

SIMULAÇÃO DE FRENAGEM DE VEÍCULOS COM MOTORISTAS, VEÍCULOS AUTÔNOMOS E VEÍCULOS COLABORATIVOS¹

Carlos Renato Borges dos Santos²

RESUMO

Os desafios enfrentados pelos veículos autônomos nos quesitos localização, navegação, detecção de obstáculos e segurança ainda necessitam de soluções, permitindo um vasto campo para estudos e pesquisas. A gradual inserção de veículos autônomos nas vias de trânsito aumentará o número de encontros entre esses veículos, tornando viável a comunicação entre os mesmos, designada V2V (*vehicle to vehicle*). Este trabalho realiza uma revisão bibliográfica sobre a colaboração veicular e mostra os resultados da simulação de cenários de frenagem, com o objetivo de comparar os efeitos do tempo de reação de veículos comuns, veículos autônomos e veículos colaborativos. Utilizou-se o Matlab para realizar simulações de pelotões de veículos andando em fila única. Os resultados de simulação mostram a influência do tempo de reação e de transmissão da mensagem na tentativa de evitar colisões.

Palavras-chave: Colaboração veicular. Frenagem de emergência. Simulação. Veículos autônomos.

SIMULATION OF BRAKING VEHICLES WITH DRIVERS, AUTONOMOUS VEHICLES AND COLLABORATIVE VEHICLES

ABSTRACT

The challenges faced by autonomous vehicles in terms of location, navigation, detection of obstacles and safety still need solutions, allowing a vast field for studies and research. The gradual insertion of autonomous vehicles on traffic routes will increase the number of encounters between these vehicles, making communication between them viable, known as V2V (*vehicle to vehicle*). This work performs a literature review on vehicular collaboration and shows the simulation results of braking scenarios, in order to compare the reaction time effects of common vehicles, autonomous vehicles and collaborative vehicles. Matlab was used to carry out vehicles platoon simulations traveling in a single file. The simulation results show the influence of reaction time and message transmission in an attempt to avoid collisions.

Keywords: Autonomous vehicles. Emergency braking. Simulation. Vehicular collaboration.

¹ **Como citar este artigo:**

SANTOS, C. R. B. dos. Simulação de frenagem de veículos com motoristas, veículos autônomos e veículos colaborativos. *ForScience*, Formiga, v. 10, n. 1, e00905, jan./jun. 2022. DOI: 10.29069/forscience.2022v10n1.e905.

² **Autor para correspondência:** Carlos Renato Borges dos Santos, santoscrb@gmail.com

1 INTRODUÇÃO

A *percepção sensorial* veicular trata de sensores e de algoritmos que detectam obstáculos e os identificam a partir de determinados padrões pré-estabelecidos. Por outro lado, a *percepção estendida* trata do envio dos dados de percepção a outros veículos por transmissores sem fio. Muito embora o envio da maior quantidade de dados possa maximizar a percepção estendida, a largura de banda do canal, quantidade de veículos colaborativos e tempo de processamento são alguns dos problemas enfrentados, o que necessita de estratégias de compartilhamento da percepção.

Num nível de complexidade ainda mais elevado, a *colaboração veicular* estende a capacidade de apenas transmitir dados para realizar interações entre as decisões veiculares. A colaboração veicular relaciona-se à capacidade de receber os dados disponíveis (recebidos), processá-los, tomando-se decisões em que todos os veículos envolvidos não colidam. Dessa forma, a colaboração veicular trata das estratégias tomadas coletivamente a partir das informações compartilhadas. A colaboração entre veículos não se limita apenas na transmissão (por *broadcast*) de dados de percepção local, mas pode ser adicionada à estratégia de mudar trajetórias de forma ordenada, em que cada veículo saiba a estratégia dos demais, com o intuito de evitar colisões ou manobras bruscas.

A estrutura deste trabalho é composta por uma revisão bibliográfica sobre veículos colaborativos, apontando alguns estudos relevantes para o tema proposto. A seguir são apresentados dois cenários de simulação: a frenagem de emergência (em que o veículo mais à frente inicia o procedimento de frenagem e, a partir disso, os outros veículos iniciam seus procedimentos) e a parede de tijolos (em que hipoteticamente o veículo mais à frente tenha uma mudança imediata de velocidade e os demais veículos iniciam seus procedimentos), em que os veículos teriam menos tempo para evitar colisões.

2 REVISÃO SOBRE OS ASPECTOS COLABORATIVOS

O veículo autônomo é considerado uma tecnologia promissora com potencial para remodelar a mobilidade e solucionar diversos problemas de tráfego, como acessibilidade, eficiência, conveniência e principalmente segurança (ZHAO et al., 2021).

Para Malik, Khan e El-Sayed (2021), os veículos autônomos ocuparão as estradas mais cedo do que o esperado, necessitando da cooperação entre os mesmos no que tange o sensoria-mento cooperativo e às manobras cooperativas.

Uma vez recebidos os dados de outros veículos, os limites temporal e espacial consistem no tempo e distância em que os dados devem ser memorizados para serem transmitidos aos veículos das proximidades. Esses limites devem ser definidos na colaboração.

A informação armazenada pode conter erros de localização do obstáculo, caso este se mova de forma imprevisível. Por outro lado, armazenar uma informação sobre um acidente ou sobre as condições da rodovia pode ser relevante na colaboração veicular. Para a transmissão de dados armazenados deve haver um algoritmo inteligente que saiba distinguir um obstáculo de um evento potencialmente perigoso a outros veículos desinformados.

2.1 Percepção estendida

Chama-se de percepção estendida quando a percepção de objetos é compartilhada entre dois ou mais veículos. Neste caso, o compartilhamento da informação sobre o obstáculo pode ser crucial para evitar uma colisão. Uma forma de comunicar os veículos é a utilização de VANETs (*Vehicular ad hoc networks*), que são redes em que cada veículo reconhece os demais de forma dinâmica. Essas redes trazem um grande desafio e interesse para as áreas acadêmica e comercial (FERREIRA; BRAZ; CAMPOS, 2014). Diferentemente das redes intraveiculares CAN (*Controller Area Network*), mostradas por Santos (2010), em que há redes cabeadas e controle do fluxo de dados, as redes sem fio apresentam diversos problemas que não estão presentes nas redes cabeadas, como por exemplo, a possibilidade de transmissão num mesmo canal no mesmo instante (colisão de dados), ou mesmo uma invasão por hackers. Visando reduzir o congestionamento das vias e minimizar o número de acidentes de trânsito, a pesquisa em veículos autônomos e em redes veiculares tem aumentado nos últimos anos.

