



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE
PRODUÇÃO

CARINA LEMOS PITON

**CONFLITO NO TRÁFEGO ENTRE USUÁRIOS AUTÔNOMOS E USUÁRIOS
HUMANOS: Chicken Game em modelos baseados em agentes**

Recife

2021

CARINA LEMOS PITON

**CONFLITO NO TRÁFEGO ENTRE USUÁRIOS AUTÔNOMOS E USUÁRIOS
HUMANOS: Chicken Game em modelos baseados em agentes**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, como parte dos requisitos para obtenção do grau de Mestre em Engenharia de Produção.

Área de concentração: Pesquisa Operacional.

Orientador: Prof. Dr. Francisco de Sousa Ramos.

Recife

2021

Catálogo na fonte:
Bibliotecária Sandra Maria Neri Santiago, CRB-4 / 1267

P685c Piton, Carina Lemos.
Conflito no tráfego entre usuários autônomos e usuários humanos: Chicken Game em modelos baseados em agentes / Carina Lemos Piton. – 2021.
67 f.: il., figs, tabs.

Orientador: Prof. Dr. Francisco de Sousa Ramos.
Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, Recife, 2021.
Inclui referências e apêndices.

1. Engenharia de produção. 2. Teoria dos jogos. 3. Veículos autônomos. 4. Comunicação veicular. 5. Tomada de decisão. 6. Chicken Game. I. Ramos, Francisco de Sousa (Orientador). II. Título.

UFPE

658.5 CDD (22. ed.)

BCTG/2022-05

CARINA LEMOS PITON

**CONFLITO NO TRÁFEGO ENTRE USUÁRIOS AUTÔNOMOS E USUÁRIOS
HUMANOS: Chicken Game em modelos baseados em agentes**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós Graduação de Engenharia de Produção da Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia de Produção. Área de concentração: Pesquisa Operacional.

Aprovada em: 04/06/2021.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Francisco de Sousa Ramos (Orientador)
Universidade Federal de Pernambuco

Profa. Dra. Isis Didier Lins (Examinador Interno)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Dr. Tiago Alessandro Espínola Ferreira (Examinador Externo)
Universidade Federal Rural de Pernambuco

Profa. Dra. Marília Abílio Ramos (Examinador Externo)
University of California-USA

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, pelo dom da vida, pela Misericórdia e capacitação na caminhada para realizar os Teus planos em minha vida. “Isto é uma ordem: sê firme e corajoso. Não te atemorizes, não tenhas medo, porque o Senhor está contigo em qualquer parte para onde fores”. (Josué 1,9). Te agradeço Pai, por estar Presente em todos os momentos, por caminhar ao meu lado. Deus é fiel e sempre cumpre Sua Palavra. Toda Honra e toda Glória sejam dadas a Deus por esta conquista. Agradeço a Mãe Maria Santíssima, por tanto carinho e cuidado diariamente.

Agradeço a minha família, em especial aos meus pais Afonso e Aparecida, pelo apoio, auxílio, incentivo, e por sempre estarem presentes na minha vida. Esta conquista também é de vocês.

Agradeço aos meus amigos, em especial ao Pedro que acreditou em mim desde o início, me incentivou, me ajudou e fez companhia em diversos momentos. Ao Augusto, Rosmery e Emerson, pelas conversas, ajuda, reuniões de estudos até tarde. Ao Caio, Ermeson, Julio, Lays, Vinicius, Vinícius Tiné e Windeline pela ajuda em Microeconomia, a companhia e a paciência de vocês foram fundamentais para esta conquista. Ao Vinicius pela companhia no dia a dia e a todos do Grupo de Oração Refúgio que me acolheram com tanto carinho e são tão importantes para mim. Aos amigos que fiz no mestrado, muito obrigada!

Agradeço ao meu orientador, professor Francisco de Sousa Ramos pelo exemplo de profissionalismo. O senhor instiga seus alunos a fazerem o seu melhor, aproveitar o máximo das oportunidades a nós concedidas. Obrigada professor pela paciência, pela escuta, por cada aprendizado, cada conselho. Obrigada por acreditar no nosso potencial, sua ajuda foi essencial para realizar este trabalho.

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, em especial aos professores e a secretaria, pelos ensinamentos e pela disponibilidade e apoio durante este período.

A todos que contribuíram indiretamente para a concretização deste trabalho.

Por fim, presto também meus sinceros agradecimentos a CAPES, pela bolsa de mestrado concedida.

RESUMO

A automatização de veículos tem atraído crescente interesse nos últimos anos, tanto para empresas e montadoras quanto para pesquisas acadêmicas. Entende-se como veículo autônomo um automóvel capaz de se movimentar no meio em que está inserido (terra, mar, ar) com pouca ou nenhuma assistência do condutor humano. A inserção desses veículos na sociedade pode acarretar grandes benefícios quanto à segurança no transporte e economia, o que condiz com a franca expansão deste mercado. Atualmente, montadoras e empresas investem bilhões em veículos autônomos, devido à possibilidade de reduzir os riscos de acidentes. Pesquisas que abordam a inserção dos veículos autônomos no trânsito estão sendo realizadas para estudar a interação entre o veículo autônomo e outros agentes (pedestres, ciclistas e outros veículos) a fim de evitar conflitos que podem resultar em colisões. Esses estudos utilizam a teoria dos jogos para analisar o comportamento do veículo autônomo face a decisão de um outro agente. O grau de agressividade do usuário pode influenciar no seu comportamento, e quando a interação ocorre, especialmente entre dois veículos autônomos, a comunicação que permite a troca de informações (velocidade e localização) entre ambos pode afetar a segurança do tráfego. Com isso, este trabalho está voltado para análise da tomada de decisão em duas situações durante a negociação para a mudança de faixa em um cenário de tráfego de duas pistas. A primeira situação ocorre na interação entre veículos autônomos quando há falha na comunicação. Com o modelo *Chicken Game* foi possível levantar hipóteses sobre os possíveis resultados que a falha na comunicação pode gerar durante o conflito. A segunda ocorre na interação entre veículos autônomos e veículos conduzidos por motoristas humanos. Para esta análise foi utilizado o Netlogo para avaliar aspectos comportamentais, como a paciência do motorista humano, no tráfego de duas pistas ao interagir com veículos autônomos. Os resultados mostram que a qualidade da comunicação é essencial para um desempenho correto em cenários de conflito entre dois veículos autônomos e que a condução agressiva do motorista humano está relacionada à pressa em chegar ao seu destino final.

Palavras-chave: teoria dos jogos; veículos autônomos; comunicação veicular; tomada de decisão; Chicken Game.

