

Um Algoritmo para Cálculo de Distância Segura de Frenagem para Prevenção de Colisão Dianteira em Redes Veiculares

João B. Pinto Neto^{1,2}, Lucas C. Gomes¹, Eduardo M. Castanho¹
Miguel Elias M. Campista¹ e Luís Henrique M. K. Costa¹

¹Universidade Federal do Rio de Janeiro - PEE/COPPE/GTA

²Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Rondônia - IFRO

{pinto, gomes, castanho, miguel, luish}@gta.ufrj.br

Abstract. *Connected vehicles are a key technology to Intelligent Transportation Systems (ITS), with applications between vehicles, and between vehicles and infrastructure and hybrid. The communication uses the 5.9 GHz band, called Dedicated Short Range Communications (DSRC), and protocols defined in the Wireless Access in Vehicular Environments (WAVE) architecture. This work evaluates, through practical experiments with latest on-board units (OBUs), the performance of an algorithm to reckoning safe braking distance in a forward collision warning application that sends and receives messages over the DSRC control channel 178. The algorithm uses location information provided by an internal GPS to calculate the safe braking distance of a vehicle moving towards a stationary vehicle, limiting the error within the GPS update rate. The experiments were conducted at speeds of 30, 40, 50 and 60 km/h with GPS update rate of 5 Hz. The results shown a margin of error below 1%, proving the reliability of the application in avoiding forward collisions.*

Resumo. *A tecnologia de veículos conectados é fundamental para os Sistemas de Transportes Inteligentes (ITS), com aplicações entre veículos e entre veículos e a infraestrutura de acostamento. A comunicação utiliza a faixa de 5,9 GHz, chamada de Comunicações Dedicadas de Curto Alcance (Dedicated Short Range Communications – DSRC), com os protocolos definidos na arquitetura de Acesso Sem Fio em Ambientes Veiculares (Wireless Access in Vehicular Environments – WAVE) . Este trabalho avalia, por meio de experimentos práticos com unidades de bordo (On Board Units – OBUs) comerciais, o desempenho de um algoritmo na determinação da distância segura de frenagem em uma aplicação de alerta de colisão dianteira que envia e recebe mensagens no canal de controle DSRC 178. O algoritmo usa a informação de localização fornecida por um GPS, presente nas OBUs, para calcular a distância segura de frenagem de um veículo em movimento em relação a um veículo parado. O algoritmo proposto limita o erro dentro da taxa de atualização do GPS. Foram realizados experimentos em cenários reais com velocidades de 30, 40, 50 e 60 km/h e com taxa de atualização do GPS de 5 Hz. Os resultados apresentam uma margem de erro abaixo de 1%, comprovando a confiabilidade da aplicação na prevenção de colisão dianteira.*

1. Introdução

Os Sistemas de Transportes Inteligentes (*Intelligent Transportation Systems* – ITS) têm ganhado significativa atenção do meio acadêmico com a emergência de novos padrões de comunicação veicular. A WAVE estabelece um conjunto de padrões que reúne a família IEEE 1609 e a emenda IEEE 802.11p do padrão IEEE 802.11. A camada física utiliza a faixa de frequências de 5,850 a 5,925 GHz. Esta faixa exclusiva pode ser usada para comunicações entre veículos (V2V) e/ou entre veículos e infraestrutura (V2I), sendo denominada Comunicações Dedicadas de Curta Distância (DSRC). Esta faixa foi reservada pela Comissão Federal de Comunicações Norte Americana (FCC) e pelo Instituto Europeu de Padrões de Telecomunicações (ETSI). Já o Japão adotou a faixa de 760 MHz [Hartenstein and Laberteaux 2009]. Existem diversas aplicações previstas para a faixa DSRC, destacando-se aplicações ativas de segurança e outros serviços.

Um dos pilares de ITS é a segurança. A troca de informações entre veículos através de mensagens básicas de segurança (BSMs – *Basic Safety Messages*) do padrão WAVE, dentro de uma determinada área de cobertura, permite aumentar consideravelmente a segurança dos condutores. Utilizando-se BSMs, pode-se implementar aplicações de alerta de colisão dianteira, alerta de ultrapassagem indevida, alerta de colisão em cruzamentos e alerta de frenagem brusca. Estas, chamadas aplicações ativas de segurança por prevenirem colisões de forma cooperativa, diferem dos dispositivos passivos como *airbag* e cinto de segurança que minimizam danos físicos e materiais. Aplicações ativas de segurança têm potencial para reduzir os acidentes em vias expressas [Shafiq et al. 2014], porém, exigem baixa latência na troca de mensagens entre os veículos. Segundo Hill, a tecnologia DSRC atende aos requisitos exigidos pelas aplicações ativas de segurança por apresentar latências da ordem de $0,2 \mu s$, restando assim aos dispositivos de sensoriamento dos veículos também garantir os requisitos de latência [Hill 2015].

Nesse contexto, este trabalho avalia a precisão de alerta de colisão dianteira calculando a distância segura de frenagem de um veículo em movimento em relação a um veículo em repouso, usando Unidades de Bordo (OBUs – *On Board Units*) WAVE comerciais. A aplicação usa a informação de localização do GPS presente nas OBUs para emitir um sinal sonoro ou visual ao condutor, com base na posição geográfica, no sentido do movimento e na velocidade dos veículos. Um desafio enfrentado neste trabalho é o uso do GPS como origem das informações de distância de aproximação e velocidade do veículo para a determinação da distância segura de frenagem. A taxa de atualização do GPS (t_{GPS}) embarcado na OBU, de 200 ms, é o dobro da latência máxima exigida para uma aplicação de alerta de colisão dianteira, o que poderia comprometer sua precisão. A análise dos dados obtidos em experimentos iniciais, mostrou que a taxa t_{GPS} era a principal responsável pelos erros na determinação da distância segura de frenagem. Para minimizar a influência da taxa de atualização do GPS na precisão da aplicação, foi desenvolvido um algoritmo para correção do alerta de colisão dianteira, denominado ACORA. Este algoritmo monitora o tempo necessário para atingir a distância segura de frenagem. Os resultados obtidos com sua utilização apresentam uma margem de erro abaixo de 1%, comprovando a confiabilidade da aplicação na prevenção de colisão dianteira.