O IEEE 802 (2019) estabelece a padronização de comunicação sem fio de redes locais e metropolitanas. Segundo Alves et al. (2009), desde 2004 o IEEE (*Institute of Electrical and Electronic Engineers*) vem trabalhando na padronização de comunicação chamada de protocolo 802.11p, ou também conhecida como WAVE (*Wireless Access in the Vehicular Environment*). O artigo de Deeksha, Kumar e Bansal (2017) realiza uma revisão sobre VANETs apresentando os principais desafios sobre as questões de segurança nos dias atuais. Já o artigo de Patel, Khatiwala e Reshamwala (2017) reforça a questão da segurança sobre invasores em VANETs, podendo alterar informações sobre o tráfego, combustível, etc, reforçando a confiabilidade do sistema a partir da autenticação das mensagens. A preocupação com a segurança é estendida a trabalhos realizados há mais tempo, como o trabalho de Wang, Huang e Chen (2007), que se preocupa com a segurança das VANETs e propõe um modelo que possa garantir que informações críticas vitais não possam ser modificadas por um invasor, mantendo e protegendo a privacidade dos condutores e passageiros. De uma maneira geral, a preocupação com a segurança justifica-se porque o invasor pode, em teoria, controlar qualquer parte do sistema veicular autônomo, causando acidentes. Todavia, este não será tema de discussão deste trabalho.

Adicionalmente à segurança, há outras preocupações, como por exemplo, o desempe-

no. O artigo apresentado por [Waleed e Weihua \(2010\)](#) apresenta uma avaliação do desempenho do protocolo IEEE 802.11p, revelando o estudo sobre as métricas de desempenho básicas, tais como taxa de entrega de pacotes, taxa de transferência, e atrasos. Destacam-se alguns pontos em que ainda não houve de fato um consenso, como por exemplo, a dualidade entre segurança da informação utilizando-se cabeçalhos e criptografia e a necessidade de redução do tempo de processamento da informação. Neste caso, quanto mais segura a informação compartilhada entre veículos, maior será o seu processamento, gerando atrasos que podem ser cruciais para evitar uma colisão.

2.2 Percepção colaborativa

Os condutores de veículos agem como indivíduos independentes seguindo seus próprios destinos. A interação com outros participantes do tráfego é realizada a partir de uma sequência de decisões individuais ([FRESE; BEYERER; ZIMMER, 2007](#)). Já nos veículos autônomos dotados de comunicação, o gerenciamento do tráfego pode ser realizado de uma forma colaborativa, de forma que todos possam conhecer não apenas os obstáculos, mas suas trajetórias.

À medida que a presença dos veículos autônomos cresce nas ruas, encontros entre estes são cada vez mais frequentes, logo algum tipo de interação entre eles deverá ocorrer, e a melhor forma encontrada é por meio da transmissão sem fio. Em sistemas cooperativos, cada veículo compartilha dados obtidos pela percepção de seus sensores, tais como radar ou LiDAR (*Light Detection and Ranging*), por meio da comunicação sem fio ([RAUCH; KLANNER; DIETMAYER, 2011](#)). O LiDAR é um dispositivo que realiza uma varredura do ambiente por feixes de LASER.

O trabalho de [Merino \(2007\)](#) trata da cooperação na percepção, ou seja, a *percepção cooperativa*. Segundo o autor, a *percepção cooperativa* pode ser definida como a colaboração entre uma frota de robôs para estimar o ambiente, através do compartilhamento de informações ou até mesmo através do desenvolvimento de ações de cooperação. Decisões que envolvam a cooperação entre todos os indivíduos de um grupo necessitam do compartilhamento de informações de cada indivíduo. Em casos de emergência, é necessário identificar qual é o indivíduo mais susceptível ao evento e como agir de forma cooperativa, coordenada, para retirá-lo do perigo sem expor os demais a este ou a outros perigos. Incontáveis cenários de perigo poderiam ser mostrados neste trabalho, por isso seria impossível imaginar todas as possíveis situações de perigo, ainda que a informação enviada não sofresse atrasos durante o compartilhamento. O atraso na recepção da informação também é um problema em situações compartilhadas.

2.2.1 V2V utilizando a luz

Atualmente usa-se em diversos experimentos o protocolo IEEE 802.11p (AMADEO; CAMPOLO; MOLINARO, 2012), outros utilizam o padrão XBee, como mostrado por Hamdi et al. (2021), ao passo que estudos mais específicos utilizam a luz, como o estudo de Chassagne (2016), que investiga a utilização de LEDs na comunicação e na medição de distâncias, conforme mostrado na Figura 1, em que é mostrada a comunicação do veículo à esquerda com a infraestrutura (I2V) e, entre os veículos, por meio dos faróis.

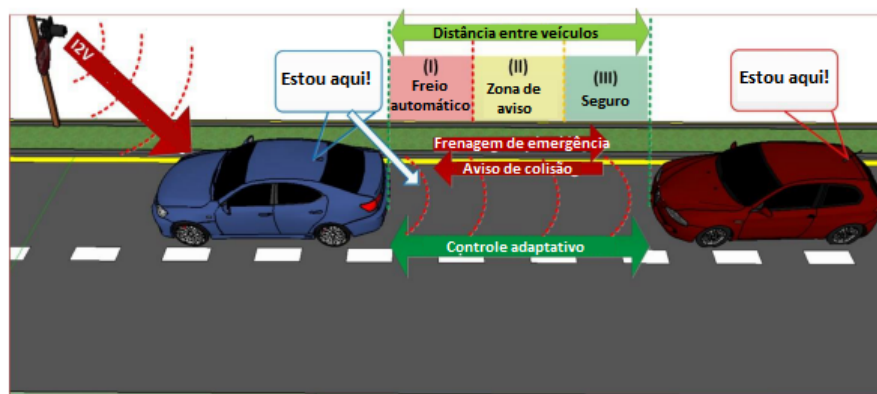


Figura 1 – Caso típico de aplicação da comunicação veicular por luz.

Fonte: (CHASSAGNE, 2016), com adaptações.

Nota-se que a aplicação dessa tecnologia é voltada para curtas distâncias, uma vez que o erro aumenta significativamente a partir de 20 metros, conforme visto na Figura 2 (CHASSAGNE, 2016; BÉCHADERGUE; CHASSAGNE; GUAN, 2017).

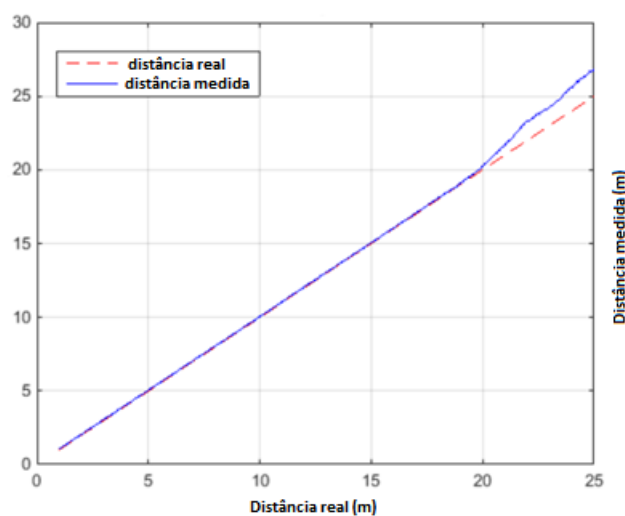


Figura 2 – Distância real e a medida por meio das luzes dos faróis de um veículo.

Fonte: (CHASSAGNE, 2016), com adaptações.

2.2.2 Comunicação V2V utilizando transceptores

Atualmente existem diversas tecnologias capazes de aumentar a capacidade do veículo ou mesmo do motorista em reagir adequadamente, em especial nos casos de emergência. Em contrapartida, ainda há um vasto campo de estudo do potencial de ações de grupos de veículos coordenados em situações perigosas (FRESE; BEYERER; ZIMMER, 2007).