ABSTRACT

Vehicle automation has attracted growing interest in recent years, both for companies and automakers and for academic research. An autonomous vehicle is understood as a car capable of moving in the environment in which it is inserted (land, sea, air) with little or no assistance from the human driver. The insertion of these vehicles in society can bring great benefits in terms of safety in transportation and economy, which is in line with the frank expansion of this market. Currently, automakers and companies invest billions in autonomous vehicles, due to the possibility of reducing the risks of accidents. Researches that address the insertion of autonomous vehicles in traffic are being carried out to study the interaction between the autonomous vehicle and other agents (pedestrians, cyclists and other vehicles) in order to avoid conflicts that can result in collisions. These studies use game theory to analyze the behavior of the autonomous vehicle against the decision of another agent. The degree of aggressiveness of the user can influence his behavior, and when the interaction occurs, especially between two autonomous vehicles, the communication that allows the exchange of information (speed and location) between both can affect the safety of the traffic. Thus, this work is aimed at analyzing decision making in two situations during the negotiation to change lanes in a two-lane traffic scenario. The first situation occurs in the interaction between autonomous vehicles when communication fails. With the Chicken Game model, it was possible to raise hypotheses about the possible results that the failure in communication can generate during the conflict. The second occurs in the interaction between autonomous vehicles and vehicles driven by human drivers. For this analysis, Netlogo was used to evaluate behavioral aspects, such as the human driver's patience, in two-lane traffic when interacting with autonomous vehicles. The results show that the quality of communication is essential for a correct performance in conflict scenarios between two autonomous vehicles and that the aggressive driving of the human driver is related to the rush to reach its final destination.

Keywords: game theory; vehicles autonomous; vehicular communication; decision making; Chicken Game.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 –	Árvore de falhas na comunicação veicular	22
Figura 2 –	Jogo em forma estratégica ou normal	25
Figura 3 –	Jogo na forma estendida	26
Figura 4 –	Jogo do Dilema do Prisioneiros	27
Figura 5 –	Jogo da Batalha dos Sexos	28
Figura 6 –	Jogo do Chicken Game	28
Figura 7 –	Cenário do conflito entre VA's	33
Figura 8 –	Jogo do conflito entre veículos autônomos sem falha na comunicação	34
Figura 9 –	Jogo do conflito entre veículos autônomos com falha na comunicação	35
Figura 10 –	Conflito entre VA's com e sem falha na comunicação do VA (1)	36
Figura 11 –	Interface do modelo desenvolvido no Netlogo	39
Figura 12 –	Proporção de falha na comunicação na categoria 1	43
Figura 13 –	Número de acidentes na categoria 1	44
Figura 14 –	Proporção de falha na comunicação na categoria 2	45
Figura 15 –	Número de acidentes na categoria 2	46
Figura 16 –	Proporção de falha na comunicação na categoria 3	47
Figura 17 –	Número de acidentes na categoria 3	48
Figura 18 –	Média da paciência dos motoristas na categoria 4	50
Figura 19 –	Média da velocidade dos motoristas na categoria 4	50
Figura 20 –	Número de acidentes na categoria 4	51
Figura 21 –	Média da paciência dos motoristas na categoria 5	52
Figura 22 –	Média da velocidade dos motoristas na categoria 5	52
Figura 23 –	Número de acidentes na categoria 5	53
Figura 24 –	Média da paciência dos motoristas na categoria 6	54
Figura 25 –	Média da velocidade dos motoristas na categoria 6	54
Figura 26 –	Número de acidentes na categoria 6	55

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 –	SAE J3016 Níveis de direção autônoma	18
Tabela 2 –	Parâmetros da simulação e suas descrições	41

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AS	Alcance sonar
GPS	Global Positioning System
NHTSA	National Highway Traffic Safety Administration
SAE	Society of Automobile Engineers
TE	Tempo de envio
Vva	Velocidade do veículo autônomo
VA	Veículo autônomo
VANETs	Veicular Ad Hoc Networks
VA's	Veículos autônomos
VH	Veículo conduzido por ser humano
V2I	Comunicação entre veículos e a infraestrutura
V2P	Comunicação entre veículos e pedestres
V2V	Comunicação entre veículos

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
1.1	JUSTIFICATIVA	13
1.2	OBJETIVOS	14
1.2.1	Objetivo geral	14
1.2.2	Objetivos específicos	14
1.3	METODOLOGIA	15
1.4	ESTRUTURA DO TRABALHO	15
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
2.1	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	17
2.1.1	Veículos autônomos: conceitos e características	17
2.1.1.1	Comunicação veicular	20
2.1.2	Teoria dos Jogos	23
2.1.2.1	Exemplos clássicos da Teoria dos Jogos	26
2.2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	29
2.2.1	Veículos autônomos e Teoria dos Jogos	29
3	DESENVOLVIMENTO DO MODELO	33
3.1	FUNCIONALIDADE DA ABORDAGEM PROPOSTA	33
3.1.1	Experimento	37
3.1.1.1	Netlogo	40
3.1.2	Parâmetros da simulação	40
3.2	RESULTADOS E DISCUSSÕES	42
4	CONCLUSÃO	56
4.1	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	57
	REFERÊNCIAS	58
	APÊNDICE A – ROTINA DE PROGRAMAÇÃO	63

1 INTRODUÇÃO

O crescente interesse pela automatização de veículos nos últimos anos, tanto para empresas e montadoras quanto para pesquisas acadêmicas, se deve ao fato de os veículos autônomos se mostrarem capazes de melhorar aspectos ambientais, econômicos e sociais. Os veículos autônomos são carros capazes de se movimentarem com pouca ou nenhuma assistência humana, e tem como um dos principais objetivos planejar e executar o percurso programado com segurança e exatidão (WEI, 2015). Sua autonomia é classificada pela Society of Automobile Engineers (SAE International, 2016) em 6 níveis, indo do nível em que o veículo não possui nenhuma automação até o nível em que este possui total automação e opera de forma independente, não exigindo que o motorista assuma a direção.

Um veículo autônomo requer uma quantidade significativa de hardware e software que não são encontrados em um carro normal (LEVINSON, 2011). Em um sistema totalmente autônomo, os veículos precisam ser identificados e suas ações coordenadas, para isso, é necessário que exista uma comunicação entre eles, na qual informações de tráfego, como perigo detectado, e dos próprios veículos (velocidade e localização) sejam compartilhadas entre si (UNSAI, 1998).

