

# Uma Análise de Desempenho do Wi-Fi Direct para Comunicações Veículo-Pedestre

Thales T. Almeida<sup>1,2</sup>, José Geraldo R. Júnior<sup>1,2</sup>,  
Miguel Elias M. Campista<sup>1</sup> e Luís Henrique M. K. Costa<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ) – PEE/COPPE/GTA

<sup>2</sup> Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais (CEFET-MG)

**Resumo.** *O alto custo dos dispositivos, associado à inexistência de um padrão universal, tem freado a implantação de VANETs baseadas no IEEE 802.11p, especialmente em países de baixa ou média renda. Neste sentido, sistemas baseados no Wi-Fi Direct têm se mostrado uma alternativa, tanto pelo seu potencial em integrar pedestres e ciclistas à VANET – não factível com o 802.11p devido à exigência de hardware compatível – quanto por permitir a adoção imediata destas redes baseado na alta penetração de smartphones. Com o objetivo de investigar a capacidade do Wi-Fi Direct em oferecer conectividade no ambiente veicular, este trabalho realiza uma análise de desempenho com base nos requisitos de uma aplicação de segurança. Em cenários com comunicação V2P, com e sem linha de visada, experimentos utilizando smartphones foram realizados a fim de avaliar o alcance da comunicação, a taxa de entrega e o tempo entre recepções de pacotes. O impacto de diferentes velocidades do veículo também foi avaliado. Os resultados indicam que, apesar das limitações, o Wi-Fi Direct tem potencial para servir como alternativa ao 802.11p em aplicações V2P.*

## 1. Introdução

O número cada vez maior de veículos nas ruas, associado ao aumento constante no número de acidentes de trânsito, afeta importantes áreas como saúde pública e economia. Um relatório produzido pela OMS (Organização Mundial da Saúde) em 2018 aponta que, a cada ano, cerca de 1,35 milhão de pessoas morrem como resultado de lesões causadas por acidentes de trânsito [World Health Organization 2019]. Este problema é ainda mais grave em países de baixa e média renda. Mesmo concentrando 60% da frota terrestre, estes países respondem por mais de 90% das fatalidades. Para ilustrar, somente em 2015, mais de 38 mil pessoas perderam a vida em decorrência de acidentes de trânsito no Brasil.

Uma vez que aumentar a infraestrutura viária no mesmo ritmo que aumenta a frota de veículos é inviável, a pesquisa envolvendo VANETs (*Vehicular Ad-hoc NETWORKS*) tem se tornado cada vez mais atrativa. Em 1999, a americana FCC (*Federal Communications Commission*) alocou uma banda de 75 MHz na faixa de 5,9 GHz para comunicações veiculares, o que permitiu o desenvolvimento, em 2010, do padrão IEEE 802.11p. Por meio de OBUs (*On-Board Units*), instaladas nos veículos, e RSUs (*Road-Side Units*), instaladas nas vias, é possível aumentar a segurança no trânsito através da troca de mensagens CAMs (*Cooperative Awareness Messages*) ou DENs (*Decentralized Environmental Notifications*), que permitem propagar o estado do ambiente e situações de emergência.

Apesar de ter sido projetado para VANETs, o 802.11p tem demonstrado grande dificuldade de implantação no mundo real [Miucic and Bai 2011]. Isto se deve, principalmente, ao alto custo dos dispositivos compatíveis, à falta de um padrão de comunicação

universal (há diferenças entre o padrão europeu, japonês e americano), bem como à falta de aplicações que atraiam o interesse dos condutores. Como o 802.11p requer que os veículos sejam equipados com *hardware* dedicado, um grande investimento inicial necessário [Balasundram et al. 2016]. Este cenário dificulta a penetração em países de baixa e média renda, e leva à busca por métodos alternativos de comunicação entre veículos.

De acordo com [Statista 2019], 44,9% da população mundial terá um *smartphone* em 2020. Dado este poder de penetração, tecnologias de rede embarcadas nestes dispositivos são vistas como uma alternativa ao 802.11p, capazes de permitir a adoção imediata de VANETs e a integração pedestres e ciclistas ao contexto veicular. Com estas tecnologias, é possível compartilhar dados coletados por sensores (como posição e velocidade), e prever, por exemplo, a colisão entre veículos portando um *smartphone* (como uma OBU no 802.11p). São muitas as tecnologias que permitem tal compartilhamento, como NFC (*Near Field Communication*), BLE (*Bluetooth Low Energy*), redes 4G/5G e Wi-Fi Direct. Introduzido em 2010 pela Wi-Fi Alliance<sup>1</sup>, o Wi-Fi Direct possui o melhor benefício.

Enquanto o NFC não é cogitado dado o seu alcance de 10 cm [Jeong et al. 2016], e o BLE é capaz de enviar dados a até 100 m [Frank et al. 2014], o Wi-Fi Direct possui alcance teórico de 200 m [Khan et al. 2017]. Embora inferior ao 802.11p (1.000 m), o alcance de 200 m do Wi-Fi Direct é capaz de suportar algumas aplicações de segurança, como alerta de ponto cego e de mudança de faixa, que atuam dentro de 100 m de cobertura [Jeong et al. 2019]. Além disso, enquanto o BLE suporta 1 Mbps [Touati et al. 2013], no Wi-Fi Direct é possível transmitir dados à taxa de 250 Mbps, nove vezes superior à taxa máxima do 802.11p (27 Mbps). Ademais, o atraso fim-a-fim no Wi-Fi Direct é inferior ao do 4G [Jeong et al. 2019], que não atende aos requisitos de aplicações de segurança [Park et al. 2014]. Apesar do potencial, não há estimativas de quando o 5G entrará em operação. Já o Wi-Fi Direct está presente na maioria dos *smartphones*. Isto possibilita a imediata adoção das VANETs, algo que não se projeta com o 802.11p e 5G. Por fim, dado o tamanho mínimo (50 B) de uma BSM (*Basic Safety Message*) e frequência de transmissão (10 Hz) de aplicações de segurança, uma carga de 1,72 MB/hora seria gerada. Em redes celulares, o custo para o usuário e a sobrecarga da rede devem ser considerados.