Este trabalho está organizado da seguinte forma. A Seção 2 apresenta conceitos da tecnologia DSRC. A Seção 3 descreve os trabalhos relacionados. A Seção 4 apresenta o funcionamento da aplicação de cálculo de distância segura de frenagem. Já a Seção 5

introduz a metodologia usada para avaliação da aplicação, enquanto a Seção 6 apresenta os resultados. A Seção 7 conclui este trabalho e apresenta os trabalhos futuros.

2. Comunicações Dedicadas de Curto Alcance

A tecnologia DSRC, cujas especificações estão definidas nos padrões IEEE 802.11p e WAVE 1609, foi desenvolvida para comunicação entre veículos em alta velocidade (até 190 km/h) e ambientes externos [Li 2012]. Ele utiliza a faixa de 5,860 GHz a 5,920 GHz, que é subdividida em sete canais de 10 MHz, mostrados na Figura 1.

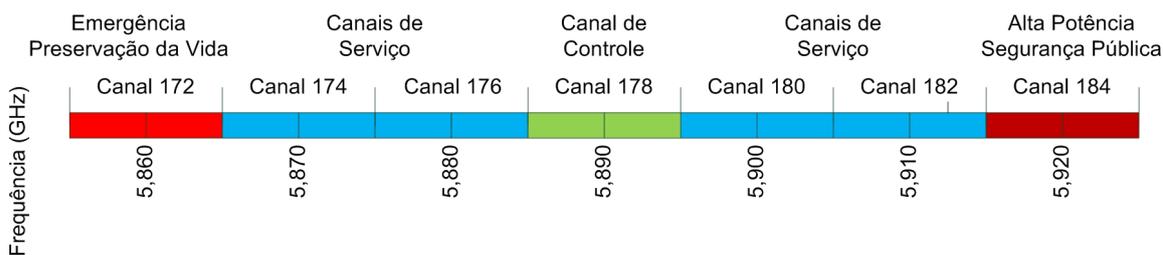


Figura 1. Os canais do espectro DSRC (Reproduzida de [Alves et al. 2009]).

O canal 178 é exclusivo para o controle, reservado às aplicações de segurança compartilhada. Este canal deve ser monitorado a cada 100 ms no mínimo, podendo operar com taxas menores em caso de sobrecarga do canal. Os canais extremos, 172 e 184, são reservados para difusão de mensagens de alta prioridade, como emergências que envolvam preservação da vida e segurança pública respectivamente. Os canais intermediários são destinados a outros serviços, com diferentes níveis de potência, dependendo do escopo de cada aplicação. Aplicações mais relevantes, para uso em caminhões de bombeiro, por exemplo, utilizam um canal com maior nível de potência. Essa diferenciação entre canais, porém, ainda não está precisamente definida nos documentos de implementação da interface DSRC [Kelley 2015]. Para comunicações entre os equipamentos, pode-se usar duas pilhas de protocolos: uma relativa ao protocolo IPv6 e outra relativa ao protocolo WSMP (*WAVE Short Message Protocol*). Essa característica da arquitetura WAVE permite o envio simultâneo de quadros IPv6 e WSMP. Este último exige procedimentos adicionais das camadas de acesso ao meio (MAC) e física WAVE, não contemplados no padrão IEEE 802.11 tradicional.

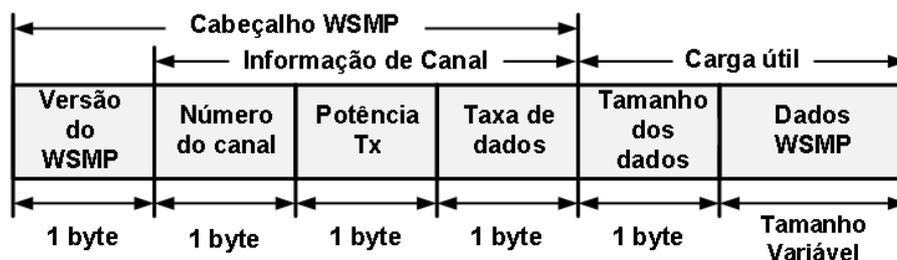


Figura 2. Formato de mensagem do protocolo WSMP (Adaptado de [Zhang et al. 2008]).

Conforme ilustrado na Figura 2, o cabeçalho WSMP carrega informações sobre o número do canal, a potência e a taxa de transmissão de dados, habilitando serviços dife-

renciados que exigem transmissão imediata, alta vazão e o uso da maior área de cobertura possível em canais específicos [Zhang et al. 2008].

As mensagens encapsuladas pelo WSMP e enviadas através do canal de controle são chamadas Mensagens Básicas de Segurança (BSM – *Basic Safety Messages*). Elas são geradas codificando as informações de posição, velocidade, horário e outras informações relativas ao veículo, usando o padrão ASN.1 (*Abstract Syntax Notation Number One*). As BSMs são enviadas em difusão (*broadcast*) e não geram confirmação de recebimento. Segundo o padrão SAE J2735, estas devem ser enviadas periodicamente, com no máximo 100 ms entre cada envio [Missener and Kelley 2015].