A comunicação ocorre à medida que os veículos se aproximam do alcance sonar através de seus dispositivos de rede sem fio, criados para compartilhar dados. Esse dispositivo é chamado de VANET (Veicular Ad Hoc Network). O sistema de comunicação dos veículos autônomos pode ocorrer entre veículos, entre veículos e infraestrutura e entre veículos e pedestres. Apesar de aumentar a eficiência do veículo autônomo no tráfego, as três formas de comunicação estão sujeitas a falhas. A sua funcionalidade pode apresentar implicações através de interferências causadas por ruídos que podem comprometer o desempenho do sistema, por exemplo, enviando falsas respostas do emissor para o receptor (MARÊ, 2018). Os autores Savic et al. (2017) ainda afirmam que a comunicação sem fio é propensa a atrasos, e Zheng et al. (2017) acrescentam que esses atrasos podem ser motivados pelo congestionamento da rede.

Estudos voltados para a tomada de decisão têm sido desenvolvidos sob a abordagem teórica dos jogos para situações em que ocorrem falhas na comunicação. Saraoglu et al. (2018) e Mostefa et al. (2020) são exemplos dessa abordagem. Os autores visam a um processo de tomada de decisão mais seguro quanto à escolha de rotas que economizem tempo, e também para detectar nós maliciosos que prejudicam a segurança da comunicação. É

necessário melhorar a segurança e a comunicação em todos os veículos para reduzir a possibilidade de colisão (RASHID et al., 2018).

Contudo, além das dificuldades em fazer com que o sistema de comunicação do veículo autônomo funcione perfeitamente, há um outro fator que pode tornar o processo de interação com veículos autônomos mais complexos: o ser humano. Yu et al. (2018) afirmam que motoristas humanos são muito menos previsíveis que veículos autônomos. Cada ser humano possui um comportamento individual. Por exemplo, enquanto um é paciente, não tem uma condução agressiva, não faz movimentos arriscados (ultrapassagens), há outros que são mais impacientes, têm maior pressa em chegar ao seu destino, o que pode levar a uma condução mais agressiva. Este tipo de comportamento aumenta o risco quanto à segurança do tráfego. Enquanto os veículos autônomos são programados a manterem uma distância de segurança, o limite de velocidade e a ultrapassar apenas quando há passagem livre, o motorista humano é imprevisível.

A relevância desse tema motivou revisões da literatura relacionando a interação de veículos autônomos com veículos conduzidos por motoristas humanos. Os trabalhos (SCHWARTING et al., 2019; YU et al., 2018; CHATER et al., 2018) demonstram o crescimento da utilização de modelos da teoria dos jogos nesta área, em cenários de fusão de rodovias e curvas à esquerda, mudança de faixa e desvio de obstáculos.

Nesse sentido, o presente trabalho baseia-se em duas interações: entre veículos autônomos quando há falha na comunicação, e entre veículos autônomos e veículos conduzidos por motoristas humanos. Para a interação entre veículos autônomos foi escolhido o modelo *Chicken Game* para analisar o processo de tomada de decisão entre os veículos em conflito no cenário de mudança de faixa. O modelo *Chicken Game* considera como a melhor resposta para esse conflito a cooperação entre ambos os jogadores, ou seja, quando um decide ceder o caminho para o outro. Porém, sabe-se que há uma possibilidade de ocorrer falha na comunicação. Diante deste problema, foi construída uma árvore de decisão para levantar hipóteses sobre os possíveis resultados que a falha na comunicação pode gerar, sendo o pior resultado a colisão entre os veículos.

O software Neltlogo 6.1.1 foi escolhido para simular o cenário de mudança de faixas quando há interação entre veículos autônomos, comunicando entre si (V2V), e veículos conduzidos por motoristas humanos. Com a simulação, é possível observar a proporção de mensagens não enviadas (falha) durante a comunicação V2V entre veículos autônomos, dado os parâmetros de alcance sonar e tempo de envio, além disso, observa-se também se a presença de veículos autônomos altera o comportamento da condução dos motoristas

humanos, e o quanto a condução agressiva destes podem afetar o tráfego. A condução agressiva do motorista é dada pelo seu nível de paciência. O modelo conta com um parâmetro de paciência máxima, onde cada motorista no início da simulação adquire um valor máximo de paciência aleatório. Esse valor determina o quanto ele está disposto a reduzir sua velocidade, e conseqüentemente, aumentar seu tempo total de viagem, antes de realizar a mudança de faixa.

Para tanto, foram realizadas 6 categorias com 5 conjuntos de 5 experimentos em cada uma. As categorias 1,2 e 3, são simulações da 1º interação, entre veículos autônomos quando há falha na comunicação, com o objetivo de analisar a relação do número de falhas nas mensagens enviadas, no que diz respeito a interrupção/não envio e atraso no envio, com o número de acidentes na interação entre veículos autônomos. Outras simulações, das categorias 4, 5 e 6, da 2º interação, foram feitas para analisar o comportamento do motorista humano interagindo com o veículo autônomo, dado o parâmetro máximo de paciência.

1.1 JUSTIFICATIVA

A produção de automóveis cresce a cada ano, e junto as conseqüências inevitáveis como poluição, congestionamento e acidentes (DIAS, 2013). De acordo com a Organização Mundial da Saúde (2019), cerca de 1,35 milhão de pessoas morrem a cada ano em acidentes de trânsito. Uma pesquisa realizada nos EUA, mostrou que 94% dos acidentes no país decorrem de falha dos condutores humanos (SINGH, 2015). A NHTSA (2013) ainda mostrou que mais da metade dos acidentes de trânsito são causados por sintomas do “ritmo circadiano” (fadiga, distração) e consumo de bebidas alcoólicas, excesso de velocidade e conduta agressiva.

A introdução de veículos autônomos traz benefícios a sociedade em aspectos ambientais, econômicos e sociais, ao proporcionar diminuição na emissão de gases poluentes, melhor fluxo do tráfego, diminuição de congestionamentos, aumento do tempo livre, maior mobilidade para idosos e pessoas com deficiência física ou visual, segurança na mobilidade urbana e redução de multas. No trabalho de Litman (2017), alguns autores realçam o impacto econômico ao afirmarem que os VA's irão reduzir o índice de acidentes e custos de seguro em 90%. Na tentativa de auxiliar os pesquisadores na resolução de problemas de interação autônoma pela busca da melhor solução na tomada de decisão, alguns modelos da teoria dos jogos e simulações estão sendo usados para esta análise na literatura.

O uso da abordagem teórica dos jogos e da simulação para avaliar aspectos comportamentais, podem contribuir na análise de interação dos veículos, resultando na melhor solução para os jogadores. Os sistemas de simulação são indispensáveis para obter dados massivos, como também para reduzir custos, já que operar uma frota de veículos autônomos na realidade tem um custo muito alto, além de questões de segurança e restrições legais do teste de campo (JING et al., 2020).