A principal desvantagem do Wi-Fi Direct diz respeito ao longo tempo para estabelecimento da conexão, compreendida de duas etapas [Khan et al. 2017]: (1) descoberta de pares; e (2) formação do grupo. Na descoberta de pares, o objetivo é detectar a presença de outros nós. Isto é feito em duas fases: *Scan* e *Find*. Durante o *Scan*, o nó sensoria todos os canais em busca de outros nós ou grupos. Após esta fase, se inicia a fase de *Find*, que é dividida entre *Search* e *Listen*. Durante o *Search*, são transmitidos quadros de requisição nos canais 1, 6 e 11. Já durante o *Listen*, o nó seleciona um destes canais à espera destes mesmos quadros. Uma conexão é realizada se dois nós sincronizam em um mesmo canal. Após a descoberta, os nós podem formar um grupo equivalente a um BSS (*Basic Service Set*). No Wi-Fi Direct, três grupos podem ser formados: (1) *Standard*, onde há uma negociação entre os nós sobre qual deles será o GO (*Group Owner*), semelhante ao ponto de acesso; (2) *Autonomous*, onde um nó se anuncia como GO através de *beacons*; e (3) *Persistent*, que permite reativar um grupo que já existiu. Antes de trocar de dados, uma conexão segura precisa ser estabelecida através do WPS (*Wi-Fi Protected Setup*).

---

<sup>1</sup><https://www.wi-fi.org/wi-fi-direct>

Conforme [Camps-Mur et al. 2013], o tempo para estabelecer a conexão pode ser de 15 s. Muitos trabalhos visam reduzir este tempo [Zhang et al. 2014, Chaki et al. 2015, Sun et al. 2016]. Entretanto, para o uso em VANETs, é necessário avaliar, a priori, a capacidade da rede de disseminar dados a partir da avaliação de diferentes métricas. Como o Wi-Fi Direct é projetado para ambientes estacionários [Jeong et al. 2019], é preciso analisar seu desempenho sob condições de mobilidade, investigando, por exemplo, se a velocidade dos veículos impacta as transmissões devido ao deslocamento Doppler. Caso esta análise indique que o Wi-Fi Direct não obtém bom desempenho em VANETs, qualquer esforço para reduzir o tempo de estabelecimento da conexão se mostrará dispensável.

Com base nesta premissa, este trabalho investiga a capacidade do Wi-Fi Direct em atender aos requisitos de operação de uma aplicação de segurança no ambiente veicular. Baseado na troca periódica de BSMs entre um veículo e um pedestre (V2P - *Vehicle-To-Pedestrian*), são analisados os resultados de medições reais usando *smartphones* comerciais. Em cenários com e sem linha de visada (LoS - *Line-of-Sight* e NLoS - *Non-Line-of-Sight*), são avaliados o alcance máximo da comunicação, a PDR (*Packet Delivery Rate*) e o PIR (*Packet Inter-Reception time*). O impacto de diferentes velocidades empregadas pelo veículo também foi investigado. De acordo com nosso conhecimento, este é o primeiro estudo que analisa o uso do Wi-Fi Direct em VANETs por meio de experimentos de campo em cenários com condições de LoS e NLoS, e altas velocidades relativas.

O restante deste artigo possui a seguinte estrutura: a Seção 2 apresenta os trabalhos relacionados. Na Seção 3 são apresentados os cenários dos experimentos reais, além dos detalhes de implementação e configuração. A Seção 4 disserta sobre os resultados dos experimentos. Por fim, a Seção 5 conclui o artigo e apresenta os trabalhos futuros.

## 2. Trabalhos Relacionados

Como mencionado na Seção 1, muitos trabalhos envolvendo o Wi-Fi Direct são propostos com o objetivo de reduzir o tempo para estabelecimento da conexão. Em menor número, alguns possuem como foco a análise do comportamento do Wi-Fi Direct em VANETs.

Em [Camps-Mur et al. 2013], os autores apresentam a primeira análise de desempenho do Wi-Fi Direct por meio de experimentos reais e simulações no NS-3. O objetivo é analisar o atraso na formação dos três grupos do Wi-Fi Direct e comparar estes resultados com os obtidos no Wi-Fi tradicional. Os resultados indicam que o atraso para descoberta no modo *Standard* e *Persistent* são similares, e que o modo *Autonomous* obtém o menor atraso. Quanto ao atraso para formação do grupo, o modo *Persistent* obteve o melhor resultado. O atraso de formação dos grupos *Standard*, *Autonomous* e *Persistent* foram, respectivamente, <9 s, 5 s e 8 s. Por não considerar interferência, as simulações não refletiram os experimentos reais. Além disso, o NS-3 não possui módulos do Wi-Fi Direct. Os autores não mencionam nenhuma adaptação deste módulo.

Os autores em [Su et al. 2012] propõem um dos primeiros trabalhos a considerar o Wi-Fi Direct em VANETs. Entretanto, devido ao atraso gerado pelo aceite do usuário à conexão, os autores decidiram por implementar o modo *Ad hoc* nos dispositivos. Ao contrário do Wi-Fi Direct, por segurança o modo *Ad hoc* não é suportado nos *smartphones*, a menos que seja habilitado o *root*. Por meio de experimentos reais, os autores avaliaram o alcance máximo da comunicação e o atraso de transmissão. O alcance foi medido com os *smartphones* dentro e fora dos veículos, com e sem movimento. Os resultados

indicam que o alcance, com os dispositivos fora do veículo, foi de 200 m. Dentro dos veículos imóveis, o alcance caiu para 100 m com as janelas abertas e 50 m com as janelas fechadas. O movimento dos veículos (45 km/h e 90 km/h) não impactou os resultados. Porém, nos testes de velocidade não foram usados os mesmos veículos, o que pode levar a diferenças nos resultados. Por fim, o atraso médio de transmissão foi de cerca de 30 ms.

Em [Jeong et al. 2016], com foco na redução do atraso para descoberta, os autores combinam o Wi-Fi Direct com redes 4G visando a operação de aplicações de segurança em VANETs. Um servidor é responsável por instruir, através do 4G, quando os dispositivos devem estabelecer conexões via Wi-Fi Direct. Cada dispositivo envia ao servidor, através da rede 4G, sua posição geográfica e velocidade. O servidor monitora a distância entre os nós e, sempre que a mesma for inferior a 200 m, envia uma solicitação para que os nós formem um grupo de comunicação. Após esta etapa, e a consequente escolha do GO pelo servidor, a troca de dados pode ser realizada via Wi-Fi Direct. A avaliação foi realizada com veículos a 20 km/h e 30 km/h, e contendo *smartphones* em seu interior. Os resultados indicam que o tempo de descoberta caiu de 1,5 s para 100 ms. No cenário que demonstra a desconexão do GO, o tempo para descoberta caiu de 3 s para 200 ms. Os autores, porém, não consideraram o atraso com o provisionamento WPS, que permaneceu alto em todos os cenários. Além disso, nenhuma análise da PDR com relação à velocidade do veículo, impacto de condições NLoS, entre outros, foi realizada.