Muitos trabalhos apresentam diferentes arquiteturas para a percepção veicular. Em arquiteturas com baixo nível de fusão, dados brutos (com pouco ou nenhum processamento) oriundos de diferentes sensores são enviados para uma unidade global de fusão. Dados brutos requerem elevada largura de banda do canal de transmissão (RAUCH et al., 2012).

Pode-se considerar que uma situação de emergência inicia-se com a detecção de algum obstáculo e uma mudança repentina da trajetória ou da velocidade de um veículo. O veículo responsável pela detecção e mudança de trajetória deve, neste momento, alertar aos demais e, se possível, calcular mudanças de velocidade e/ou trajetórias baseando-se nas informações compartilhadas, também chamadas de *common relevant picture* (CRP) (FRESE; BEYERER; ZIMMER, 2007).

O artigo de Demmel, Gruyer e Rakotonirainy (2010) analisa os sistemas cooperativos, suas vantagens e contribuições na segurança em rodovias, expondo algumas limitações relativas à penetração dessa tecnologia no mercado de veículos, à precisão dos sensores e à extensão da comunicação, embora algumas das tecnologias descritas já possam estar bem mais desenvolvidas atualmente. A Figura 3 apresenta a capacidade de aplicação dos sistemas cooperativos em função do tempo, desde alguns minutos antes de uma colisão até alguns instantes após.

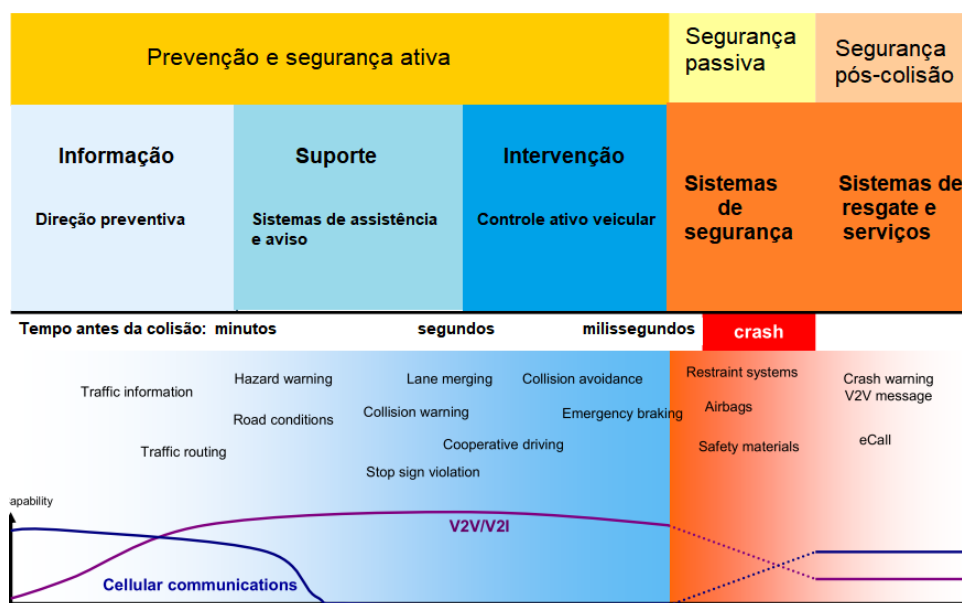


Figura 3 – Potencial de aplicação dos sistemas cooperativos.

Fonte: (DEMMELE; GRUYER; RAKOTONIRAINY, 2010), com adaptações.

2.3 A latência de transmissão

A comunicação pode ser definida como uma combinação entre *hardware* e protocolo de comunicação. Um dos parâmetros mais importantes é a latência de transmissão (RAUCH; KLANNER; DIETMAYER, 2011). A latência de transmissão pode ser entendida como um atraso ocorrido para que o receptor receba os dados do transmissor. Essa espera ocorre em decorrência da multiplexação do canal, tanto no tempo como na frequência; este limita a largura de banda, e aquele, o intervalo de tempo em que os dados podem ser transmitidos.

O desempenho dos sistemas de percepção cooperativos depende da latência de transmissão. O estudo apresentado por Rauch, Klanner e Dietmayer (2011) apresenta uma solução baseada no IEEE 802.11p. A Figura 4 apresenta a cadeia de processamento de dados, no tempo, em que $t_{cp,2}$ é o tempo de processamento da percepção colaborativa, $t_{ip,1}$ é o tempo de percepção do veículo 1, $t_{ip,2}$ é o tempo de percepção do veículo 2, $t_{i,1}$ é o tempo de sincronização do veículo 1, $t_{i,2}$ é o tempo de sincronização do veículo 2 e t_c é o tempo de transmissão V2X (*Vehicle-to-everything Communication*).

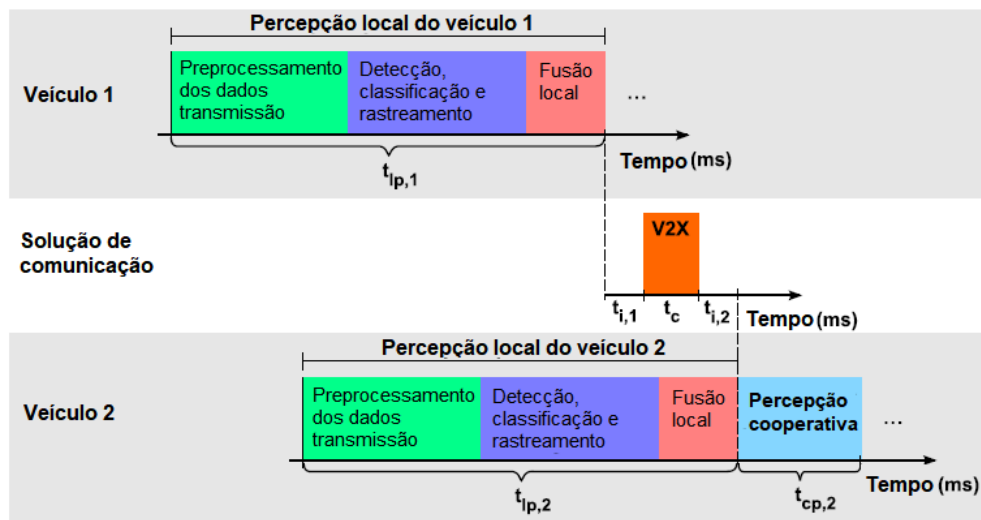


Figura 4 – Cadeia de processamento de tempos de medição à percepção cooperativa.

Fonte: (RAUCH; KLANNER; DIETMAYER, 2011), com adaptações.

Na Figura 4 pode-se determinar a Equação 1.

$$t_{tm} = t_{i,1} + t_c + t_{i,2} \quad (1)$$

onde t_{tm} é o tempo total de transmissão.

Segundo Rauch, Klanner e Dietmayer (2011), o tempo de percepção (t_{ip}) é de 100 ms. Dessa forma, t_{tm} pode ser estimado por meio da Equação 2. Nota-se que a latência do dado

pode ser maior do que 200 milissegundos.

$$t_c \leq t_{tm} < t_c + 200[ms] \tag{2}$$

Uma informação atrasada consiste, em princípio, numa informação errônea, haja vista a grande possibilidade da informação enviada não corresponder à informação real. Esse fato pode resultar em risco iminente de colisão. A correção do *delay* é dada por interpolação, como verificado no trabalho de Zhang et al. (2005). Em atrasos significativos a correção já perde a sua eficácia.