3. Trabalhos Relacionados

Tsai et al. propõem um sistema cooperativo de alerta de frenagem de emergência que combina comunicação DSRC com a tecnologia de reconhecimento de imagens, por meio de uma câmera instalada no veículo. A câmera é usada para gerar um mapa no entorno do veículo onde cada vizinho é identificado pela placa que será comparada com a mensagem correspondente. Os autores garantem alta acurácia, mesmo em situações de baixa visibilidade, provocada por fatores climáticos ou pela visão frontal obstruída por outro veículo e a redução das BSMs [Tsai et al. 2015]. Chen et al. propõem um algoritmo que leva em consideração o tempo para colisão e a distância segura de frenagem. O trabalho trata com detalhes o desenvolvimento de sistemas de advertência de colisão dianteira e simula de forma precisa o cenário de um veículo deslocando-se ao longo de uma autoestrada a velocidades que variam de zero a 120 km/h. Os resultados garantem a prevenção de colisões por meio de mensagens de advertência da distância segura de frenagem [Chen et al. 2013]. Shafiq et al. propõem um método para determinar a distância segura que deve ser mantida entre veículos em vias expressas, em função de sua velocidade. O método usa um algoritmo adaptativo que registra o tempo de frenagem do veículo a partir de uma determinada velocidade até o repouso. A partir do valor registrado, a distância segura é calculada e é alterada sempre que houver um evento de parada. Os testes de campo foram realizados na autoestrada Peshawar-Islamabad, no Paquistão, com velocidades variando de 50 a 170 km/h. Os resultados demonstram grande utilidade na prevenção de colisões, principalmente em caso de fadiga do condutor [Shafiq et al. 2014]. Zinchenko et al. avaliam o desempenho de aplicações Veículo Para Veículo (V2V) usando a faixa de frequências DSRC baseado em simulações com a ferramenta MATLAB e com base em dados de potência recebida e taxa de entrega de pacotes, obtidos em experimentos reais, resultantes da comunicação entre uma unidade móvel e unidades estacionárias em cruzamentos. O trabalho avalia a confiabilidade das aplicações de segurança V2V, ou seja, quão preciso é o sistema de segurança usando a faixa DSRC ao ponto de não comprometer a integridade dos ocupantes do veículo. Através de simulações os autores concluem que as condições de tráfego, a presença de vegetação ao longo das vias e a topologia dos cruzamentos devem ser considerados no projeto de aplicações V2V [Zinchenko et al. 2013].

Todos os trabalhos apresentados foram relevantes para a elaboração deste artigo. Porém, os que tratam especificamente de aplicações de segurança divergem da proposta deste trabalho ou por avaliarem o desempenho através de simulações ou por não usarem o GPS para determinar a distância segura de frenagem. Neste trabalho, é realizada uma avaliação experimental com equipamentos WAVE comerciais, de forma a complementar o estado da arte.

4. Aplicação para Cálculo da Distância Segura de Frenagem

A aplicação avaliada tem por objetivo alertar o condutor do veículo sobre a possibilidade de colisão dianteira com um veículo parado na mesma pista. O sistema consiste em obter do GPS da OBU a posição atual, a velocidade, a hora, incluindo outras informações do veículo, e codificar uma mensagem básica de segurança (BSM) usando o padrão ASN.1 para enviá-la a outros veículos no entorno. Estas mensagens são enviadas através do canal de controle DSRC 178 periodicamente, a cada 50 ms. A aplicação utilizada neste trabalho foi desenvolvida em linguagem C a partir do pacote de desenvolvimento (SDK – *Software Development Kit*) fornecido pela empresa Cohda Wireless [COHDA 2015], fabricante dos equipamentos usados nos experimentos.

Ao receber uma nova mensagem, a aplicação calcula a distância entre as unidades e a compara com a distância segura de frenagem, cujo componente principal é dado por $D_b(v)$, a distância necessária para parar completamente o veículo a partir de uma dada velocidade v . A distância $D_b(v)$ pode ser calculada da seguinte forma [Chen et al. 2013]:

$$D_b(v) = \frac{\gamma W}{2gC_{ae}} \ln\left(1 + \frac{C_{ae}v^2}{\eta(\mu + f_r)W \cos\theta + W \sin\theta}\right), \quad (1)$$

onde $C_{ae} = (\rho A_f C_d)/2$. A Tabela 1 mostra os demais parâmetros e valores usados no cálculo de $D_b(v)$.

Tabela 1. Parâmetros e valores usados para o cálculo de D_b

Parâmetro	Descrição	Valor usado
γ	Fator equivalente de massa	1,04 kgm^2
g	Aceleração da gravidade	9,80 m/s^2
ρ	Massa Específica do Ar	1,30 kg/m^3
A_f	Área Característica do Veículo	2,24 m^2
C_d	Coefficiente de Resistência Aerodinâmica	2,24 m^2
η	Eficiência do Freio	0,9
μ	Coefficiente de Atrito	0,75
f_r	Coefficiente de resistência de rolamento	1,04
W	Peso do veículo	1050 Kg
θ	Ângulo de inclinação da pista	0°

É necessário considerar ainda a distância percorrida correspondente ao tempo de resposta do condutor (D_r) e também a distância percorrida correspondente ao tempo de atuação efetiva do sistema de freio do veículo (D_p), após o acionamento do pedal pelo condutor [Chen et al. 2013]. Estes tempos variam dentro dos intervalos 0,74 a 1,7 s e 0,3 a 0,7 s, respectivamente. Assim, a distância segura de frenagem é a soma das três parcelas:

$$D_{segura} = D_b + D_r + D_p. \quad (2)$$

Os valores usados na aplicação foram 1 s para o tempo de resposta do condutor e 0,5 s para o tempo de atuação efetiva do freio. É importante destacar que não houve a preocupação em usar as Equações 1 e 2 com exatidão por não estar dentro do foco do trabalho. O cálculo estimado de D_{segura} não compromete a validade dos experimentos

que apresentarão resultados equivalentes quando da execução do cálculo com parâmetros reais. Portanto, parâmetros como γ , ρ , η , μ e f_r , foram configurados pelo valor médio das suas respectivas variações. Porém, na implementação real de uma aplicação ativa de segurança, fatores como a utilização de Sistema de Frenagem Anti-bloqueio (ABS – *Anti-lock Braking System*), condições do tempo que impliquem alterações do coeficiente de atrito da pista, visibilidade e a precisão de localização horizontal do GPS, relativa à latitude e à longitude, devem ser considerados. Quanto a esta última, podem ser usadas as técnicas Differential GPS (DGPS) e Carrier phase positioning (RTK) [Williams et al. 2012].