Em [Manamperi et al. 2018], visando reduzir o atraso de transmissão e impulsionar o Wi-Fi Direct em VANETs, os autores propõem uma transmissão *broadcast* entre o GO e os clientes, substituindo o modelo P2P (*Peer-To-Peer*). Na proposta, o GO recebe os quadros enviados pelos clientes e agrega em um quadro único, enviado a todos os clientes. A avaliação foi realizada no simulador INET, onde o IEEE 802.11b foi adaptado para simular o Wi-Fi Direct, considerando a taxa de 6 Mbps, frequência de 2,4 GHz e mensagens transmitidas a 5 Hz. O alcance foi definido em 250 m. A avaliação contou com veículos a 80 km/h e 120 km/h. Os resultados indicam que, sem ACKs e retransmissões, o atraso médio total foi reduzido em comparação à comunicação tradicional, apesar do aumento do número de clientes levar a uma redução da taxa de recepção. Além de alguns parâmetros da simulação serem pouco realísticos (como o expoente de perda do modelo de propagação), o uso do 802.11b pode não refletir o funcionamento do Wi-Fi Direct.

Usando o módulo do IEEE 802.11a, em [Balasundram et al. 2016] os autores avaliam o Wi-Fi Direct por meio de simulações no o NS-3, onde a vazão, o atraso fim-a-fim e a PDR são comparadas com as obtidas no 802.11p. Dois cenários de transmissão são considerados: (1) um salto, realizada por dois veículos com destino a uma RSU; (2) múltiplos saltos, entre veículos de diferentes *clusters*. Com relação à PDR, os resultados indicam, no Wi-Fi Direct, um aumento da perda com o aumento da distância, acentuada a partir de 150 m. Apesar disso, é possível ter comunicação até 300 m. Este resultado conflita com o alcance máximo teórico do Wi-Fi Direct (200 m), e pode estar associado ao uso do 802.11a. Com relação à vazão, o mesmo comportamento de queda foi observado. Na transmissão por múltiplos saltos, a média do atraso fim-a-fim foi superior no Wi-Fi Direct em comparação ao 802.11p, ao passo que a média da PDR foi inferior. Por fim, a velocidade do veículo não influencia a PDR, já que os modelos de propagação não consideram a mobilidade. Além disso, o atraso para formação de grupos foi ignorado.

Em [Shahin and Younis 2015], os autores propõem incorporar uma mensagem de

alerta no quadro do mecanismo opcional de descoberta de serviços do Wi-Fi Direct. Na proposta, não é necessário estar em um grupo para transmitir dados. Nós interessados em receber alertas enviam um quadro de requisição ao nó com alertas armazenados, que os transmite após receber o quadro. A proposta também permite reencaminhar alertas, controlando a inundação por meio de um TTL (*Time-To-Live*). Implementado em dispositivos reais, os alertas são baseados na posição geográfica obtida a partir da interação do usuário com um mapa. Testes de validação foram realizados, enquanto que a certificação do protocolo em condições reais não foi descrita pelos autores. Apesar de evitar o atraso na formação de grupos, o modelo *publish/subscribe*, onde alertas só são enviados após requisição, não é adequado para aplicações de segurança, já que a falta de envio periódico das BSMs prejudica a consciência situacional e aumenta o risco de colisões.

Com foco em avaliar o comportamento do Wi-Fi Direct em suportar aplicações de segurança, em [Won et al. 2018] os autores propõem um sistema para monitorar o risco de colisões envolvendo veículos e pedestres. Além de propagar alertas, o sistema estabelece mecanismos para aumento da precisão do GPS, economia de energia e detecção de sinais de distração do pedestre baseado no uso do *smartphone*. Após detectar uma visualização de tela enquanto o pedestre caminha junto à faixa, o sistema cria um grupo *Autonomous* entre o pedestre (GO) e os veículos. Os dispositivos trocam mensagens contendo o tempo para que o pedestre e o veículo alcancem o cruzamento. Com base na recepção da mensagem pelo pedestre, o algoritmo calcula a probabilidade de colisão, e um alerta é enviado. Na avaliação, os autores desconsideram o tempo para estabelecimento da conexão. Além disso, para permitir a comunicação NxN no Wi-Fi Direct, foi proposta uma estratégia baseada na inclusão de um novo pedestre a um grupo já criado, com a comunicação do novo membro intermediada pelo GO. Os autores analisaram o alcance da comunicação (LoS) com base na PDR e o atraso fim-a-fim com base no RTT (*Round-Trip-Time*). Os resultados indicam que a PDR é  $> 80\%$  em distâncias  $< 70$  m, e que o RTT ficou entre 100 ms e 200 ms. Quanto menor é a velocidade do veículo, maior é a chance de evitar uma colisão. Por fim, os resultados apontam que, no geral, a PDR independe da velocidade do veículo, apesar da ocorrência de uma pequena queda em velocidades mais altas.

Como pode ser visto, muitos trabalhos envolvendo o Wi-Fi Direct são baseados no uso de simuladores, que podem não possuir módulos de comunicação compatíveis com o Wi-Fi Direct. Como [Won et al. 2018], este trabalho analisa se o Wi-Fi Direct atende aos requisitos de uma aplicação de segurança em VANETs usando dispositivos reais. Porém, ao contrário de [Won et al. 2018] – onde a velocidade máxima do veículo foi 30 km/h – neste trabalho velocidades de até 100 km/h são empregadas. Além disso, nos experimentos de [Won et al. 2018], o atraso para estabelecimento da conexão foi desconsiderado. Já no presente trabalho, a conexão é feita durante os experimentos de mobilidade, de forma a investigar seu impacto efetivo na comunicação. Uma importante contribuição em relação a [Won et al. 2018] é que a presente análise é feita em cenários com e sem condições de LoS, aproximando os experimentos das situações encontradas no mundo real. Por fim, além do alcance máximo da comunicação e da PDR, investiga-se também o PIR, dada sua importância como métrica de desempenho para aplicações de segurança.

### **3. Experimentos com o Wi-Fi Direct**

A avaliação é composta por um pedestre portando um *smartphone* que atua como cliente do grupo, bem como por um veículo contendo um *smartphone* que atua como GO.

### 3.1. Cenários Experimentais

Os cenários de avaliação do Wi-Fi Direct têm como base uma via sinalizada (Figura 1(a)), onde pedestres podem realizar a travessia na faixa enquanto veículos aguardam por autorização semafórica. No mundo real, a travessia de pedestres ou veículos quando não há autorização semafórica é uma situação comum, que coloca em risco a vida de pedestres e condutores. Tal situação é agravada com a presença de obstáculos que inibem a propagação do sinal de rádio (como um ônibus parado coletando passageiros). Neste caso, além da obstrução do sinal, há também o bloqueio do campo visual do pedestre, que não percebe a chegada de veículos ao tentar fazer a travessia sem a devida autorização semafórica. Neste sentido, três cenários foram definidos, ilustrados na Figura 1(b).