3 PROPOSTAS DE CENÁRIOS PARA SIMULAÇÃO

Embora não seja um trabalho recente, o estudo de Mourllion (2006) apresenta dois cenários que permitem o entendimento sobre a percepção estendida, em que são mostrados os cenários: a **frenagem de emergência** (Figura 5) e a **parede de tijolos** (Figura 6). Nesses dois cenários, são modelados veículos com comunicação e sem comunicação, autônomos e não-autônomos.

3.1 Cenário 1: frenagem de emergência

Nesse cenário, imagina-se um caso ideal em que o veículo da frente inicie sua frenagem em $t = 0 s$. A questão básica deste cenário é qual deveria ser a distância mínima entre os veículos para que não haja colisão. Para veículos sem comunicação e veículos com comunicação, há diferenças, que serão vistas a seguir. A distância de segurança será aquela necessária para que o veículo possa perceber o *perigo a sua frente* e que possa desacelerar até parar, sem colidir. O cenário é mostrado na Figura 5.

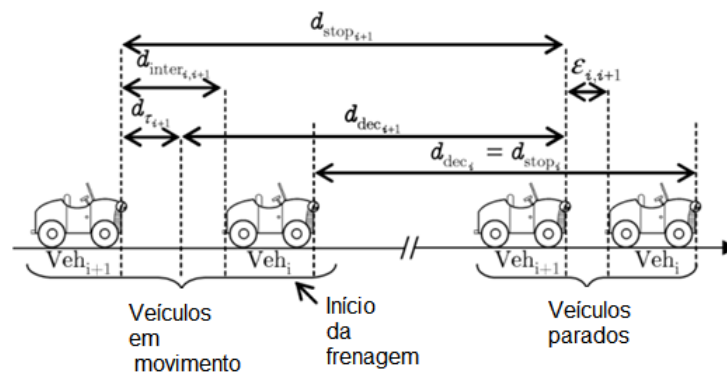


Figura 5 – Cenário: frenagem de emergência.

Fonte: (MOURLLION, 2006), com adaptações.

3.1.1 Veículos sem comunicação

Para os veículos sem comunicação, cada veículo que esteja atrás deve perceber a mudança brusca de velocidade do veículo da frente ou mesmo o acendimento das luzes de freio e tomar a decisão de frear.

O tempo de reação do veículo i será chamado de τ_i . A distância percorrida durante a reação será chamada de $d_{\tau_i} = v_i \cdot \tau_i$. A distância de desaceleração d_{dec_i} é dada pela [Equação 3](#):

$$d_{dec_i} = \frac{v_i^2}{2 \cdot a_{dec_i}} \quad (3)$$

Baseando-se na [Figura 5](#), após a frenagem completa, a distância entre dois veículos é dada pela [Equação 4](#).

$$\epsilon_{i,i+1} = d_{stop_{i+1}} - d_{stop_i} \quad (4)$$

Para o veículo $i + 1$, a distância percorrida é dada pela [Equação 5](#).

$$d_{stop_{i+1}} = d_{\tau_{i+1}} + d_{dec_{i+1}} \quad (5)$$

Na [Equação 5](#), nota-se que para evitar colisões, a [Equação 6](#) é necessária, mas não suficiente.

$$d_{\tau_{i+1}} < d_{inter_{i+1}} \quad (6)$$

3.1.2 Veículos com comunicação

Para veículos com comunicação, será considerada uma latência na comunicação, como exposto por [Rauch, Klanner e Dietmayer \(2011\)](#). Ao iniciar a frenagem do primeiro veículo, a mensagem sobre a frenagem será transmitida por *broadcast*, logo todos os veículos atrás do veículo 1 percorrerão a mesma distância, dada pela [Equação 3](#).

3.2 Cenário 2: parede de tijolos

No segundo cenário, considera-se que no instante $t = 0$ s surja uma parede de tijolos imediatamente à frente do primeiro veículo, como visto na [Figura 6](#).

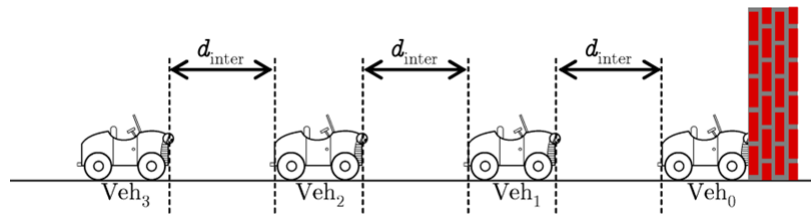


Figura 6 – Cenário: parede de tijolos.

Fonte: (MOURLLION, 2006).

3.2.1 Veículos sem comunicação

A partir da análise da Figura 6, pode ser encontrada a relação mostrada na Equação 7 (MOURLLION, 2006).

$$(l + d_{inter}) \cdot i \geq i \cdot d_{\tau} + d_{dec} + i \cdot l \quad (7)$$

onde:

l comprimento do veículo (considerando que todos tenham o mesmo comprimento).

d_{inter} distância entre os veículos.

i índice do veículo.

d_{τ} distância percorrida durante o intervalo de tempo de reação.

3.2.2 Veículos com comunicação

Neste cenário, considera-se que não haja outros atrasos ou perdas de dados na transmissão. O veículo da frente, ao bater na parede, propaga uma mensagem aos demais. Todavia, haverá uma concorrência no diz respeito à percepção, pois há a percepção sensorial de cada veículo e a percepção compartilhada.

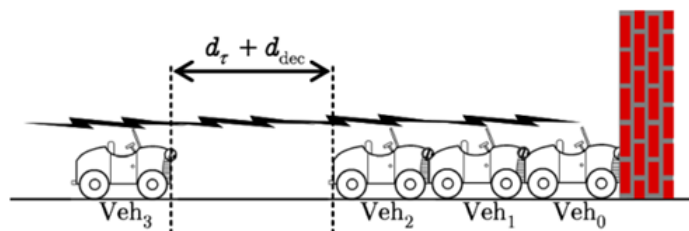


Figura 7 – Cenário da parede de tijolos com veículos colaborativos.

Fonte: (MOURLLION, 2006).

Na [Figura 7](#), a expressão encontrada é mostrada na [Equação 8](#) ([MOURLLION, 2006](#)). Comparando-se a [Equação 7](#) à [Equação 8](#), constata-se que no cenário sem comunicação, há o acúmulo das distâncias de reação ($i \cdot d\tau$) de todos os veículos à frente do veículo i .

$$(l + d_{inter}) \cdot i \geq d\tau + d_{dec} + i \cdot l \quad (8)$$

4 SIMULAÇÃO DO CENÁRIO FRENAGEM DE EMERGÊNCIA

Neste primeiro cenário, o veículo à frente inicia sua frenagem em $t = 0$ s. Foram simulados três tipos de veículos: com motoristas, veículos autônomos e veículos autônomos colaborativos. A velocidade de cruzeiro simulada para todos os veículos foi de 20 m/s. Para a desaceleração provocada pela frenagem, adotou-se um valor de $5,5$ m/s², valor este um pouco abaixo dos obtidos por [Gardinalli \(2005\)](#), em que foram realizadas medições e simulações de desaceleração em veículos com freios ABS. A distância entre os veículos foi de 20 m. Não foi levado em consideração o comprimento dos veículos.