A unidade móvel atualiza a distância segura de frenagem em função da velocidade e com os valores da latitude e longitude fornecidos pelo GPS embarcado. Combinando esta informação com a informação recebida na BSM enviada pela unidade estacionária, a unidade móvel calcula a distância de aproximação usando a Equação 3, que é baseada na fórmula de *Haversine* [Ivis 2006]. Assim, a distância de aproximação é definida como:

$$D_{atual} = 2R * \arctan(\sqrt{a/1 - a}), \quad (3)$$

onde $a = (\text{sen}^2(\Delta\text{Lat}/2) + \cos(\text{Lat}A * C)\cos(\text{Lat}B * C)\text{sen}^2(\Delta\text{Lon}/2))$ $\Delta\text{Lat} = (\text{Lat}A - \text{Lat}B) * C$ e $\Delta\text{Lon} = (\text{Lon}A - \text{Lon}B) * C$, R é o raio da Terra em metros, C é uma constante igual a $\pi/180$.

A aplicação compara, a cada recebimento de uma mensagem BSM, a distância D_{atual} com a distância D_{segura} . Se o valor for menor, um alerta é disparado para o condutor iniciar a frenagem. Foi observado nos experimentos que a taxa de atualização do GPS é responsável pelo erro na geração do alerta de colisão. Considerando a taxa de atualização do GPS de 200 ms adotada nos experimentos, é possível que o alerta ocorra após o veículo percorrer distâncias que variam de 1,1 a 8,3 metros, correspondentes a velocidades de aproximação variando entre 20 a 150 km/h. Essas distâncias podem ser maiores caso haja quebra na sequência de recebimento de mensagens devido a perda de pacotes. Portanto, torna-se importante corrigir a imprecisão inserida pela taxa de atualização do GPS.

4.1. Algoritmo de Correção de Alerta de Colisão - ACORA

Para minimizar a influência da taxa de atualização do GPS foi proposto o Algoritmo de Correção de Alerta de Colisão (ACORA), que antecipa o alerta de distância segura de frenagem em função da taxa de atualização do GPS. A ideia é antecipar o alerta de distância segura de frenagem em função da própria taxa de atualização do GPS.

Para mostrar o funcionamento do ACORA, foi selecionado um trecho de um dos experimentos descritos nas seções a seguir, uma parte da passagem de número 13 da sessão de 40 km/h. A Figura 3 ilustra esta medição. No eixo X, o gráfico mostra o instante de tempo do experimento, normalizado em uma janela de 900 ms. No eixo Y, o gráfico mostra a distância em metros. A curva azul, em forma de escada, representa a distância entre a unidade móvel e a unidade estacionária e os pontos azuis correspondem aos instantes de recebimento das BSMs. A curva vermelha, tracejada, representa a distância segura de frenagem e os pontos vermelhos correspondem, também, aos instantes de recebimento das BSMs. Os pontos A, B, C e D correspondem aos instantes de atualização das coordenadas e da velocidade pelo GPS.

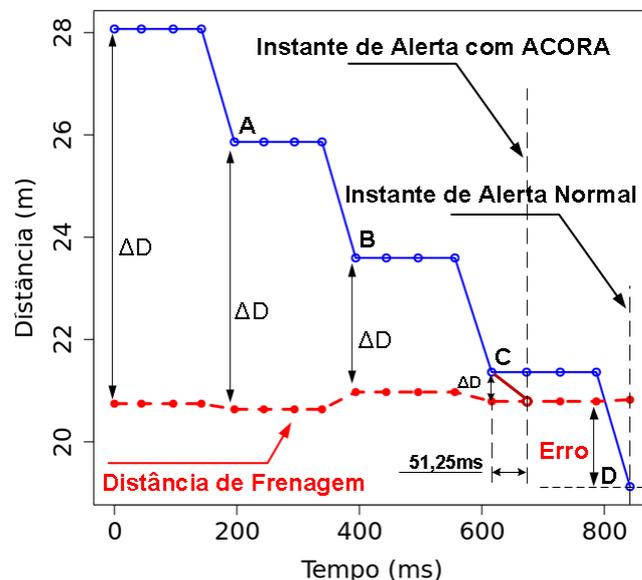


Figura 3. Processo de Correção de Erro executado pelo ACORA.

A cada BSM recebida pela unidade móvel a aplicação calcula a distância entre as unidades (D_{atual}) usando a Equação 3 e calcula a Distância de Frenagem (D_{segura}), usando a Equação 2, sendo esta última em função da velocidade e a primeira em função das coordenadas geográficas, ambas, fornecidas pelo GPS. Observa-se que no intervalo de tempo entre o ponto A e o ponto B são recebidas 4 mensagens com as mesmas coordenadas, embora a unidade móvel esteja em movimento. Este intervalo "cego" é repetido a partir dos pontos B e C, provocando a atualização da posição no ponto D, após a unidade móvel ultrapassar a distância segura de frenagem, gerando o erro mostrado na Figura 3. Este evento ocorre no ponto D no instante de tempo normalizado 846 ms, gerando um erro de aproximadamente 1,70 m.

O ACORA usa o mesmo procedimento anterior, porém, a cada BSM recebida o ACORA avalia a diferença ΔD entre a a posição atual e a distância segura de frenagem e calcula o tempo necessário para alcançar a distância de frenagem em função da velocidade atual. Se o intervalo de tempo obtido (Δt) for menor que a taxa de atualização do GPS, uma temporização de Δt s é gerada e, em seguida, é disparado o alerta de colisão (Algoritmo 1). O ponto C corresponde ao instante de tempo normalizado 616 ms no qual Δt (51,25 ms) é menor que t_{GPS} (200 ms). O alerta é disparado no instante de tempo 667 ms, corrigindo o erro que, sem a aplicação do ACORA, seria disparado somente no instante de tempo 846 ms, correspondente ao ponto D.