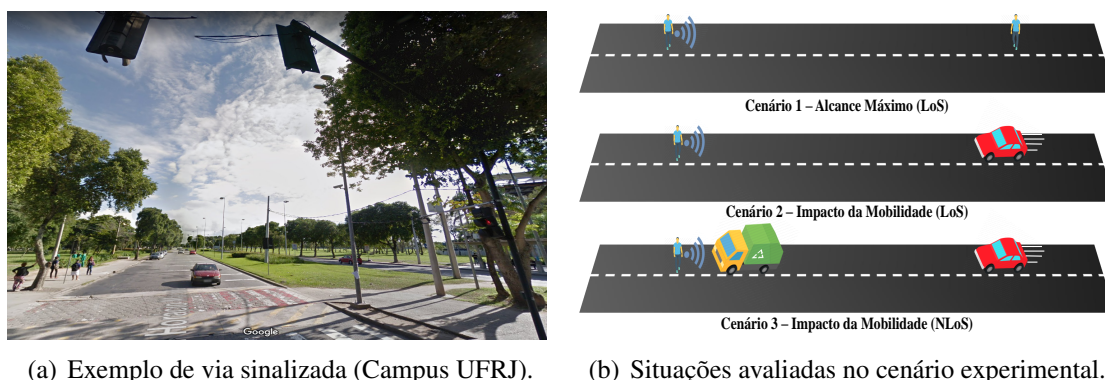


Figura 1. Exemplo de um cenário real e situações avaliadas.

**Cenário 1 – Alcance Máximo (LoS):** analisa se o alcance máximo obtido pelo Wi-Fi Direct no mundo real corresponde ao alcance máximo teórico de 200 m. O objetivo, além de analisar o alcance real, é servir como referência para cenários com mobilidade. Neste cenário, após o estabelecimento da conexão, dois pedestres estáticos portando *smartphones* se comunicam por meio de BSMs. A avaliação é baseada na transmissão de um conjunto de 500 BSMs, de 10 m em 10 m, até que os dispositivos estejam a 200 m de distância. O alcance máximo da comunicação é definido como a distância máxima no qual é possível receber, no mínimo, 80% das BSMs transmitidas [Bai et al. 2010].

**Cenário 2 – Impacto da Mobilidade (LoS):** mede o impacto da mobilidade no desempenho do Wi-Fi Direct. Enquanto o pedestre se mantém estático e transmitindo BSMs continuamente, o veículo se locomove em direção ao pedestre com velocidades de 20 km/h, 60 km/h ou 100 km/h. O veículo inicia sua trajetória a 500 m do pedestre, distância suficientemente grande para entrar no alcance de comunicação do pedestre já tendo alcançado a velocidade desejada. O objetivo é investigar, por exemplo, se o deslocamento Doppler causado pela mobilidade do nó é capaz de impactar a comunicação com base na PDR e no PIR. Ao contrário do cenário 1, todas as transmissões feitas durante a rota do veículo são contabilizadas, e o cálculo da PDR e do PIR é feito a cada 20 m.

**Cenário 3 – Impacto da Mobilidade (NLoS):** similar ao cenário 2, com o adendo de inserir um veículo de médio porte (sem Wi-Fi Direct) entre o pedestre e o veículo atuando como GO. O objetivo é analisar o impacto causado pela obstrução do sinal de rádio, causada por condições NLoS na comunicação em um ambiente mais realista. No mundo real, não existem garantias de linha de visada entre o transmissor e o receptor. O sinal

pode ser afetado por árvores, edificações ou outros veículos presentes na via. Portanto, é preciso avaliar se as BSMs serão capazes de alertar o veículo em movimento sobre a travessia indevida do pedestre, que não possui informação visual devido ao obstáculo.

A análise de desempenho do Wi-Fi Direct tem como base a PDR e o PIR. Enquanto a PDR indica o percentual de BSMs recebidas em função do total das BSMs transmitidas, o PIR demonstra o intervalo de tempo entre duas recepções bem sucedidas. Esta métrica reflete o nível de consciência situacional: através das BSMs, um veículo obtém a posição, velocidade e estado dos demais veículos e pedestres na via. Quanto maior é a consciência situacional, menor é o tempo de reação sob uma condição adversa. Das análises de desempenho na literatura, boa parte investiga apenas a PDR. Entretanto, dado que o objetivo é analisar o Wi-Fi Direct para a operação de uma aplicação de segurança, a análise do PIR é essencial para indicar uma possível ausência de comunicação por longos períodos. A Tabela 1 resume os três cenários de avaliação.

**Tabela 1. Características dos Cenários Experimentais.**

Cenário	Verificação	Condição	Vel. Pedestre	Vel. Veículo	Taxa PHY
1	Alcance Máximo	LoS	0 km/h	0 km/h	250 Mbps
2	Impacto da Mobilidade	LoS	0 km/h	20-60-100 km/h	250 Mbps
3	Impacto da Mobilidade	NLoS	0 km/h	20-60-100 km/h	250 Mbps

### 3.2. Implementação e Local dos Experimentos

Os experimentos foram realizados utilizando dois *smartphones* comerciais: (1) Xiaomi MI A2, com processador *Octa-Core* de 2.0 GHz e 4 GB de RAM, atuando como GO; e (2) Asus Zenfone Live L1, com processador *Octa-Core* de 1.4 GHz e 2 GB de RAM, atuando como cliente do grupo. As versões do Android dos dispositivos são a 9.0 *One Pie* (API 28) para o Xiaomi, e a 8.0 *Oreo* (API 26) para o Asus. Desde a versão 4.0 (*Ice Cream Sandwich*), de 2011, o Wi-Fi Direct encontra-se disponível no Android.