4.1 Veículos com motoristas

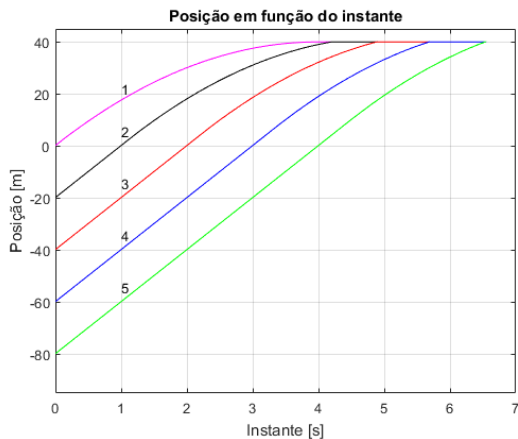
Para veículos dirigidos por pessoas, o tempo de reação a um evento é de $1,1$ s ([SOUSA; RIBEIRO, 2013](#)).

Os resultados da simulação são vistos na [Figura 8](#). A [Figura 8a](#) mostra a curva da posição em função do tempo. Nota-se que todos os veículos colidem na posição igual a 40 m. A [Figura 8b](#) mostra a curva da velocidade em função do tempo. Cada veículo inicia sua frenagem $1,1$ s após a frenagem do veículo à frente. Percebe-se que o veículo 1 para em $t = 4$ s. Entretanto, o veículo 2 não consegue parar a tempo, colidindo com o veículo 1 em aproximadamente $t = 4,2$ s. Da mesma forma, os demais veículos não conseguem parar, colidindo com os veículos à frente.

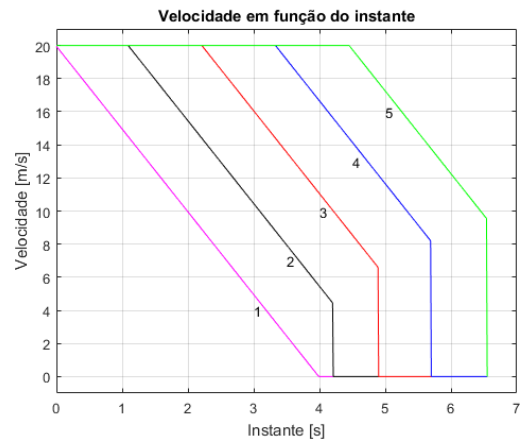
4.2 Veículos autônomos

Nessa simulação, o tempo de reação (τ) foi considerado em 100 ms ([RAUCH; KLANNER; DIETMAYER, 2011](#)), resultando nos gráficos mostrados na [Figura 9](#).

A [Figura 9a](#) mostra a posição dos veículos autônomos em função do instante. Percebe-se que os veículos reagem a tempo, impedindo colisão entre os mesmos. A [Figura 9b](#) mostra a velocidade em função do tempo. Nota-se que cada veículo inicia sua frenagem $0,1$ s após o início da frenagem do veículo à frente.



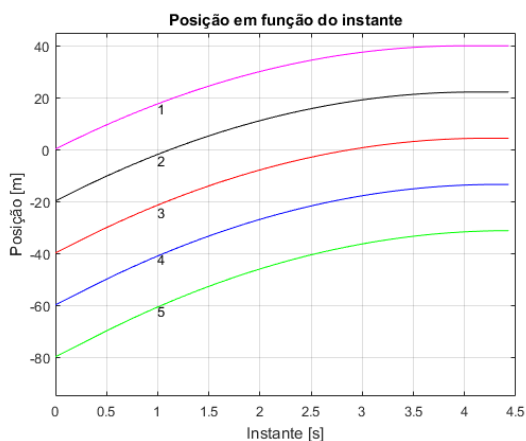
(a) Posição dos veículos em função do instante.



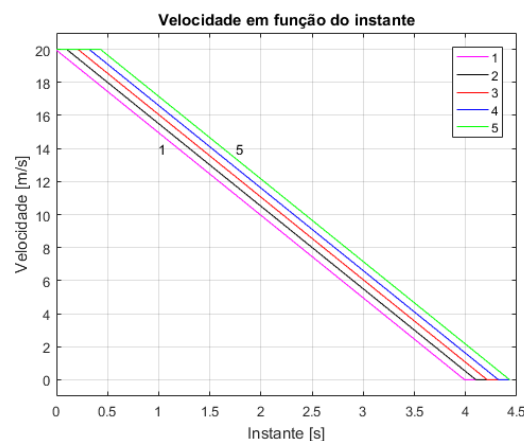
(b) Velocidade dos veículos em função do instante.

Figura 8 – Cenário frenagem de emergência, veículos com motoristas.

Fonte: do autor.



(a) Posição dos veículos em função do instante.



(b) Velocidade dos veículos em função do instante.

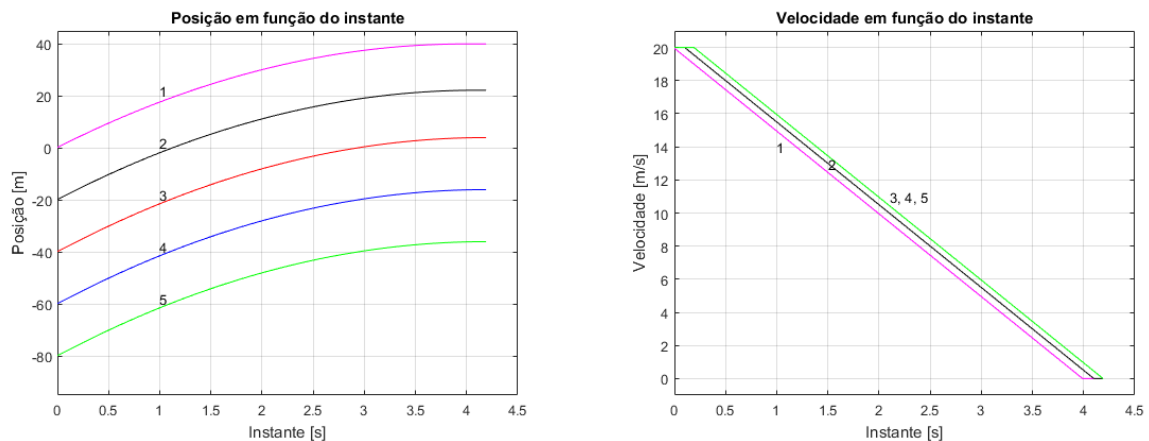
Figura 9 – Cenário frenagem de emergência, veículos autônomos.

Fonte: do autor.

4.3 Veículos colaborativos

Nesta simulação, considerou-se que o tempo necessário para os sensores perceberem a frenagem é de 100 ms, ao passo que o período de latência na recepção é de 200 ms (RAUCH; KLANNER; DIETMAYER, 2011). Dessa forma, o veículo 2 freia devido à sua percepção veicular. Em contrapartida, os veículos 3, 4 e 5 freiam devido à mensagem colaborativa. Os resultados são mostrados na Figura 10.