É importante observar que a precisão do ACORA depende da invariabilidade da velocidade durante o intervalo de temporização. Em outras palavras, o algoritmo assume que a velocidade é constante durante o intervalo de temporização. Caso Δv seja zero, o ACORA garante erro nulo. Considerando uma aceleração de 0 a 100 km/h em 3,6 s durante um intervalo de tempo t_{GPS} de 200 ms, o erro do ACORA seria de 15 cm. Ou seja, o erro seria desprezível e ainda assim, considerando uma aceleração 0-100 km/h só

Algorithm 1: Algoritmo de Correção de Alerta de Colisão - ACORA.

Entrada: taxa de atualização do GPS (t_{GPS}), distância entre as unidades (D_{atual}), distância segura calculada (D_{segura}), velocidade atual (v)

Saída: Temporização para alerta

inicio

$$\Delta D = D_{atual} - D_{segura}$$

$$\Delta t = \Delta D / v$$

se $\Delta t \leq t_{GPS}$ **então**

| Agendar emissão de alerta em Δt s

fim

fin

alcançada por veículos superesportivos.

5. Metodologia

A avaliação do desempenho da aplicação foi baseada em experimentos de campo realizados na Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), no campus situado na Ilha do Fundão, conforme mostrado na Figura 4. O cenário de avaliação da aplicação consistiu de uma unidade estacionária montada à margem da via e uma unidade móvel montada em um veículo que partia do repouso do ponto B para o ponto A.



Figura 4. Local dos experimentos - Campus da UFRJ (Fonte: Google Earth).

O ponto A corresponde à unidade estacionária, montada na borda da via, equipada com os dispositivos mostrados na Tabela 2. Nesta unidade, as antenas foram instaladas a uma altura de 1,40 m e foi executada uma aplicação para envio contínuo de BSMs a cada 50 ms no canal DSRC 178.

O ponto B corresponde à unidade móvel, montada em um automóvel Peugeot 206 ano 2008, cujas características aerodinâmicas e dimensionais estão contempladas nos parâmetros usados para a configuração da aplicação. As antenas, nesta unidade, foram instaladas no teto do automóvel e a bateria selada foi substituída pela bateria do veículo. Os demais dispositivos equipados na unidade móvel são idênticos aos usados na unidade estacionária.

Tabela 2. Unidade Estacionária.

Item	Descrição
OBU	Unidade de bordo marca Cohda Wireless modelo MK5, equipada com dois rádios DSRC e GPS U-blox M8N
Antena DSRC	2 x 5,9 GHz Omnidirecional MobileMark ECO6-5500e
Antena GPS	1 x WELL-HOPE GPS/GLON-09B
Computador	Notebook Sony VAIO modelo PCG 4Q5P
Bateria	12VDC/7Ah Marca First Power selada
Configuração da OBU	Canal DSRC: 178, Potência de transmissão: 20 dBm, Taxa de dados: 6 Mbps, Tamanho da mensagem: 51 bytes, Taxa de envio de mensagens BSM: 50 ms, Taxa de atualização do GPS: 200 ms

Os experimentos foram realizados no período da manhã, com céu claro, poucas nuvens, temperatura variando entre 23 e 29°C e umidade relativa do ar variando entre 66 e 88% com pouco tráfego de veículos no local, pois os experimentos foram realizados aos sábados, quando o campus da universidade está mais vazio.

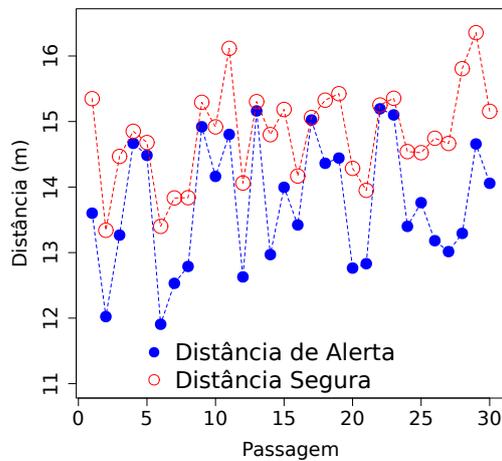
5.1. Procedimento Experimental

Foram realizadas cinco sessões experimentais correspondentes às velocidades médias de 20, 30, 40, 50 e 60 km/h. A sessão correspondente a velocidade de 20 km/h foi suprimida do artigo por ser considerada muito baixa para uma aplicação ativa de segurança. Em cada sessão foram feitas 30 passagens, armazenando as BSMs enviadas pela unidade estacionária. Como mencionado anteriormente, o padrão SAE J2735 especifica o envio de BSMs a cada 100 ms no mínimo. Nos experimentos realizados, as OBUs enviavam mensagens a cada 50 ms. A Figura 5 mostra o conteúdo de uma BSM, enviada pelo canal de controle usando o protocolo WSMP.