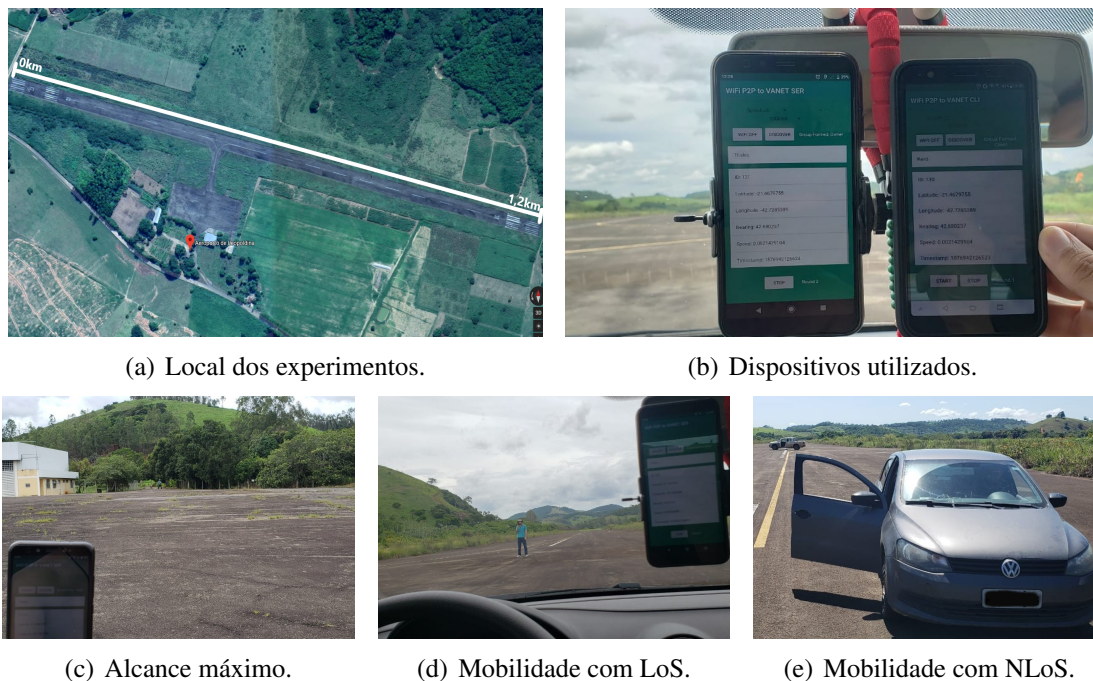
Como o intuito é analisar o desempenho do Wi-Fi Direct sob aspectos da rede, o atraso baseado na interação do usuário com a tela – para seleção do nó e estabelecimento da conexão – foi ignorado em todos os cenários. Isto foi realizado invocando o método de conexão do Wi-Fi Direct dentro do método *PeerListListener*<sup>2</sup> – responsável por mostrar na tela a lista de pares disponíveis após a conclusão de etapa de descoberta – e passando de maneira explícita o ID do dispositivo atuando como GO. O mesmo se deu em relação à transmissão de BSMs: tão logo o grupo é formado, o cliente transmite BSMs via *socket* UDP ao GO. Nenhuma interação com a aplicação por parte do usuário é necessária.

A comunicação entre o pedestre e o veículo consiste na transmissão de BSMs representando uma mensagem CAM, responsável por propagar o estado do ambiente. Cada BSM possui as coordenadas geográficas do nó (latitude e longitude), obtidas por meio do GPS com taxa de atualização de 1 Hz, sua velocidade atual, sentido de direção, e *timestamp* da informação. As BSMs são transmitidas a cada 100 ms, atendendo ao requisito de frequência mínima requerido por aplicações de segurança em VANETs [Consortium et al. 2005]. Cada BSM possui em torno de 80 B de tamanho. As janelas do veículo permaneceram fechadas durante toda a comunicação com o pedestre.

<sup>2</sup><https://developer.android.com/reference/android/net/wifi/p2p/WifiP2pManager.PeerListListener>



Os experimentos foram realizados em um aeroporto desativado da cidade de Leopoldina – MG. Contando com uma pista de 1,2 km de extensão e estando em uma área rural, o local demonstrou ser o ideal para a realização dos experimentos: não recebe interferência de redes celulares ou *Wi-Fi* e, por estar em uma área predominantemente aberta, não possui edificações que prejudicariam a avaliação do cenário com LoS. A Figura 2(a) apresenta a visão aérea do local, enquanto as Figuras 2(b), 2(c), 2(d) e 2(e) apresentam os dispositivos utilizados e a avaliação do Wi-Fi Direct em progresso, respectivamente.



**Figura 2. Local dos testes, dispositivos utilizados e avaliação em curso.**

## 4. Resultados

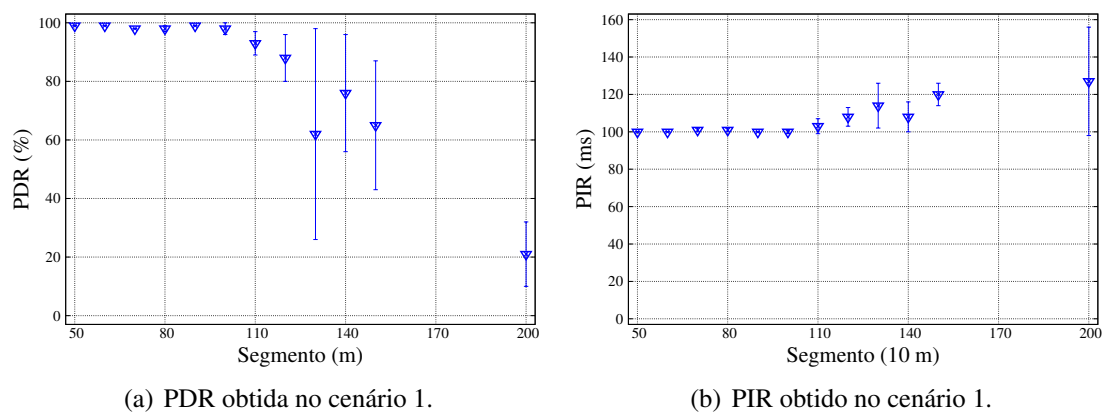
Esta seção apresenta os resultados da avaliação prática do Wi-Fi Direct. Para cada cenário definido na Seção 3, 10 rodadas de experimentos foram executadas. A mediana dos resultados é apresentada contendo barras verticais de erro, que correspondem ao desvio absoluto da mediana. A escolha pela mediana se deu pela sua robustez em tratar *outliers*.

### 4.1. Alcance Máximo da Comunicação

Antes de considerar o Wi-Fi Direct no ambiente veicular, é preciso analisar se os dispositivos conseguirão se comunicar a uma distância que atenda aos requisitos da aplicação. O objetivo deste cenário é investigar se o alcance máximo teórico de 200 m do Wi-Fi Direct pode ser obtido na prática. Além disso, os resultados deste cenário servem como referência para analisar o impacto causado pela mobilidade e pelas condições NLoS na comunicação. As Figuras 3(a) e 3(b) apresentam o alcance máximo real do Wi-Fi Direct.