Assim, a justificativa para esta pesquisa pode ser observada pela associação de aspectos comportamentais dos veículos em interação, para que através da abordagem de tomada de decisão baseada na teoria dos jogos e na simulação no Netlogo possam ser propostas soluções coerentes ao final do processo decisório. Portanto, a relevância do tema está associada à integração de aspectos comportamentais aos métodos de tomada de decisão, diante um cenário de conflito, sob a abordagem da Teoria dos Jogos e o uso de simulação no Netlogo. Estes métodos, consideram os decisores como seres racionais, como mostram os trabalhos (ROMP, 1997; TUROCY AND VON STENGEL, 2001; FIANI, 2006).

1.2 OBJETIVOS

Neste tópico é apresentado o objetivo geral, o que mostra a proposta desse trabalho. São apresentados também os objetivos específicos, os quais irão levar a resolver o objetivo geral.

1.2.1 Objetivo geral

O objetivo geral deste trabalho consiste no estudo comportamental dos veículos autônomos e veículos conduzidos por seres humanos quando estão interagindo em um cenário de conflito, de modo a avaliar o desempenho dos veículos no que se refere à tomada de decisão.

1.2.2 Objetivos específicos

- Apresentar o tema Veículos Autônomos: interação com outros agentes e seus níveis de automação.
- Levantar hipóteses sobre os possíveis resultados de uma interação entre dois veículos autônomos quando há falha na comunicação.

- Identificar se há relação entre o número de acidentes com o número de falhas na comunicação entre veículos autônomos.
- Comparar o comportamento de motoristas humanos na ausência e presença de veículos autônomos no cenário de tráfego.
- Avaliar se a paciência dos motoristas humanos está relacionada com a agressividade na condução.

1.3 METODOLOGIA

A metodologia usada neste trabalho apresenta pontos importantes quanto suas características, e serão brevemente descritas a seguir. As tipologias de pesquisa são diversas, e esta pode ser diferenciada quanto à sua natureza, abordagens metodológicas e objetivos (DO NASCIMENTO, 2016). Este trabalho pode ser classificado como de natureza aplicada, que busca avaliar os efeitos no trânsito quando um veículo autônomo apresenta falha na sua comunicação; abordagem quantitativa; método de modelagem e simulação, e exploratória quanto aos objetivos, uma vez que busca a análise do comportamento na tomada de decisão durante a interação dos veículos no tráfego, e proporciona uma maior familiaridade com o problema com vistas a constituir hipóteses (GIL, 2002). Assim, busca-se com a pesquisa a geração de insights para estudos futuros.

1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho está dividido em 4 capítulos, incluindo a introdução, como primeiro capítulo, onde foram apresentadas as justificativas, os objetivos e a metodologia de pesquisa.

O capítulo 2 apresenta a fundamentação teórica e a revisão bibliográfica para fornecer a base conceitual deste estudo. São abordados conceitos referentes a veículos autônomos, as vantagens e desvantagens da condução autônoma, o uso da comunicação entre sistemas autônomos, a empregabilidade dos modelos da teoria dos jogos, além da revisão de estudos com relevantes contribuições sobre a temática.

O capítulo 3 apresenta a descrição e a aplicação do modelo *Chicken Game*. Neste capítulo também é apresentado de forma ilustrativa e descritiva os resultados obtidos pela simulação no Netlogo.

O capítulo 4 é composto pelas conclusões e trabalhos futuros, o qual conclui o estudo em questão com base nos resultados, expõe as limitações do trabalho atual e sugestões para trabalhos futuros.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRIA E REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O segundo capítulo deste trabalho apresenta a fundamentação teórica, na qual será abordado os conceitos e as características dos veículos autônomos, a comunicação veicular e a Teoria dos Jogos com seus exemplos clássicos. Na revisão bibliográfica dividida será apresentada as relevantes aplicações da Teoria dos Jogos no contexto de condução autônoma.

2.1 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste tópico será apresentada a base conceitual utilizada para este trabalho, que consiste nos aspectos que tangem os veículos autônomos, como os níveis de automação, o impacto ambiental, econômico e social, a importância da comunicação veicular e, por conseguinte, a abordagem da teoria dos jogos.

2.1.1 Veículos Autônomos: conceitos e características

Os veículos autônomos (VA's) são carros que requerem pouca ou nenhuma assistência humana para se locomoverem. Segundo a NHTSA¹ (2013), os veículos autônomos não precisam da participação direta do condutor humano em funções de controle crítico de segurança, como direção, frenagem e aceleração.

A autonomia dos VA's é classificada em 6 níveis pela Society of Automobile Engineers (SAE International, 2019) J3016², partindo do nível 0, em que o veículo não possui nenhuma automação, até o nível 5 com total automação, podendo operar de forma independente sem a intervenção humana. Na Tabela 2.1 é apresentada a definição de cada nível de automação.

Nos níveis mais baixos de automação, de 0 a 2 (sem automação, assistência ao motorista, automação parcial) o motorista é o protagonista, sua atenção deve estar totalmente voltada para a direção, em monitorar o sistema durante toda a viagem, e tem a responsabilidade de tomar decisões para manter a segurança, conforme necessário. Se ocorrer uma falha, o motorista terá que reagir rapidamente. Esses níveis de autonomia auxiliam na

¹ *National Highway Traffic Safety Administration*: agência reguladora de trânsito do governo dos Estados Unidos que é responsável, entre outras atribuições, pelo estabelecimento de padrões mínimos de segurança que os veículos daquele país devem apresentar.

² SAE J3016: o padrão J3016 define seis níveis de direção autônoma, do nível zero (sem automação) ao nível 5 (automação total), servindo como a referência mais citada do setor para recursos de veículos autônomos.

condução do veículo, porém o motorista deve estar no controle ou monitorando a direção, sistemas de aceleração e frenagem, por exemplo.

Para os níveis mais altos de automação, de 3 a 5 (automação condicional, automação alta, automação completa), o sistema monitorará o ambiente de direção e o número de recursos. Os processos de tomada de decisão do sistema aumentam, proporcionalmente, com o nível de automação. No nível mais alto de automação, não é necessário que o ser humano se sente no banco do motorista, pois o veículo possui automação total.