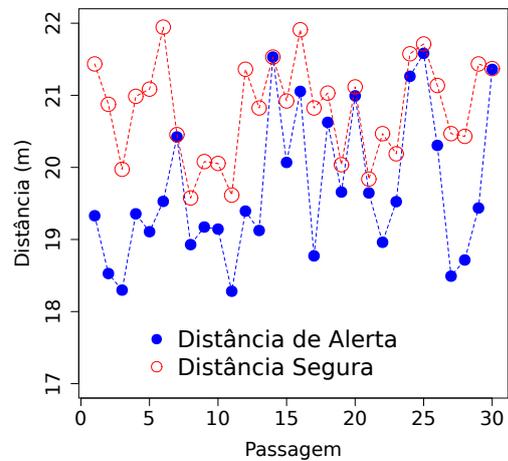
```
<BasicSafetyMessage>
  <msgID><basicSafetyMessage/></msgID>
  <blob1>
    74 2E 7C 0E 21 AB E0 F2 5E FC 6C E6 3C 8F 5C 00
    63 FF FF FF FF 2B D0 2D 7F 05 00 8C 00 1E 14 00
    AF 00 00 32 C1 A4
  </blob1>
  <safetyExt>
    <events>256</events>
  </safetyExt>
</BasicSafetyMessage>
```

Figura 5. Exemplo de uma mensagem BSM enviada periodicamente pelas OBUs.

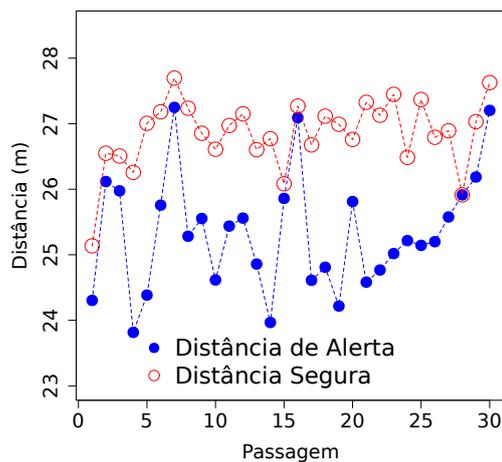
A cadeia de caracteres (`blob1`) contém, entre outras informações, a identificação da mensagem (74 / 116), a estampa de tempo (AB E0 / 4400 ms), a latitude (F2 5E FC 6C / -22.8656020), a longitude (E6 3C 8F 5C / -43.2238756), a altitude (00 63 / 9,9 m), a velocidade (2B D0 / 11,216 m/s), o rumo (2D 7F / 145,8824 graus) e as dimensões do veículo (32 C1 A4 / 3,3263 m²), destacadas na Figura 5.



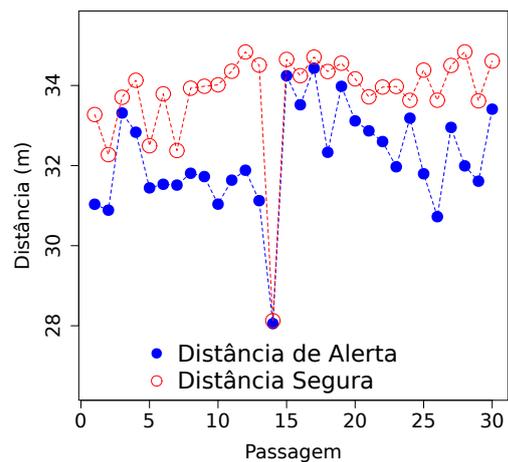
(a) 30 km/h



(b) 40 km/h



(c) 50 km/h



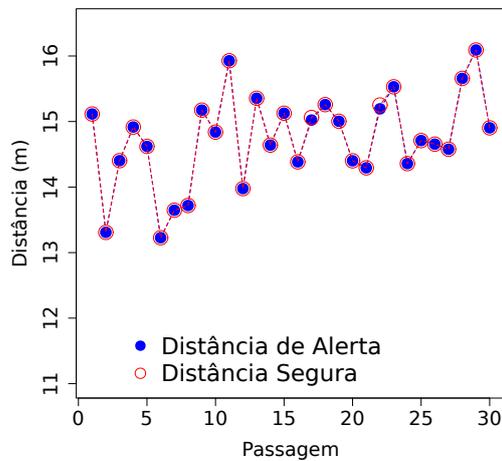
(d) 60 km/h

Figura 6. Distância de Alerta vs. Distância Segura de Freinagem s/ ACORA

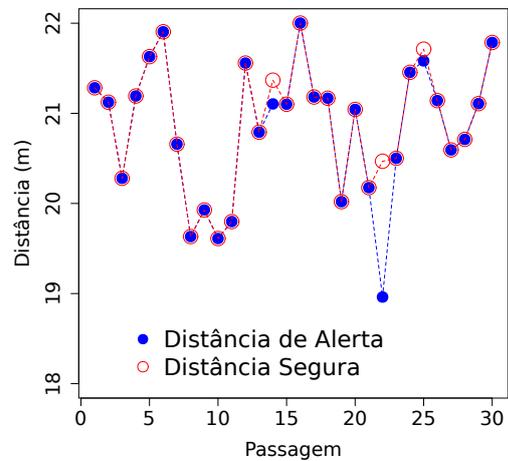
6. Resultados

Para análise dos resultados são apresentados nas Figuras 6 e 7 os gráficos correspondentes a distância de frenagem e a distância de disparo do alerta, sobrepostas, para cada uma das 30 passagens do experimento. Nos gráficos que relacionam valores médios (Fig. 8), foram inseridos intervalos de confiança de 95%, correspondentes à distribuição de Student para 30 amostras e representados por meio de barras de erro verticais.

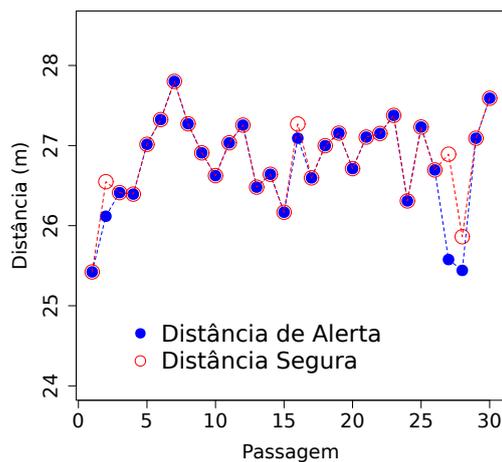
A Figura 6 mostra a comparação entre a distância de alerta calculada pela aplicação e a distância de frenagem sem a aplicação do ACORA. Podem ser observados erros significativos para todas as velocidades de forma aleatória, sem um padrão definido. Observa-se maior incidência para as velocidades maiores (50 e 60 km/h). Estes erros foram suprimidos pelo ACORA, conforme mostra a Figura 7, totalmente para a velocidade de 30 km/h e forma parcial para as demais velocidades.