Iniciando a avaliação a partir de 50 m, a até 100 m de distância a PDR obtida foi próxima de 100%. Apesar de  $\geq 60\%$  a até 150 m, é notória a queda da PDR a partir de 110 m, mais evidente em 200 m. Portanto, apesar de ainda ser possível transmitir BSMs a 200 m de distância, o alcance máximo real do Wi-Fi Direct no mundo real – considerando



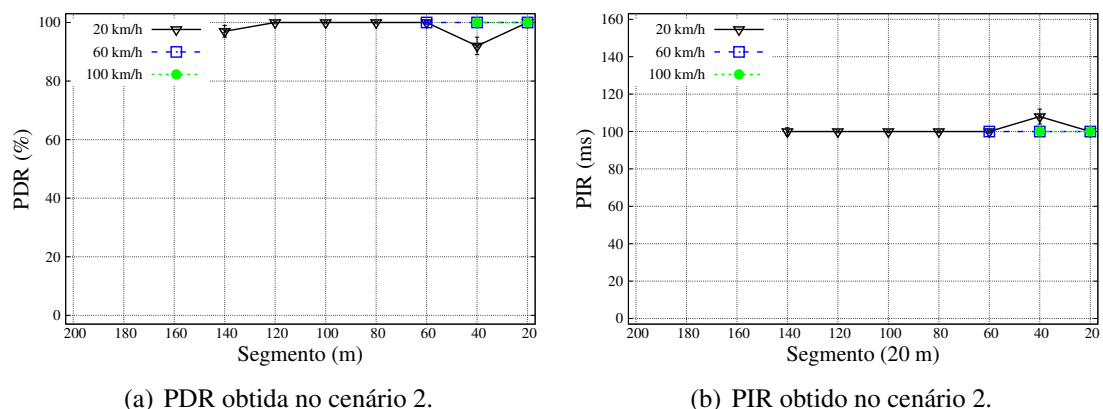


**Figura 3. Alcance máximo da comunicação.**

a  $PDR \geq 80\%$  – foi de 120 m. Por sinal, a PDR de 20% em 200 m pode não garantir a plena operação de uma aplicação de segurança neste ponto da via. Com relação ao PIR, é possível observar uma correlação negativa com a PDR, especialmente a partir de 110 m. Quanto menor é a PDR, maior é o PIR. Dado que a potência de transmissão é fixa, quanto maior é o alcance da comunicação, mais forte é a atenuação do sinal de rádio, impactando a PDR e o PIR. Isto pode indicar um alerta para a operação de aplicações que dependam de comunicação a longas distâncias.

#### 4.2. Impacto da Mobilidade na Comunicação (LoS)

O segundo conjunto de experimentos investiga o impacto da mobilidade do veículo – 20 km/h, 60 km/h e 100 km/h – na comunicação realizada em condições de linha de visada (LoS). A PDR e o PIR são calculados a cada segmento de 20 m, conforme o veículo se aproxima da posição do pedestre. As Figuras 4(a) e 4(b) apresentam os resultados obtidos para este cenário. Em todas as figuras, o eixo das abscissas é apresentado de forma decrescente, representando a aproximação do veículo em direção ao pedestre.



**Figura 4. Impacto da mobilidade em condições com LoS.**

Os resultados da PDR demonstram o impacto do longo atraso para estabelecimento da conexão no Wi-Fi Direct em um cenário com mobilidade. Como demonstrado na Seção 4.1, no cenário estático é possível receber BSMs em 200 m. Já no presente

cenário, a distância máxima na qual o pedestre (cliente) conclui o estabelecimento da conexão com o veículo (GO) – estando apto a transmitir BSMs – é de aproximadamente 140 m, enquanto o veículo está a 20 km/h. A partir desta distância, a PDR a 20 km/h foi  $\geq 90\%$ . Já o estabelecimento da conexão – e transmissão de BSMs – a 60 km/h e 100 km/h se deu apenas nos últimos 60 m e 40 m, respectivamente. Nestes casos, a PDR foi 100%.

É possível calcular a chance de colisão entre veículo e pedestre com base na soma do tempo de reação do motorista após receber o alerta e do tempo para parar o veículo após o acionamento dos freios, comparando o resultado com o tempo para o veículo atingir o pedestre. Tais parâmetros são afetados: (1) pela velocidade do veículo e cognição do motorista; e (2) pela condição de pneus, freios e estrada. A distância de parada do veículo após a recepção da BSM pode ser calculada com base na seguinte equação:

$$D_{total} = d_{reacao} + d_{frenagem} = v_{veiculo} \cdot t_{reacao} + \frac{v_{veiculo}^2}{2\mu g} \quad (1)$$

onde  $d_{reacao}$  é a distância percorrida durante a reação do motorista, e  $d_{frenagem}$  é a distância percorrida após acionar os freios, com base na velocidade ( $v_{veiculo}$ ), coeficiente de fricção ( $\mu$ ), aceleração da gravidade ( $g$ ) e tempo de reação do motorista ( $t_{reacao}$ ).

Em [Won et al. 2018], os autores também calculam as chances de colisão, porém agregando o RTT e alguns outros parâmetros em  $t_{frenagem}$ . Neste trabalho, para cálculo da chance de colisão, considerou-se, no pior caso, um atraso equivalente ao RTT de 100 ms (média do PIR),  $t_{reacao}$  como 1 s [Renda et al. 2016],  $g$  de 9,81 m/s<sup>2</sup>, e dado que as medições foram realizadas em boas condições climáticas,  $\mu$  de 0,8 (compatível com o asfalto seco) [Wong 2008]. Considerando  $v_{veiculo}$  como 20 km/h, 60 km/h e 100 km/h, uma distância aproximada de 8 m, 36 m e 80 m seria percorrida, respectivamente, até que o veículo parasse por completo. De acordo com a Figura 4(a), apenas a 100 km/h pode-se não ser possível evitar a colisão. Porém, com exceção das vias de trânsito rápido, a velocidade máxima permitida nas vias urbanas no Brasil é de 60 km/h. Neste caso, ao menos em condições de LoS, o Wi-Fi Direct atende satisfatoriamente a comunicação V2P.

Com relação ao PIR, é possível perceber uma correlação com a PDR obtida a 20 km/h no segmento entre 20 e 40 m de distância. Nos casos onde a PDR foi próxima ou igual a 100%, o PIR foi similar à taxa de BSMs (100 ms). Este resultado é importante pois demonstra que, estabelecida a conexão, o Wi-Fi Direct foi capaz de atender ao requisito de frequência de recepção de aplicações de segurança [Consortium et al. 2005]. Além disso, dado que o PIR máximo foi 110 ms, nenhum *blackout* de consciência situacional (intervalo  $\geq 1$  s no qual nenhuma BSM é recebida [Renda et al. 2016]) ocorreu durante os experimentos. Isto indica que em nenhum momento o veículo navegou às cegas pela via, sem estar ciente do estado do pedestre em tempo real.