Tabela 1 – SAE J3016 Níveis de direção autônoma

	O que o humano no banco do motorista tem que fazer?		O que esses recursos fazem?	Exemplos de recursos
Nível 0	Estar dirigindo sempre que esses recursos de suporte ao motorista estão engatados - mesmo que os pés estejam fora dos pedais	Supervisionar esses recursos de suporte; dirigir, frear ou acelerar mantendo a segurança	Limitados ao fornecer avisos e assistência momentânea	<ul style="list-style-type: none"> •travagem de emergência automática •aviso de ponto cego •aviso de partida em pista
Nível 1			Fornecem suporte de direção ou freio/aceleração ao motorista	<ul style="list-style-type: none"> •centralização da pista ou •controle de cruzeiro adaptável
Nível 2			Fornecem suporte de direção E freio / aceleração ao motorista	<ul style="list-style-type: none"> •centralização da pista e •controle de cruzeiro adaptável
Nível 3	Não estar dirigindo quando esses recursos de direção automatizada estão envolvidos - mesmo sentado no "assento do motorista"	Quando o recurso solicitar, deve dirigir	Conduzem o veículo sob condições limitadas e não funcionarão, a menos que todas as condições sejam atendidas	<ul style="list-style-type: none"> •motorista de congestionamento
Nível 4		Esses recursos de direção automatizada não exigirão que assuma a direção		<ul style="list-style-type: none"> •local sem motorista •pedais/volante podem ou não ser instalados
Nível 5		Esse recurso pode conduzir o veículo sob todas as condições		<ul style="list-style-type: none"> •mesmo nível 4, mas o recurso pode ser usado em qualquer lugar em todas as condições

Fonte: Adaptado de SAE International (2019).

A condução autônoma envolve três principais áreas: a percepção do ambiente, o sistema de controle e a tomada de decisão (Du et al. 2019). O comportamento do veículo autônomo depende da sua percepção e previsão quanto ao ambiente circundante em que se encontra (LIU e TOMIZUKA, 2016). O sistema de percepção constitui-se de sensores, radares, câmeras, Sistema de Posicionamento Global (GPS - Global Positioning System) entre outros, para obter o maior número de informações do ambiente em tempo real (LOUSA, 2018).

O processamento das informações coletadas é realizado pelo sistema de controle, que geralmente é dividido entre controladores longitudinal e lateral. Esses controladores são responsáveis pela regulação da velocidade de acordo com as normas quanto a velocidade e pela manipulação do sistema de direção para rastreamento de trajetória. Esse sistema é responsável pela execução dos comandos de planejamento, percepção, GPS (DIAS, 2013; XU et al., 2015; LOUSA, 2018).

A tomada de decisão é o principal processo a ser realizado pelo veículo autônomo, nele ocorre a escolha da ação mais adequada dentre um conjunto de ações disponíveis para o ambiente em que ele se encontra. A teoria dos jogos tem potencial para melhorar o sistema de tomada de decisão (PISSARDINI, 2014; DU et al., 2019). São diversos os componentes considerados essenciais para que o veículo autônomo realize suas funções. Para isso ele deve detectar os objetos ao seu redor, interpretar a situação e analisar a melhor ação possível.

Essas funções (percepção, controle e tomada de decisão) são feitas convencionalmente por um condutor humano, no entanto, na direção autônoma, a condução humana é substituída por equipamentos que fornecem os dados necessários, os quais serão processados em tempo real por um computador (MAURER et al., 2016). De acordo com Wolf (2016), a orientação automatizada dos veículos muda o sistema cognitivo do motorista. À medida que aumenta o grau de automação, padrões de comportamento para realizar manobras de direção não são mais necessários, e ao mesmo tempo que essas atividades podem ser desaprendidas, o autor afirma que novas habilidades devem ser aprendidas. Os motoristas devem ter conhecimento sobre o funcionamento do sistema para realizar seu monitoramento.

A inserção dos veículos autônomos no tráfego apresenta grandes benefícios econômicos, ambientais e sociais. Com a introdução dos veículos, a sociedade se beneficiará com a melhoria do fluxo no tráfego, a diminuição de congestionamentos, aumento de tempo livre, a segurança na mobilidade urbana, diminuição na emissão de gases poluentes, abertura de acesso para idosos e pessoas com deficiência física ou visual para que possam desfrutar de uma mobilidade muito maior. Veículos autônomos reduzem também as multas, o número de guardas de trânsito e a condução com álcool. Porém os VA's também apresentam desafios, como a infraestrutura precária, a reação do público, e a ética voltada para a tomada de decisão (FREITAS, 2019; GAO et al., 2014; PETTIGREW et al., 2019).

Ao contrário do ser humano, os VA's têm uma visibilidade de 360°, o que leva a um monitoramento das condições da via com maior precisão, no entanto, têm dificuldade em lidar com os possíveis problemas que podem encontrar (desvio de rota, buracos, ausência de faixas de trânsito, manutenção, entre outros), enquanto os condutores humanos, por exemplo,

conseguem se orientar, mesmo sem a visão perfeita das faixas de trânsito. (SANTOS et al., 2017).

O autor Litman (2017) levanta uma discussão a respeito dos riscos que as tecnologias de veículos autônomos podem apresentar, apesar de autores otimistas afirmarem que, os veículos autônomos irão reduzir o índice de acidentes e custos de seguro em 90% (valor relacionado a taxa de acidentes causadas por erro humano). Sistemas eletrônicos podem falhar devido a sinais distorcidos e erros de software; a possibilidade de as tecnologias serem manipuladas por pessoas mal intencionadas; aumento dos riscos quando os viajantes sentem maior segurança e tendem a assumir riscos adicionais (comportamento compensatório).

Apesar de fatores como cansaço, irritabilidade, impaciência e distração não ser uma preocupação para o desempenho dos VA's, há outros fatores externos que podem interferir no seu processo de tomada de decisão, que possivelmente pode causar insegurança no tráfego. Condições climáticas que diminuam a visibilidade, interferindo na qualidade das imagens das câmeras ao identificar faixas, semáforos. A falta de precisão dos sensores para determinar a dimensão correta dos objetos (BARBOSA, 2017).

A ética é um tema que está sendo abordado na literatura, relacionado à responsabilidade que envolve os veículos autônomos. Se um veículo autônomo causar um acidente, não é possível responsabilizá-lo moralmente pela consequência, pelo fato deste não ser um agente moral. Se a responsabilidade for transferida para os desenvolvedores, esta decisão pode criar uma barreira financeira para as empresas devido aos custos associados à ação judicial (GOGOLL e MÜLLER, 2017).

2.1.1.1 Comunicação veicular

O veículo autônomo possui um sistema de comunicação que o permite identificar objetos na sua proximidade e o auxilia na tomada de decisão, seja para desviar de um obstáculo ou ajustar a velocidade quando se aproximar de um outro veículo (KATRAKAZAS et al., 2015). A comunicação ocorre através de uma rede veicular, também conhecida como VANETs (Veicular Ad Hoc Networks), é uma rede sem fio criada para compartilhar dados, e irá se formar à medida que os veículos se aproximam do alcance de comunicação pelos seus dispositivos de comunicação sem fio. A troca de informações pode ocorrer de veículo para veículo (V2V) e veículo para infraestrutura (V2I) (SÁ; GORENDER, 2012; SOUSA, 2016).