A Figura 10a mostra a posição dos veículos colaborativos em função do tempo. A Figura 10b mostra as curvas de velocidade dos veículos em função do tempo. O veículo 1 inicia



(a) Posição dos veículos em função do instante.

(b) Velocidade dos veículos em função do instante.

Figura 10 – Cenário frenagem de emergência, veículos colaborativos.

Fonte: do autor.

sua frenagem em $t = 0$ s. O veículo 2 inicia sua frenagem em $t = 0,1$ s devido a sua percepção. Por outro lado, os veículos 3, 4 e 5 iniciam suas frenagens em $t = 0,2$ s, devido à mensagem colaborativa, enviada pelo veículo 1.

4.4 Comparando os resultados

A Tabela 1 mostra, na primeira linha, a distância percorrida pelos veículos com motoristas. Essa linha encontra-se destacada em fundo cinza porque houve colisão entre os veículos, por não ter freado a tempo. A segunda linha mostra a distância percorrida por veículos autônomos. A terceira linha mostra a distância percorrida pelos veículos autônomos colaborativos. Comparando os valores mostrados na tabela, nota-se claramente a diferença entre os veículos autônomos e os dirigidos por motoristas. Por outro lado, entre veículos autônomos e os colaborativos, nota-se um desempenho levemente melhor dos veículos colaborativos. Essa diferença é mais perceptível a partir do quarto veículo, uma vez que o tempo de atraso na transmissão impede que os veículos mais próximos sejam avisados em tempo de frear, sendo estes avisados pela própria percepção. Observando a Figura 8b, com veículos dirigidos por motoristas, nota-se que a velocidade no momento da colisão, é maior para os veículos mais atrás, podendo chegar-se à conclusão que acidentes desse tipo potencializa o nível dos danos aos motoristas, passageiros e veículos.

Tabela 1 – Distância percorrida por veículos do cenário: frenagem repentina.

	Veículo 1	Veículo 2	Veículo 3	Veículo 4	Veículo 5
Com motorista	40,0	60,0	80,0	100,0	120,0
Autônomo	40,0	42,2	44,4	46,6	48,8
Colaborativo	40,0	42,2	44,0	44,0	44,0

5 SIMULAÇÃO DO CENÁRIO PAREDE DE TIJOLOS

Este é um cenário mais dramático do que o anterior, uma vez que os veículos não têm o mesmo espaço percorrido na simulação anterior. Em razão disso, foi necessário aumentar a distância entre os veículos para 25 metros. Tal como no cenário anterior, foram simulados 5 veículos. O veículo 1 inicia-se colidido com o muro em 0 m, o veículo 2 inicia em -25 m, o veículo 3 inicia em -50 m, o veículo 4 inicia em -75 m e o veículo 5 inicia em -100 m. Os veículos possuem velocidades iguais a 20 m/s. A frenagem de todos os veículos foi de 5 m/s². A simulação inicia-se em $t = 0$ s, quando de repente uma parede de tijolos aparece diante do veículo 1, conforme o ensaio teórico de Mourllion (2006). Não foi considerado o comprimento dos veículos. Nestas simulações, são comparados os cenários de veículos dirigidos por pessoas, de veículos autônomos e de veículos autônomos colaborativos.

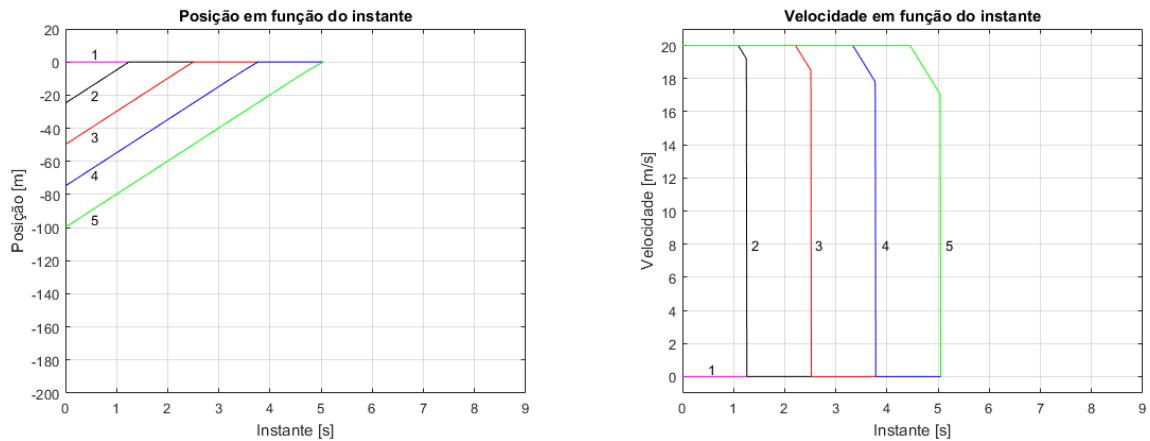
5.1 Veículos com motoristas

Nesta simulação, a parede de tijolos aparece instantaneamente na frente do veículo 1, forçando-o a atingir a velocidade $v = 0$ m/s. Os resultados podem ser vistos na Figura 11.

Na Figura 11a, o veículo 1 colide com a parede de tijolos na posição 0 m e instante $t = 0$ s. Após 1,1 s, o veículo 2 inicia sua frenagem, mas também colide com o muro de tijolos em $t = 1,25$ s, onde os veículos 1 e 2 são vistos na mesma posição, em 0 m. Em seguida, todos os demais veículos colidem. A Figura 11b mostra a velocidade em função do tempo. O veículo 3 inicia sua frenagem em $t = 2,2$ s, colidindo com os veículos 1 e 2 em $t = 2,51$ s. O veículo 4 inicia sua frenagem em $t = 3,3$ s, colidindo em $t = 3,75$ s. Por fim, o veículo 5 inicia a frenagem em $t = 4,4$ s, colidindo com os demais veículos em $t = 5$ s.

5.2 Simulação para veículos autônomos

Nesta simulação, o tempo de reação entre o início da frenagem do veículo à frente e o término do processamento de percepção para início da frenagem será de 100 ms, tempo este necessário para completar todo o processamento dos sensores do veículo autônomo. Os resultados de simulação podem ser vistos na Figura 12.



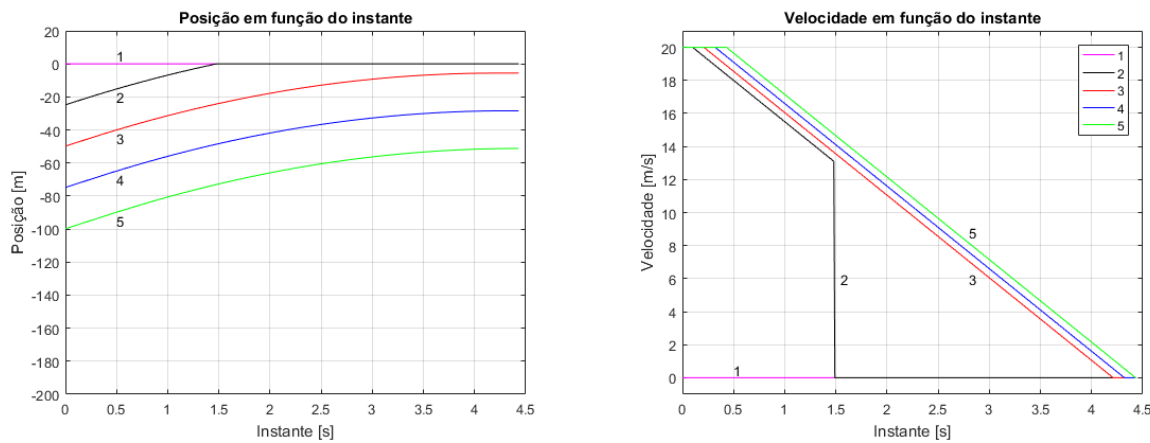
(a) Posição dos veículos em função do instante.