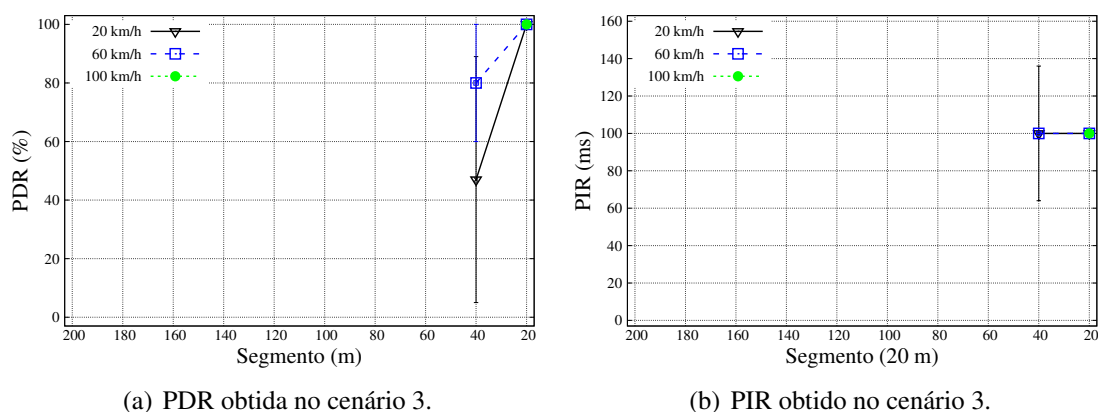
Por fim, a Tabela 2 mostra a PDR e o PIR global, com base nas transmissões e recepções realizadas durante todo o percurso do veículo, sem dividir os resultados por segmentos. Dada a relação entre o aumento da velocidade do nó e o deslocamento Doppler da frequência – que supostamente causa um aumento da BER (*Bit Error Rate*) – é importante verificar se o emprego de altas velocidades (como 100 km/h) leva a uma piora da PDR e do PIR. Independente da velocidade, observa-se que a PDR é superior a 90% e o PIR é similar à taxa de BSMs, o que indica uma tolerância da camada física do Wi-Fi Direct à interferência intersimbólica gerada pelo deslocamento Doppler.

**Tabela 2. PDR e PIR global por velocidade (LoS).**

Velocidade (km/h)	PDR (%)	PIR (ms)
20	97,55	102,99
60	100	100,48
100	100	100,56

### 4.3. Impacto da Mobilidade na Comunicação (NLoS)

O último conjunto de experimentos investiga o comportamento da comunicação em um ambiente com mobilidade e sem linha de visada (NLoS). Neste cenário, o veículo se locomove a 20 km/h, 60 km/h e 100 km/h em direção ao pedestre, que desta vez está posicionado atrás de um veículo de médio porte estático (caminhonete 4x4). Novamente, PDR e PIR são calculados a cada 20 m. As Figuras 5(a) e 5(b) apresentam os resultados obtidos.



**Figura 5. Impacto da mobilidade em condições com NLoS.**

Dada a atenuação do sinal de rádio devido à condição NLoS, é nítida a diferença da PDR em comparação ao cenário com LoS. Enquanto que no cenário anterior a distância máxima na qual o pedestre conclui o estabelecimento da conexão e inicia a transmissão de BSMs ao veículo é em torno de 140 m (20 km/h), no presente cenário é de aproximadamente 40 m. Isto demonstra que, em condições NLoS, o atraso para estabelecimento da conexão no Wi-Fi Direct pode inviabilizar seu uso em VANETs, já que o tempo para transmissão das BSMs e atuação da aplicação após a recepção pode ser insuficiente. Além disso, no cenário com LoS, a PDR obtida a 20 km/h e 40 m foi  $\geq 90\%$ . Já no cenário atual, a PDR neste mesmo segmento foi  $< 50\%$ . O mesmo padrão de queda é observado nas demais velocidades: se antes era possível obter uma PDR de 100% a 60 m e 40 m trafegando a 60 km/h e 100 km/h, a atenuação do sinal fez com que a PDR nestas mesmas condições fosse 80% e 100%, porém em 40 m e 20 m. Dada a distância calculada no cenário com LoS para parar o veículo após a recepção do alerta (8 m, 36 m e 80 m), há uma grande chance de não ser possível evitar colisões a 60 km/h e 100 km/h em condições NLoS.

No que se refere ao PIR, diferente do cenário com LoS, nenhuma correlação com a PDR foi observada. Neste cenário, o PIR foi sempre similar à taxa de BSMs (100 ms), apesar da redução da PDR no segmento compreendido entre 20 m a 40 m de distância. Tal resultado confirma a proposição de [Renda et al. 2016], ou seja, de que pode não ser

possível estimar o PIR a partir da PDR. Isto se deve à distinção no padrão de recepção das BSMs, que pode ser variável (recepções alternadas) ou fixo (recepções contínuas). Em condições NLoS, mesmo que em um dado momento não haja recepções devido à obstrução do sinal, após o transmissor obter uma condição de LoS predominante, as BSMs podem ser recebidas de forma imediata. Isto gera um PIR similar à taxa de BSMs, apesar da PDR ser baixa. Portanto, é possível que *blackouts* de consciência situacional ocorram em tais condições, e o veículo navegue às cegas pela via por algum tempo.

A Tabela 3 apresenta a PDR e o PIR global. Mais uma vez, a PDR é superior a 90% e o PIR é similar à taxa de geração de BSMs, demonstrando uma tolerância da camada física do Wi-Fi Direct à interferência intersimbólica, independente da velocidade.

**Tabela 3. PDR e PIR global por velocidade (NLoS).**

Velocidade (km/h)	PDR (%)	PIR (ms)
20	96,42	104,52
60	100	100,56
100	100	100,55

## 5. Conclusões e Trabalhos Futuros

Este trabalho realizou uma análise do desempenho do Wi-Fi Direct através de medições reais utilizando *smartphones* comerciais. Por meio da comunicação V2P e baseado em uma situação do mundo real – onde pedestres e veículos podem provocar colisões devido à travessias inapropriadas na via sem a devida autorização semafórica – foram investigados o alcance máximo da comunicação, a taxa de entrega de pacotes e o tempo entre recepções de pacotes. Além disso, o impacto de altas velocidades relativas na comunicação, bem como de transmissões realizadas com e sem linha de visada, também foi analisado.

Os resultados indicam que o alcance máximo real do Wi-Fi Direct ( $PDR \geq 80\%$ ) foi de 120 m, apesar de ainda haver recepção de BSMs a 200 m. Dado o atraso para estabelecimento da conexão, no cenário com mobilidade e LoS só é possível receber BSMs em 140 m, 60 m e 40 m, com o veículo a 20 km/h, 60 km/h e 100 km/h, respectivamente. Apesar disso, apenas a 100 km/h há o risco de não evitar a colisão entre veículo e pedestre. Já no cenário NLoS, dada a atenuação do sinal, a distância máxima na qual é possível receber BSMs é de 40 m a 20 km/h, com a PDR indo de 90% a  $< 50\%$  comparado ao cenário com LoS. Dada a queda da PDR, garante-se que colisões podem ser evitadas apenas a 20 km/h. Portanto, em condições NLoS, o Wi-Fi Direct pode não ser viável.