A comunicação (V2V) acontece por uma conexão sem fio, que permite o veículo detectar obstáculos, reconhecer objetos, conhecer a localização e a velocidade de um outro veículo que

esteja próximo, e suporta recursos de segurança automatizados, por exemplo: parada repentina e alerta de mudança de faixa. A comunicação (V2I) permite que os veículos comuniquem com infraestruturas de comunicação distribuídas e estáticas, sua conectividade é extensa e permite a conexão com a internet. A diferença entre as duas se dá no maior desempenho que a (V2V) tem em locais de menor densidade veicular, enquanto a (V2I) pode beneficiar locais com tráfego intenso (MITCHELL et al., 2010; AL-SULTAN et al., 2014; LOBO JUNIOR, 2016; SILVA; GALHARDI, 2017).

Além dessas formas de comunicação, outros trabalhos apresentam outra forma: a comunicação entre veículo autônomo e pedestres (V2P) (CLAMANN et al., 2017; CAMARA et al., 2018; MILLARD-BALL, 2018; DOMEYER et al., 2020).

Os autores Mahadevan et al. (2018) afirmam que há diversas interações complexas entre VA's e pedestres, elas podem ocorrer em um cruzamento de faixas, por exemplo. A comunicação acontece por sinais emitidos entre ambos. O veículo consegue enviar um sinal pela sua velocidade, aceleração, parada, piscada de luz e setas. O pedestre é considerado um usuário vulnerável por não possuir estratégias baseadas em tecnologias para emitir uma informação ao veículo, mas usar de uma linguagem corporal para comunicar sua intenção em atravessar a faixa de segurança. Essa comunicação é empregada com estratégias informais, como gestos com as mãos, fala ou contato visual (STANCIU et al., 2018).

Estudos estão sendo realizados, para que os pedestres possam interagir com os veículos autônomos. Clamann et al. (2017) realizaram um experimento no cenário da travessia de faixa de segurança, onde os participantes a atravessavam enquanto um veículo autônomo se aproximava. Para isso, foi desenvolvido um protótipo de display externo para a comunicação (V2P). Esse display era localizado na parte frontal do veículo e emitia duas informações para o pedestre: atravessar e não atravessar, através de pictogramas em uma tela, podendo informar também a sua velocidade. Mas segundo Ackermann et al. (2019), a comunicação ainda pode apresentar falhas, devido a inconsistências na codificação das mensagens emitidas pelo VA.

Em Mahadevan et al. (2018), os autores criaram interfaces para comunicar a conscientização³ e a intenção⁴ de veículos autônomos para os pedestres. Os autores identificaram e testaram quatro interfaces localizadas no: (1) no veículo; (2) no veículo e na infraestrutura da rua; (3) no veículo e no pedestre; (4) em conjunto com o veículo, infraestrutura da rua e pedestre. Sugeriram ainda, que estas interfaces podem solucionar a

³ Conscientização do veículo autônomo é a sua capacidade em reconhecer a presença do pedestre.

⁴ A intenção do veículo autônomo em comunicar sua próxima ação para o pedestre.

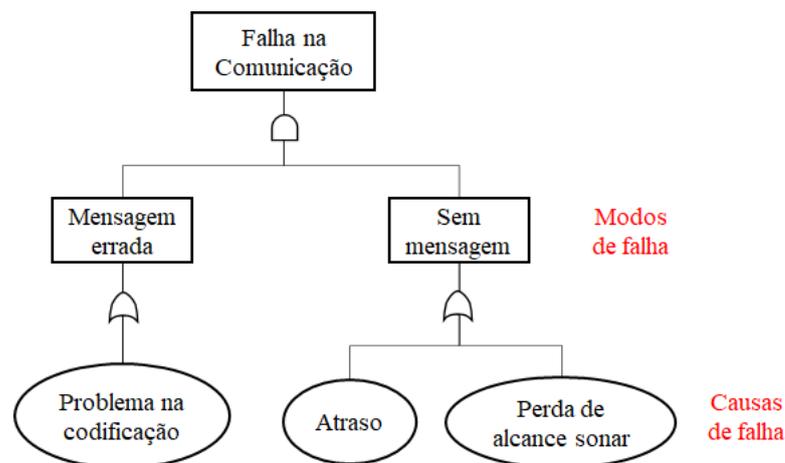
ausência da comunicação informal nos veículos autônomos, mantendo, por exemplo, o movimento do veículo existente.

As comunicações (V2V) e (V2I) também podem apresentar implicações quanto a sua funcionalidade, devido à possibilidade da presença de ruído que pode acarretar em interferências nas mensagens. Estas interferências podem comprometer o desempenho do sistema, enviando falsas respostas do emissor da mensagem para o receptor (Marè, 2018), tais eventualidades podem ocasionar acidentes. Mesmo que as comunicações V2V e V2I aumentem a eficiência do tráfego com um controle aprimorado no cruzamento de pistas, os autores Savic et al. (2017) afirmam que a comunicação sem fio é propensa a falhas e atrasos.

As falhas podem ocorrer, principalmente, devido a erros de orientação geográfica, dinamismo na topologia ou um alcance de comunicação (alcance sonar) muito curto (ABD-ELRAHMAN et al.; 2014). Quanto ao atraso, um dos motivos que leva a esta implicação é o congestionamento da rede, ou seja, um número elevado de informações sendo compartilhadas em um mesmo intervalo de tempo (ZHENG et al.; 2017).

Esta pesquisa concentra-se em dois modos de falha na comunicação: mensagem errada, que pode estar relacionada a orientação geográfica ou a velocidade atual do veículo devido a um erro na codificação da informação enviada, e mensagem não enviada/recebida, relacionada a atrasos ou perda do alcance sonar, devido ao alcance ser muito curto, como mostra a árvore de falhas na comunicação veicular da Figura 2.1.

Figura 1 – Árvore de Falhas na Comunicação Veicular



As causas dessas falhas são, respectivamente, devido a problemas na codificação onde o emissor envia uma mensagem contrária da ação a ser realizada, e atraso ou interrupção do

envio da mensagem pela perda do alcance sonar. No entanto, estas falhas serão discutidas mais adiante na descrição da funcionalidade da abordagem proposta neste trabalho. Na próxima seção é apresentado o conceito e as características da Teoria dos Jogos.

2.1.2 Teoria dos Jogos

A Teoria dos Jogos é o estudo de modelos matemáticos de cooperação e conflito, que, através de técnicas gerais de matemática, analisa a tomada de decisão de dois ou mais agentes que irá influenciar no bem-estar um do outro (Myerson, 1991). Os agentes, tomadores de decisão, podem ser indivíduos, grupos, empresas ou qualquer combinação destes que sejam racionais e tenham autonomia para tomar decisões (Turocy and von Stengel, 2001; Fiani, 2006).