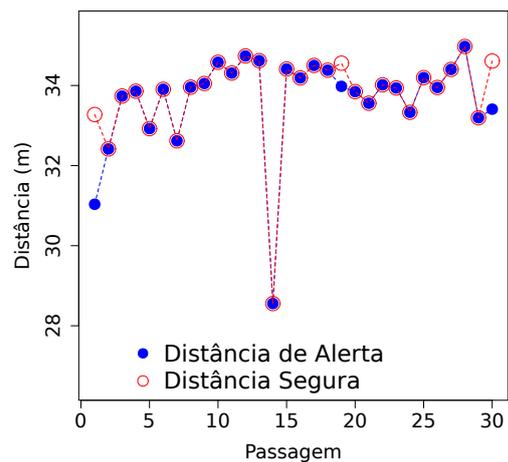
(a) 30 km/h



(b) 40 km/h



(c) 50 km/h



(d) 60 km/h

Figura 7. Distância de Alerta vs. Distância Segura de Frenagem c/ ACORA

A análise do erro médio absoluto em função da velocidade (Figura 8(a)), para a aplicação sem o ACORA, revela uma tendência crescente, já esperada devido à relação de proporcionalidade direta entre a distância de frenagem e a velocidade, alcançando o valor de 1,5 m para a velocidade de 60 km/h. Com a aplicação do ACORA, o erro médio absoluto foi minimizado em todas as velocidades para valores abaixo de 15 cm, demonstrando a eficiência do algoritmo ACORA, independentemente da velocidade.

A Figura 8(b) mostra a variação do erro médio relativo com a velocidade. Pode-se observar o comportamento inverso em relação ao erro absoluto para a aplicação sem o ACORA. Esta tendência decrescente é justificada pela proporcionalidade indireta entre o erro relativo e a distância de frenagem. Os resultados obtidos com o ACORA reduziram a margem de erro relativo médio abaixo do patamar de 1%, para todas as velocidades usadas do experimento. A Figura 8(b) mostra também que o erro médio relativo é maior

quando há maior dispersão dos valores em relação à média por conta dos erros que o ACORA não corrigiu.

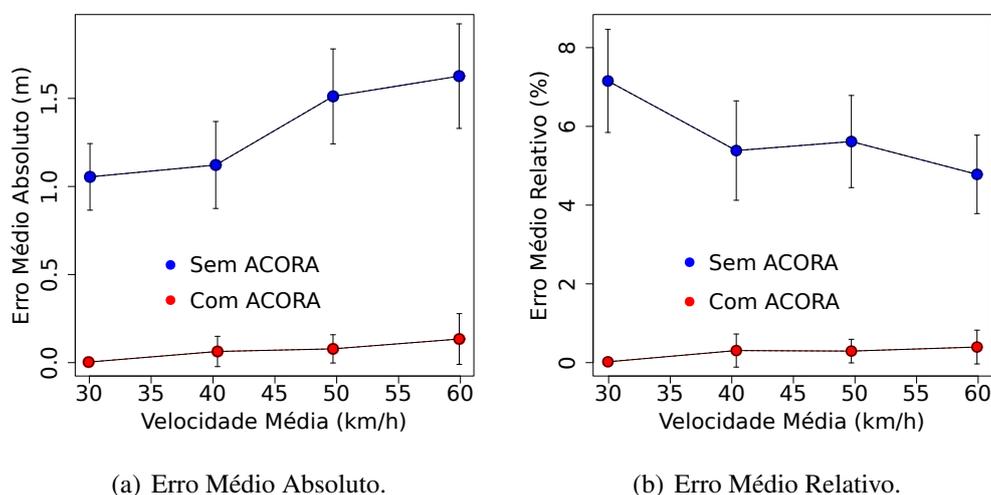


Figura 8. Erro médio com e sem utilização do ACORA.

Embora os erros médios absoluto e relativo sejam de grande relevância na avaliação do desempenho do ACORA, também deve ser considerado para uma aplicação ativa de segurança o erro máximo absoluto em função da velocidade, devido à natureza dinâmica do cálculo da distância segura de frenagem. A Tabela 3 mostra o erro máximo absoluto, em metros, medido em cada sessão do experimento com e sem a aplicação do ACORA e compara ambos com o valor teórico máximo correspondente à atual taxa de atualização do GPS. Com a aplicação do ACORA o erro máximo absoluto foi deslocado para dentro da faixa de erro máximo teórico.

Tabela 3. Erro Máximo em função da velocidade (m).

	30 km/h	40 km/h	50 km/h	60km/h
Sem o ACORA	2,513	2,416	2,803	3,384
Com o ACORA	0,058	1,506	1,315	2,240
Teórico ($t_{GPS} * v$)	1,66	2,22	2,77	3,33

Em altas velocidades o confinamento das correções feitas pelo ACORA dentro dos limites teóricos de erro podem ser inadmissíveis para aplicações ativas de segurança. Analisando as passagens onde o ACORA não corrigiu os erros foi observado que estes eventos ocorreram para valores de Δt próximos à taxa de atualização do GPS que podem ser corrigido com a adoção do fator de correção K (Equação 4),

$$\Delta t \leq K.t_{GPS}, \quad (4)$$

dependente da aceleração do veículo. Para um valor de $K = 1.5$, por exemplo, a velocidade do veículo teria que dobrar de valor durante o período de atualização do GPS para evitar a ação do ACORA.