Com relação ao PIR, foi possível observar uma correlação negativa com a PDR em alguns casos, especialmente na avaliação do alcance. Onde a PDR foi próxima de 100%, o PIR foi similar à taxa de geração de BSMs (100 ms), indicando que o Wi-Fi Direct atende ao requisito de frequência de recepção de aplicações de segurança. Nenhum *blackout* foi registrado durante os experimentos. Por fim, mesmo com o emprego de altas velocidades relativas, os resultados da PDR e do PIR global sugerem uma tolerância do Wi-Fi Direct a interferência intersimbólica gerada pelo deslocamento Doppler.

Como trabalhos futuros, pretende-se propor um mecanismo para envio proativo de BSMs, que não necessite de quadros de requisição. O objetivo é propor um modelo baseado no modo OCB (*Outside the Context of a BSS*) do IEEE 802.11p, eliminando o

atraso para formação de grupo do Wi-Fi Direct e permitindo uma melhor atuação em condições NLoS. Pretende-se também explorar a rede embarcada CAN (*Controller Area Network*) do veículo como forma de integrar a técnica de *dead reckoning* ao GPS em um modelo para melhoria da precisão da posição geográfica do veículo. Por fim, uma das metas futuras é propor um módulo de comunicação compatível com o Wi-Fi Direct para o NS-3, permitindo avaliações em larga escala.

## 6. Agradecimentos

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001. Também foi parcialmente financiado pelo CNPq, FAPERJ e pelo processo nº 15/24494-8 da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP).

## Referências

- Bai, F., Stancil, D. D., and Krishnan, H. (2010). Toward Understanding Characteristics of Dedicated Short Range Communications (DSRC) from a Perspective of Vehicular Network Engineers. In *Proceedings of the sixteenth annual international conference on Mobile computing and networking*, pages 329–340.
- Balasundram, A., Samarasinghe, T., and Dias, D. (2016). Performance Analysis of Wi-Fi Direct for Vehicular Ad-hoc Networks. In *2016 IEEE International Conference on Advanced Networks and Telecommunications Systems (ANTS)*, pages 1–6. IEEE.
- Camps-Mur, D., Garcia-Saavedra, A., and Serrano, P. (2013). Device-to-Device Communications with Wi-Fi Direct: Overview and Experimentation. *IEEE wireless communications*, 20(3):96–104.
- Chaki, P., Yasuda, M., and Fujita, N. (2015). Seamless Group Reformation in WiFi Peer to Peer Network using Dormant Backend Links. In *2015 12th Annual IEEE Consumer Communications and Networking Conference (CCNC)*, pages 773–778. IEEE.
- Consortium, C. V. S. C. et al. (2005). Vehicle Safety Communications Project: Task 3 Final Report: Identify Intelligent Vehicle Safety Applications Enabled by DSRC. *National Highway Traffic Safety Administration, US Department of Transportation, Washington DC*.
- Frank, R., Bronzi, W., Castignani, G., and Engel, T. (2014). Bluetooth Low Energy: An Alternative Technology for VANET Applications. In *2014 11th annual conference on wireless on-demand network systems and services (WONS)*, pages 104–107. IEEE.
- Jeong, S., Baek, Y., and Son, S. H. (2016). A Hybrid V2X System for Safety-Critical Applications in VANET. In *2016 IEEE 4th International Conference on Cyber-Physical Systems, Networks, and Applications (CPSNA)*, pages 13–18. IEEE.
- Jeong, S., Baek, Y., and Son, S. H. (2019). Hierarchical Network Architecture for Non-Safety Applications in Urban Vehicular Ad-Hoc Networks. *Sensors*, 19(19):4306.
- Khan, M. A., Cherif, W., Filali, F., and Hamila, R. (2017). Wi-Fi Direct Research-Current Status and Future Perspectives. *Journal of Network and Computer Applications*, 93:245–258.
- Manamperi, W., Samarasinghe, T., and Dias, D. (2018). Enhancing the Wi-Fi Direct Protocol for Data Communication in Vehicular Ad-hoc Networks. In *2018 21st International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*, pages 812–817.
- Miucic, R. and Bai, S. (2011). Performance of Aftermarket (DSRC) Antennas Inside a Passenger Vehicle. *SAE Int. J. Passeng. Cars – Electron. Electr. Syst.*, 4:150–155.
- Park, Y., Ha, J., Kuk, S., Kim, H., Liang, C.-J. M., and Ko, J. (2014). A Feasibility Study and Development Framework Design for Realizing Smartphone-based Vehicular Networking Systems. *IEEE transactions on mobile computing*, 13(11):2431–2444.

- Renda, M. E., Resta, G., Santi, P., Martelli, F., and Franchini, A. (2016). IEEE 802.11p VANets: Experimental Evaluation of Packet Inter-Reception Time. *Computer Communications*, 75:26–38.
- Shahin, A. A. and Younis, M. (2015). Alert Dissemination Protocol using Service Discovery in Wi-Fi Direct. In *2015 IEEE International Conference on Communications (ICC)*, pages 7018–7023. IEEE.
- Statista (2019). Global Smartphone Penetration Rate as Share of Population from 2016 to 2020.
- Su, K.-C., Wu, H.-M., Chang, W.-L., and Chou, Y.-H. (2012). Vehicle-to-Cehicle Communication System through Wi-Fi Network using Android Smartphone. In *2012 International conference on connected vehicles and expo (ICCVE)*, pages 191–196. IEEE.
- Sun, W., Yang, C., Jin, S., and Choi, S. (2016). Listen Channel Randomization for Faster Wi-Fi Direct Device Discovery. In *IEEE INFOCOM 2016-The 35th Annual IEEE International Conference on Computer Communications*, pages 1–9. IEEE.
- Touati, F., Tabish, R., and Mnaouer, A. B. (2013). A Real-Time BLE Enabled ECG System for Remote Monitoring. *APCBEE procedia*, 7:124–131.
- Won, M., Shrestha, A., and Eun, Y. (2018). Enabling WiFi P2P-based Pedestrian Safety App. *arXiv preprint arXiv:1805.00442*.
- Wong, J. Y. (2008). *Theory of Ground Vehicles*. John Wiley & Sons.
- World Health Organization (2019). Road Traffic Injuries.
- Zhang, H., Wang, Y., and Tan, C. C. (2014). WD2: An Improved WiFi-Direct Group Formation Protocol. In *Proceedings of the 9th ACM MobiCom workshop on Challenged networks*, pages 55–60. ACM.