(b) Velocidade dos veículos em função do instante.

Figura 11 – Cenário parede de tijolos, veículos com motoristas.

Fonte: do autor.

A [Figura 12a](#) mostra a posição dos veículos em função do tempo. No gráfico pode-se notar que apenas o veículo 2 colide. A [Figura 12b](#) mostra a velocidade dos veículos em função do tempo. Em $t = 0,1$ s, o veículo 2 inicia a frenagem. Em $t = 0,2$ s o veículo 3 inicia sua frenagem. O veículo 4 inicia sua frenagem em $t = 0,3$ s. Por fim, o veículo 5 inicia a frenagem em $t = 0,4$ s.



(a) Posição dos veículos em função do instante.

(b) Velocidade dos veículos em função do instante.

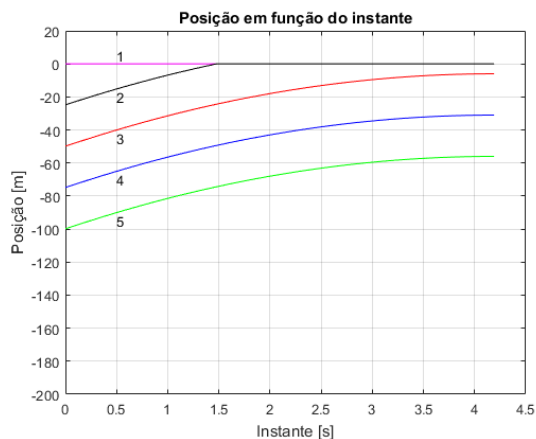
Figura 12 – Cenário parede de tijolos, veículos autônomos.

Fonte: do autor.

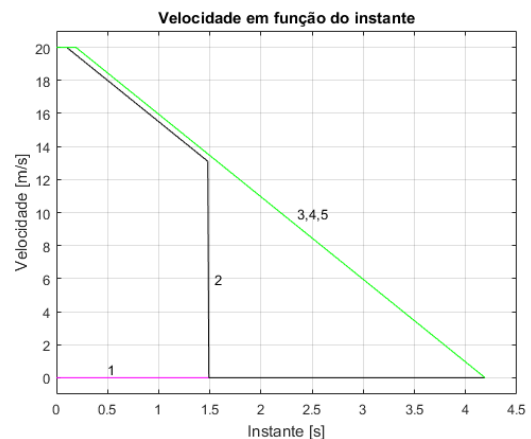
5.3 Simulação para veículos colaborativos

Nesta simulação, o veículo 2 percebe a colisão do veículo 1 após 100 ms do ocorrido, iniciando-se seu procedimento de frenagem. Já os demais veículos iniciam seus procedimentos de frenagem após a recepção do aviso de colisão, enviada pelo veículo 1. Neste caso, considerou-se a latência de transmissão de 200 ms. Este valor foi adotado como parâmetro utilizado pela Equação 2. Outra consideração é que o sinal enviado pelo veículo 1 seja suficiente para que chegue aos demais veículos, sem erros de transmissão ou com um envio repetitivo da mensagem de frenagem, o que eliminaria erros de transmissão, mas podendo inserir alguns milissegundos para o recebimento efetivo da informação.

A Figura 13a apresenta as curvas de posição em função do tempo para os veículos colaborativos.



(a) Posição dos veículos em função do instante.



(b) Velocidade dos veículos em função do instante.

Figura 13 – Cenário parede de tijolos, veículos colaborativos.

Fonte: do autor.

A Figura 13b apresenta as curvas de velocidade em função do tempo para os veículos colaborativos. Da mesma forma com o que ocorre com a simulação de veículos autônomos, houve somente a colisão entre os veículos 1 e 2. Todavia, os demais veículos percorreram uma distância menor do que na simulação anterior, uma vez que recebem a mensagem de colisão por *broadcast*.

5.4 Comparando os resultados

Na linha 1 da Tabela 2 são mostradas as distâncias percorridas pelos veículos com motoristas. O veículo 1 percorre 0 m por bater na parede de tijolos. Os demais veículos também colidem com o veículo 1 após frear, mas não conseguiram parar sem colisão, com a taxa de

desaceleração de 5 m/s^2 . A segunda linha mostra a distância percorrida pelos veículos autônomos, em que o veículo 2 não conseguiu evitar a colisão, porém a colisão ocorreu com uma velocidade menor do que a simulação com motoristas, reduzindo a potencialidade dos danos. Comparando-se as distâncias percorridas pelos veículos tripulados às dos veículos autônomos, nota-se claramente que o tempo de reação influencia diretamente na distância percorrida. Dessa forma, um rápido tempo de reação pode ser determinante para evitar colisões, ou mesmo reduzir a velocidade no momento da colisão, como ocorreu no veículo 2. A terceira linha mostra a distância percorrida pelos veículos autônomos colaborativos. Comparando-se a terceira linha às demais, percebe-se que a distância percorrida pelos veículos reduz para os veículos 3, 4 e 5, permitindo um tempo maior para ações evasivas colaborativas. Como relatado na simulação anterior, as células da [Tabela 2](#) coloridas de cinza foram os veículos em que houve colisão.

Tabela 2 – Distância percorrida por veículos do cenário: parede de tijolos.

	Veículo 1	Veículo 2	Veículo 3	Veículo 4	Veículo 5
Com motorista	0,0	25,0	50,0	75,0	100,0
Autônomo	0,0	25,0	44,4	46,6	48,8
Colaborativo	0,0	25,0	44,0	44,0	44,0

6 CONCLUSÕES

Neste trabalho foi apresentada uma revisão sobre os veículos autônomos e sobre a colaboração veicular. Expôs também simulações para dois cenários em que mostra a necessidade de uma reação rápida a um evento envolvendo um pelotão de veículos. Para esses cenários, foram realizadas três simulações com um pelotão de 5 veículos, equidistantes e com características cinemáticas semelhantes. No primeiro cenário, foi considerada uma frenagem repentina, com o intuito de comparar os resultados entre veículos dirigidos por motoristas, veículos autônomos e veículos colaborativos, tendo como principal diferencial o tempo de reação entre os tipos de veículos. No segundo cenário, foi considerado o surgimento de uma parede de tijolos imediatamente à frente do primeiro veículo, para verificar as ações de cada tipo de veículo. Como resultados mostrou-se que os veículos autônomos podem reduzir, significativamente, não apenas o risco de colisões, mas também a potencialidade dos danos causados nas colisões, uma vez que o tempo de reação dos veículos autônomos e colaborativos são menores. Nota-se que os veículos autônomos colaborativos possuem uma capacidade ainda maior de redução do risco de acidentes em ambientes com muitos veículos, uma vez que eles expandem suas áreas de detecção de obstáculos por meio da recepção de informações dos demais.