Segundo Romp (1997), a teoria dos jogos está interessada no processo de tomada de decisão quando os indivíduos racionais são interdependentes. Os autores, Mas-Colell et al. (1995) consideram a interação com vários indivíduos, na qual cada um reconhece que o seu resultado, além de suas próprias escolhas, depende também das escolhas de outros indivíduos, como uma característica do que os autores chamam de interdependência estratégica. As ações que melhor beneficiam o indivíduo, podem depender das ações que outros indivíduos já realizaram ou daquelas que se espera que realizem.

Os modelos da teoria dos jogos são representações abstratas de situações da vida real, o que permite o estudo de uma ampla gama de eventos (Osborne e Rubinstein, 1994). A situação estudada, na teoria dos jogos, é chamada de jogo, os agentes que estão interagindo são os jogadores, e o resultado desse jogo é decorrente das escolhas feitas estrategicamente pelos jogadores, de modo a obter aquele que o beneficie o máximo possível (Pimentel, 2010).

O termo “jogo” destaca a característica central da teoria em que os agentes estão preocupados com a estratégia e a vitória, além de ser uma representação formal da situação, é uma descrição da interação estratégica, a qual inclui restrições sobre as ações e interesses dos jogadores. As estratégias possíveis indicam as recompensas que cada jogador receberá por suas decisões, dependendo da escolha de outro jogador. Uma estratégia especifica como o jogador irá agir em todas as diferentes circunstâncias possíveis. O conjunto de tais circunstâncias é representado pela coleta de informações na perspectiva do jogador (Mas-Colell, 1995; Osborne e Rubinstein, 1994).

Uma vez que o conjunto de jogadores é definido, pode-se distinguir o modelo entre dois tipos: aqueles em que os conjuntos de ações possíveis de jogadores individuais são

primitivos e aqueles em que os conjuntos de ações possíveis de grupos de jogadores são primitivos. O primeiro modelo são os jogos não cooperativos e o segundo, os jogos cooperativos (Osborne e Rubinstein, 1994). Segundo os autores, Mas-Colell et al. (1995), os jogos cooperativos são grupos ou subgrupos de agentes que por meio de acordos vinculativos são capazes de atingir resultados específicos para si próprios. O jogo é não-cooperativo se para os jogadores é impossível haver comunicação ou colaboração, ou seja, os jogadores fazem escolhas de acordo com seus próprios interesses (Nash, 1953; Sihlobo, 2012).

O autor Fiani (2006) define os dois modelos básicos de jogos para tratar processos de interação estratégica, são eles os jogos simultâneos e os jogos sequenciais. No primeiro, cada jogador no momento em que toma sua decisão, ignora as decisões dos demais jogadores. Este tipo de jogo não fornece informações futuras sobre possíveis desdobramentos das escolhas dos jogadores. No entanto, na interação estratégica o processo também pode se desenvolver em etapas sucessivas, assim, as decisões nem sempre serão tomadas ignorando as decisões dos demais jogadores, e sim a partir do que eles decidiram no passado. Desse modo, no segundo modelo, os jogadores realizam seus movimentos com uma ordem predeterminada.

Quanto à informação disponível para os agentes os jogos podem ser classificados como sendo de informação completa ou incompleta, perfeita ou imperfeita. No jogo com informação completa, as funções *payoff's* dos jogadores são de conhecimento comum, enquanto no jogo de informação incompleta, ao menos um jogador não tem certeza sobre a função *payoff* de um outro jogador ou sobre as ações disponíveis para este. Em um jogo de informação imperfeita, o jogador pode estar desinformado sobre as ações realizadas por outros jogadores, em contraste, em um jogo de informação perfeita, sempre que um jogador toma uma ação, ele conhece as ações anteriores de todos os outros jogadores, bem como suas próprias ações (Gibbons, 1992; Peters, 2015; Myerson, 1991).

A análise de qualquer jogo começa com a especificação de um modelo que o descreva. Assim, a forma geral para representar o jogo deve ser cuidadosamente pensada. Dentre as várias formas gerais, duas são consideradas por Myerson (1991) como as mais importantes: a forma estratégica (ou normal) e a forma estendida. A forma estratégica é um modelo em que cada jogador escolhe seu plano de ação de uma vez por todas, enquanto que no modelo estendido, o jogador pode considerar seu plano de ação sempre que tiver que tomar uma decisão, e não apenas no início do jogo (Osborne e Rubinstein, 1994).

Em Gibbons (1992) o autor especifica a representação da forma estratégica ou normal como: (1) os jogadores, (2) as estratégias disponíveis para cada jogador, e (3) o *payoff* recebido por cada jogador para cada combinação de estratégias que podem ser escolhidas

pelos jogadores. Enquanto a representação da forma estendida é especificada como: (1) os jogadores, (2a) o momento em que cada jogador realiza uma ação, (2b) o que cada jogador pode fazer em cada uma de suas ações (2c) o que cada jogador sabe em cada uma de suas ações, e (3) o *payoff* recebido por cada jogador para cada combinação de estratégias que podem ser escolhidas pelos jogadores.

A forma estratégica ou normal é representada em forma de matriz, onde são mostrados os resultados para cada combinação possível de estratégias, como mostra a especificação de Gibbons (1992), Ross, (2019).

A Figura 2.1 mostra um exemplo de um jogo em forma estratégica ou normal, representado pela matriz. O exemplo consiste em 2 dois jogadores racionais que estão interagindo. Ambos os jogadores têm como estratégias “Acelerar” ou “Parar”. As estratégias do jogador 1 se encontram listadas nas linhas, enquanto as estratégias do jogador 2 são listadas nas colunas. Supõe-se que esses jogadores são motoristas que estão em uma situação de conflito, onde chegam ao mesmo tempo em um cruzamento e ambos têm interesse em realizar a passagem primeiro. Ao escolher a estratégia “Acelerar”, poderá obter um *payoff* 1 enquanto a opção “Parar”, um *payoff* 0. No entanto, se ambos escolhem a estratégia “Acelerar” pode ocorrer uma colisão, resultando em *payoff* -1,-1 para os jogadores.