A queda acentuada no erro médio com ACORA na sessão de 30 km/h foi provocada pela correção de todos os erros relevantes da sessão, o que demonstrou o excelente desempenho do algoritmo nesta sessão. É importante registrar que não houve perda de mensagens ou mensagens recebidas fora de ordem em nenhuma das sessões.

7. Conclusão e Trabalhos Futuros

Este trabalho avaliou o desempenho de uma aplicação de alerta de colisão dianteira utilizando equipamentos comerciais compatíveis com a arquitetura WAVE e propôs um algoritmo de correção de erro, o ACORA. Os resultados, fundamentados nas métricas apresentadas, mostraram que a eficiência e a confiabilidade da aplicação, sem a atuação do ACORA, estariam comprometidas. Assim, pôde-se mostrar que graças ao uso do ACORA é possível a inclusão do GPS como dispositivo sensor de proximidade, substituindo sensores ultrassônicos e sensores a laser em aplicações ativas de segurança. Além disso, a possibilidade de utilização do GPS traz benefícios pela dispensa de ter que acrescentar equipamentos de medição de distância às OBU's. A margem de erro médio relativo abaixo de 1% alcançada com o ACORA, garante a confiabilidade da Aplicação de Alerta de Colisão Dianteira usando a tecnologia WAVE/DSRC.

Como trabalhos futuros, serão realizadas novas sessões de experimentos com o GPS configurado com taxa de atualização de 10 Hz e a inclusão do fator de correção K para avaliar a influência no desempenho do ACORA. Com base nos dados dos experimentos, será elaborado um modelo para avaliar a influência da densidade de veículos na precisão da aplicação devido ao aumento da latência e aumento da probabilidade de perda de mensagens, além de avaliar, também, o desempenho do ACORA em velocidades mais altas. Pretende-se ainda realizar novos experimentos para considerar condições de tempo adversas, ausência de linha de visada e bloqueio do sinal de GPS, em regiões arborizadas ou túneis.

Agradecimentos

Este trabalho foi parcialmente financiado pelo projeto IMI: Infraestrutura Móvel Inteligente baseada em Redes Celulares e Veiculares – FAPERJ, pelo CNPq, CAPES e FAPERÓ.

Referências

- Alves, R. S. A., Campbell, I. V., Couto, R. S., Campista, M. E. M., Moraes, I. M., Rubinstein, M. G. C., K., L. H. M., Duarte, O. C. M. B., and Abdalla, M. (2009). Redes veiculares: Princípios, aplicações e desafios. In *Minicursos do Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores - SBRC'2009*, pp. 199-254.
- Chen, Y.-L., Shen, K.-Y., and Wang, S.-C. (2013). Forward collision warning system considering both time-to-collision and safety braking distance. In *Industrial Electronics and Applications (ICIEA), 2013 8th IEEE Conference on*, pp. 972-977.
- COHDA (2015). Cohda Mobility MKx SDK. Disponível em <http://cohdawireless.com/Portals/0/PDFs/CohdaWirelessMKXSDK.pdf>, acessado em novembro de 2015. COHDA Wireless Pty, Ltd.
- Hartenstein, H. and Laberteaux, K. (2009). *VANET Vehicular Applications and Inter-Networking Technologies*. Intelligent Transport Systems. Wiley, 1ª ed.

- Hill, C. (2015). ITS ePrimer Module 13: Connected Vehicles. Disponível em <https://www.pcb.its.dot.gov/eprimer/module13.aspx#dsrc>, acessado em dezembro de 2015. United States Department of Transportation.
- Ivis, F. (2006). Calculating geographic distance: Concepts and methods. Disponível em <http://www.lexjansen.com/nesug/nesug06/dm/da15.pdf>, acessado em novembro de 2015. Canadian Institute for Health Information.
- Kelley, D. (2015). DSRC implementation guide. Disponível em <http://www.sae.org/standardsdev/dsrc/DSRCImplementationGuide.pdf>, acessado em dezembro de 2015. SAE International.
- Li, Y. J. (2012). *Quality, Reliability, Security and Robustness in Heterogeneous Networks: 7th International Conference on Heterogeneous Networking for Quality, Reliability, Security and Robustness, QShine 2010, and Dedicated Short Range Communications Workshop, DSRC 2010, Houston, TX, USA, November 17-19, 2010, Revised Selected Papers*, chapter An Overview of the DSRC/WAVE Technology, pages 544–558. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg.
- Missener, J. and Kelley, D. (2015). ASN.1 Specification - Official normative ASN.1 of the SAE J2735. Disponível em http://www.sae.org/standardsdev/dsrc/usa/J2735_R41a_Source.zip, acessado em novembro de 2015. SAE International.
- Shafiq, Z., Khan, L. U., Mahmud, S. A., and Khan, G. M. (2014). Context-aware cooperative collision avoidance vehicle braking alert system for VANET. In *Proceedings of the 3rd International Conference on Context-Aware Systems and Applications, IC-CASA '14, ICST, Brussels, Belgium*, pp. 92-96.
- Tsai, M.-F., Chao, Y.-C., Chen, L.-W., Chilamkurti, N., and Rho, S. (2015). Cooperative emergency braking warning system in vehicular networks. *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, 2015(1):1–14.
- Williams, T., Alves, P., Lachapelle, G., and Basnayake, C. (2012). Evaluation of gps-based methods of relative positioning for automotive safety applications. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 23:98 – 108.
- Zhang, Y., Yang, L., and Ma, J. (2008). *Unlicensed Mobile Access Technology: Protocols, Architectures, Security, Standards and Applications*. Wireless Networks and Mobile Communications. CRC Press, 1^a ed.
- Zinchenko, T., Tchouankem, H., Wolf, L., and Leschke, A. (2013). Reliability analysis of vehicle-to-vehicle applications based on real world measurements. In *Proceeding of the Tenth ACM International Workshop on Vehicular Inter-networking, Systems, and Applications, VANET '13*. ACM, pp. 11-20.