Para as simulações com motoristas, percebeu-se que o risco de dano aos motoristas, passageiros e veículos foi maior no segundo cenário, uma vez que as velocidades dos veículos nos momentos das colisões foram maiores. Por outro lado, percebeu-se que o potencial de dano para os últimos veículos aumentam no primeiro cenário, diminuindo no segundo cenário.

Embora não se tenha percebido diferenças significativas entre as simulações de pelotões dos veículos autônomos e veículos colaborativos, essa ligeira diferença pode ser aumentada à medida em que os pelotões aumentem em quantidade de veículos, ou quando a visibilidade entre os veículos seja reduzida, como pode ocorrer em momentos de neblina, em curvas ou em cruzamentos, aumentando-se as vantagens para os veículos colaborativos, que compensam a baixa visibilidade a partir das informações oriundas dos veículos à frente.

REFERÊNCIAS

- ALVES, R. d. S. et al. Redes veiculares: Princípios, aplicações e desafios. **Minicursos do Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores, SBRC**, p. 17–24, 2009.
- AMADEO, M.; CAMPOLO, C.; MOLINARO, A. Enhancing ieee 802.11 p/wave to provide infotainment applications in vanets. **Ad Hoc Networks**, Elsevier, v. 10, n. 2, p. 253–269, 2012.
- BÉCHADERGUE, B.; CHASSAGNE, L.; GUAN, H. A visible light-based system for automotive relative positioning. In: . [S.l.: s.n.], 2017.
- CHASSAGNE, L. Communication et mesure de distance inter-véhicules. Journée de la Recherche UVSQ, 2016.
- Deeksha; Kumar, A.; Bansal, M. A review on vanet security attacks and their countermeasure. In: **2017 4th International Conference on Signal Processing, Computing and Control (ISPCC)**. [S.l.: s.n.], 2017. p. 580–585.
- DEMMELE, S.; GRUYER, D.; RAKOTONIRAINY, A. V2v/v2i augmented maps: state-of-the-art and contribution to real-time crash risk assessment. In: THE CANADIAN ASSOCIATION OF ROAD SAFETY PROFESSIONALS. **Proceedings of 20th Canadian Multidisciplinary Road Safety Conference**. [S.l.], 2010.
- FERREIRA, B.; BRAZ, F. A.; CAMPOS, S. V. A probabilistic model checking analysis of a realistic vehicular networks mobility model. In: SPRINGER. **Brazilian Symposium on Formal Methods**. [S.l.], 2014. p. 113–129.
- FRESE, C.; BEYERER, J.; ZIMMER, P. Cooperation of cars and formation of cooperative groups. In: IEEE. **2007 IEEE Intelligent Vehicles Symposium**. [S.l.], 2007. p. 227–232.

GARDINALLI, G. J. Comparação do desempenho de frenagem simulada x experimental de um veículo de passeio com freios hidráulicos e abs. **Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Mestre em Engenharia Automotiva**, 2005.

HAMDI, M. M. et al. Vanet-based traffic monitoring and incident detection system: A review. v. 11, n. 4, p. 3193–3200, 2021.

IEEE 802. Ieee 802 lan/man standards committee. 2019. Disponível em: <<http://www.ieee802.org/>>.

MALIK, S.; KHAN, M. A.; EL-SAYED, H. Collaborative autonomous driving - a survey of solution approaches and future challenges. **Sensors**, 2021.

MERINO, C. nas L. **Cooperative Perception Techniques for Multiple Unmanned**. Sevilla: Universidad de Sevilla, 2007.

MOURLLION, B. **Extension d'un système de perception embarqué par communication: application à la diminution du risque routier**. 2006. Tese (Doutorado) — Paris 11, 2006.

Patel, B.; Khatiwala, F.; Reshamwala, V. Traffic information verification techniques in vanet: A review. In: **2017 International Conference on Trends in Electronics and Informatics (ICEI)**. [S.l.: s.n.], 2017. p. 551–553.

RAUCH, A.; KLANNER, F.; DIETMAYER, K. Analysis of v2x communication parameters for the development of a fusion architecture for cooperative perception systems. In: IEEE. **2011 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV)**. [S.l.], 2011. p. 685–690.

RAUCH, A. et al. Car2x-based perception in a high-level fusion architecture for cooperative perception systems. In: IEEE. **2012 IEEE Intelligent Vehicles Symposium**. [S.l.], 2012. p. 270–275.

SANTOS, M. M. D. **Redes de comunicação automotiva**. São Paulo: Érica, 2010. ISBN 8536502754.

SOUSA, L. A. P. de; RIBEIRO, P. C. M. Tempo de percepção e reação dos motoristas em interseções semaforizadas. 2013.

WALEED, A.; WEIHUA, Z. Mobility impact in iee 802.11p infrastructureless vehicular networks. *Ad Hoc Networks*, p. 223–230, 2010.

WANG, N.-W.; HUANG, Y.-M.; CHEN, W.-M. A novel secure communication scheme in vehicular ad hoc networks. *ScienceDirect*, 2007.

ZHANG, P. et al. Navigation with imu/gps/digital compass with unscented kalman filter. In: IEEE. **IEEE International Conference Mechatronics and Automation, 2005**. [S.l.], 2005. v. 3, p. 1497–1502.

ZHAO, C. et al. A comparative study of state-of-art driving strategies for autonomous vehicles. **Accident Analysis and Prevention**, v. 150, 2021.

DADOS DO AUTOR

Nome: Carlos Renato Borges dos Santos

E-mail: santoscrb@gmail.com

Lattes: <http://lattes.cnpq.br/4669261214745681>

Doutor em Engenharia Agrícola pela Universidade Federal de Lavras (UFLA), mestre em Engenharia Elétrica e de Computação e Engenheiro eletricista pela Universidade Federal de Goiás (UFG). Foi bolsista da CAPES no doutorado-sanduiche pela Université de Versailles Saint-Quentin-en-Yvelines (UVSQ), de 2015 a 2016 na área de veículos autônomos. Atua na área de microcontroladores há 20 anos, desenvolvendo projetos didáticos com microcontroladores da família 8051 e PIC. Trabalha com Arduino desde 2012. Foi professor das Faculdades Objetivo de 2006 a 2009, da Pontifícia Universidade Católica de Goiás (PUC-GO), em 2007 e instrutor do SENAI-GO de 2008 a 2009. De 2009 a 2020 foi professor do Instituto Federal Minas Gerais (Campus Formiga). Atualmente é professor do Instituto Federal do Triângulo Mineiro (IFTM Câmpus Paracatu), atuando nas áreas: Eletrônica Analógica, Eletrônica Digital, Eletrônica de Potência e Microcontroladores. É autor dos livros: Fundamentos de projetos eletrônicos envolvendo o Arduino - Teoria Digital e Fundamentos de projetos eletrônicos envolvendo o ESP32 e ESP32 LoRa.