

- [1] Yasser Toor, Paul Muhlethaler, Anis Laouiti and Arnaud de la Fortelle. “Vehicular Ad-hoc Networks: Applications and Related Technical Issues”. *IEEE Communication Surveys*. Vol. 10. N. 3, 2008
- [2] Elmar Schoch, Frank Kargl, and Michael Weber, Tim Leinmüller “Communication Patterns in VANETs”. *IEEE Communications Magazine*, November 2008
- [3] Ch. Maihöfer, T. Leinmüller, and E. Schoch, “Abiding Geocast: Time-Stable Geocast for Ad Hoc Networks,” *VANET '05*, 2005, pp. 20–29.
- [4] T. Kosch et al., “The Scalability Problem of Vehicular Ad Hoc Networks and How to Solve It,” *IEEE Wireless Commun.*, vol. 13, no. 5, Oct. 2006, pp. 22–28
- [5] Fan Bai and Bhaskar Krishnamachari. “Exploiting the Wisdom of Crowd: Localized, Distributed, Information-centric VANET”. *IEEE Communications Magazine*, May 2010
- [6] Steve PECHBERTI, Dominique GRUYER, Denis GINGRAS and Francis DUPIN, “Design of a Modular Demonstrator for Safety Application Systems: the CVIS Project”. 2010 IEEE Intelligent Vehicles Symposium University of California, San Diego, CA, USA, June 21-24, 2010
- [7] Jihua Huang and Han-Shue Tan. Impact of communication reliability on a cooperative collision warning system. In *Intelligent Transportation Systems Conference, 2007. ITSC 2007. IEEE*, pages 355–360, Sep. 30-Oct. 3 2007.
- [8] Steven E. Shladover. Effects of traffic density on communication requirements for cooperative intersection collision avoidance systems (CICAS). Technical Report UCB-ITS-PWP-2005-1, Institute of Transportation Studies, University of California, Berkeley, March 2005.
- [9] Jason J. Haas and Yih-Chun Hu. “Communication Requirements for Crash Avoidance”. *VANET'10*, September 24, Chicago, Illinois, USA, 2010
- [10] U.S. Department of Transportation (U.S. DOT) NHTSA. (2005). “Vehicle Safety Communications Project Task 3 Final Report – Identify Intelligent Vehicle Safety Applications Enabled by DSRC”.
- [11] Bai, F., Krishnan, H., and Sadekar, V. (2006). “Towards Characterizing and Classifying Communication-based Automotive Applications from a Wireless Networking Perspective”. In *Proceedings of IEEE Workshop on Automotive Networking and Applications (AutoNet)*.
- [12] Experimental Study on the Impact of Vehicular Obstructions in VANETs. Rui Meireles<sup>1,3</sup>, Mate Boban<sup>2,3</sup>, Peter Steenkiste<sup>1</sup>, Ozan Tonguz<sup>2</sup> and João Barros<sup>3</sup> [frui@cmu.edu](mailto:frui@cmu.edu), [mboban@cmu.edu](mailto:mboban@cmu.edu), [prs@cs.cmu.edu](mailto:prs@cs.cmu.edu), [tonguz@ece.cmu.edu](mailto:tonguz@ece.cmu.edu), [jbarros@fe.up.pt](mailto:jbarros@fe.up.pt)  
<sup>1</sup>Department of Computer Science, Carnegie Mellon University, USA <sup>2</sup>Department of Electrical and Computer Engineering, Carnegie Mellon University, USA <sup>3</sup>Instituto de Telecomunicações, FEUP DEEC, University of Porto, Portugal, *IEEE vehicular networking conference*.
- [13] Karp, B., and Kung, H. T. (2000). “GPSR: Greedy Perimeter Stateless Routing for Wireless Networks”. *MobiCom 2000* (p. 243--254).
- [14] S.-Y. Ni, Y.-C. Tseng, Y.-S. Chen, and J.-P. Sheu, “The broadcast storm problem in a mobile ad hoc network,” in *Proceedings of the 5<sup>th</sup> annual ACM/IEEE international conference on Mobile computing and networking*, Seattle, WA, USA, August 1999, pp. 151–162.
- [15] Jérôme Harri, Fethi Filali, and Christian Bonnet. “Mobility Models for Vehicular Ad Hoc Networks: A Survey and Taxonomy”. *IEEE Communications Surveys and Tutorials*. Vol. 11, No. 4, 2
- [16] Stefan Krauss, Peter Wagner, Christian Gawron, “Metastable States in a Microscopic Model of Traffic Flow” *Physical Review E*, volume 55, number 304, pages 55-97; May, 1997.
- [17] Schmidt-Eisenlohr, F.; Torrent-Moreno, M.; Mittag, J.; Hartenstein, H.; , “Simulation platform for inter-vehicle communications and analysis of periodic information exchange”. *Wireless on Demand Network Systems and Services, 2007. WONS '07. Fourth Annual Conference on* , vol., no., pp.50-58, 24-26 Jan. 2007
- [18] Raya, M., and Hubaux, J.-pierre. (2005). “The Security of Vehicular Ad Hoc Networks”. *SASN '05 Proceedings of the 3rd ACM workshop on Security of ad hoc and sensor networks* (p. 11--21). New York, New York, USA: ACM Press.
- [19] Petit, J.; Mammeri, Z.; , “Analysis of authentication overhead in vehicular networks,” *Wireless and Mobile Networking Conference (WMNC), 2010 Third Joint IFIP* , vol., no., pp.1-6, 13-15 Oct. 2010
- [20] Fonseca, A., Camões, A., and Vazão, T. (2012). Geographical routing implementation in NS3. *WNS3 2012* (p. 364--369).
- [21] Killat, M., Rössel, C., Schmidt-eisenlohr, F., Vortisch, P., & Busch, F. (2007). Enabling Efficient and Accurate Large-Scale Simulations of VANETs for Vehicular Traffic Management. *VANET '07 Proceedings of the fourth ACM international workshop on Vehicular ad hoc networks* (pp. 29-38). New York, New York, USA: ACM Press.
- [22] V. Taliwal, D. Jiang, H. Mangold, C. Chen, and R. Sengupta, “Empirical determination of channel characteristics for DSRC vehicle-to-vehicle communication,” in *Proc. 1st ACM Int. Workshop on Vehicular Ad Hoc Networks (VANET)*, Philadelphia, PA, USA, p. 88, Oct. 2004.
- [23] Z. J. Haas, J. Y. Halpern, and L. Li, “Gossip-Based Ad Hoc Routing,” *IEEE/ACM Trans. Networking*, vol. 14, no. 3, 2006, pp. 479–91.
- [24] Grau, G.P.; Pusceddu, D.; Rea, S.; Brickley, O.; Koubek, M.; Pesch, D.; , “Vehicle-2-vehicle communication channel evaluation using the CVIS platform”, *Communication Systems Networks and Digital Signal Processing (CSNDSP), 2010 7th International Symposium on* , vol., no., pp.449-453, 21-23 July 2010