Figura 2 – Jogo em Forma Estratégica ou Normal

		Jogador 2	
		Acelerar	Parar
Jogador 1	Acelerar	-1,-1	1,0
	Parar	0,1	0,0

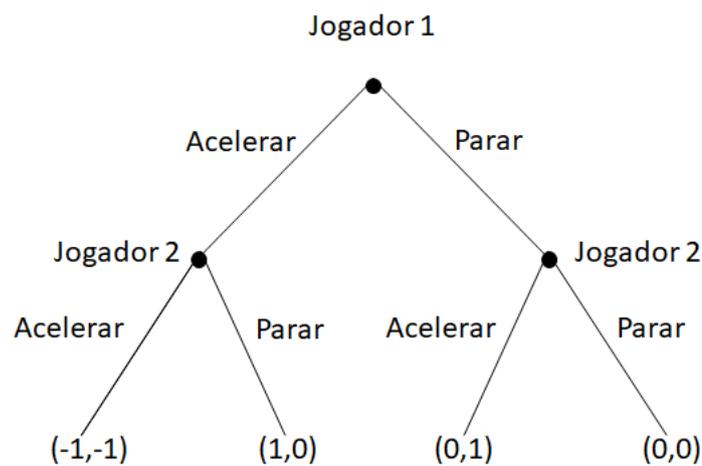
Fonte: A autora (2021)

Considerando esta situação, e que cada jogador busca maximizar seu *payoff* de forma estratégica (Jehle e Reny, 2011), quando um jogador decidir “Acelerar” a melhor estratégia que o outro jogador pode tomar é “Parar”. Sendo assim, temos duas possíveis soluções: (“Acelerar”, “Parar”) e (“Parar”, “Acelerar”). Quando uma estratégia é a melhor resposta possível dada a estratégia de um outro jogador, essa combinação de estratégias constitui um equilíbrio de Nash (Fiani, 2006).

Nash (1951) demonstrou que em todo jogo finito há um ponto de equilíbrio, ou seja, um conjunto de estratégias em que nenhum dos agentes possui incentivos para desviar-se delas, já que a estratégia de cada agente é a resposta ótima em relação a dos demais. Este conjunto é conhecido hoje como Equilíbrio de Nash. Gibbons (1992) argumenta que se para um problema teórico de jogos, a teoria dos jogos fornece uma solução única, esta deve ser um equilíbrio de Nash. Neste exemplo, há dois equilíbrios de Nash: (“Acelerar”, “Parar”) e (“Parar”, “Acelerar”) ou (1,0) e (0,1).

O modelo de forma estendida, é também chamado de árvore de jogos ou árvore de decisão, composta por ramos e nós. Os ramos representam as ações das escolhas possíveis para os jogadores, enquanto os nós representam as etapas do jogo em que os jogadores precisam tomar uma decisão (Fiani, 2006).

Figura 3 – Jogo na Forma Estendida



Fonte: A autora (2021)

A Figura 2.2 mostra o exemplo dado na Figura 2.1, porém agora na forma estendida. Esta forma é mais detalhada do que a forma estratégica, ela descreve completamente o andamento do jogo, incluindo a ordem de ação dos jogadores e as informações que ambos têm no momento de realizar suas ações (Turocy and von Stengel, 2001). Outros exemplos são apresentados no tópico a seguir.

2.1.2.1 Exemplos clássicos da Teoria dos Jogos

A teoria dos jogos modela situações reais em que há a presença de dois ou mais indivíduos fazendo escolhas que podem afetar seus resultados, como visto na seção anterior.

Nesta seção, serão apresentados três jogos clássicos da teoria dos jogos: Dilema dos Prisioneiros, Batalha dos Sexos e *Chicken Game*, na forma estratégica representada por uma matriz 2x2.

O jogo Dilema do Prisioneiro apresenta a seguinte situação: dois jogadores são capturados e acusados do mesmo crime. Eles são levados para celas separadas e não podem se comunicar um com o outro. O delegado faz uma proposta, onde cada um pode optar por “Confessar” ou “Não Confessar”. Se nenhum dos dois indivíduos confessar, ambos serão condenados a 1 ano de prisão. Se os dois confessarem, ambos enfrentarão uma sentença de 5 anos. Se um confessar e o outro negar, o primeiro será libertado enquanto o outro será condenado a 10 anos de prisão. Assim, cada jogador possui 2 estratégias disponíveis: confessar e não confessar. Os *payoff's* dos jogadores, referentes às estratégias escolhidas, são dados pela matriz, representada na Figura 2.3.

Figura 4 – Jogo Dilema dos Prisioneiros

		Jogador 2	
		Confessa	Não Confessa
Jogador 1	Confessa	-5,-5	0,-10
	Não Confessa	-10,0	-1,-1

Fonte: A autora (2021)

Analisando a situação, se um jogador escolher a estratégia “Confessa”, a melhor resposta do outro jogador é “Confessa”, pois se este escolher uma estratégia diferente terá que passar mais tempo na cadeia enquanto o primeiro estará livre. Já para a estratégia “Não Confessa”, a melhor resposta do outro jogador é “Confessa”. Sendo assim, se os jogadores agirem racionalmente, irão escolher o conjunto de estratégias (“Confessa”, “Confessa”), o qual é o equilíbrio de Nash.

No modelo de Batalha dos Sexos, os jogadores são um casal que desejam sair juntos e estão decidindo se irão a uma partida de futebol ou a um espetáculo de balé, e lá vão se encontrar. O jogador 1 prefere ir a uma partida de futebol a ir ao espetáculo de balé, enquanto o jogador 2 prefere ir ao espetáculo de balé a ir a uma partida de futebol. Entretanto, o casal valoriza sair juntos mais do que qualquer outra coisa. Porém, há um problema. Os jogadores precisam se encontrar no lugar escolhido sem se comunicarem, para isso, considere que um

dos jogadores está sem celular. A matriz de *payoff's* com as possíveis combinações estratégicas está representada na Figura 2.4.

Figura 5 – Jogo da Batalha dos Sexos

		Jogador 2	
		Futebol	Balé
Jogador 1	Futebol	2,1	0,0
	Balé	0,0	1,2

Fonte: 1 A autora (2021)

Neste modelo, os jogadores obterão o maior *payoff* se escolherem o mesmo local, ainda que o jogador 1 tenha preferência diferente ao jogador 2 quanto ao local. Como o casal valoriza mais estar juntos, nenhum dos jogadores quer ir ao local preferido sozinho. Assim como no exemplo da Figura 2.1, o modelo de Batalha dos Sexos possui dois equilíbrios de Nash, são eles: (“Futebol”, “Futebol”) e (“Balé”, “Balé”).

Por último, o modelo *Chicken Game*. Neste modelo, os jogadores estão em uma competição. Em uma pista reta, os participantes posicionam seus carros em lados opostos, nos extremos da pista, ou seja, frente a frente, e devem sair ao mesmo tempo em direção ao outro. Existem duas opções: “Desviar” ou “Não Desviar”, mas quem desviar é considerado "covarde". Se os oponentes decidirem não se esquivar, eles colidirão e perderão tudo. Se ambos decidirem se desviar, serão considerados covardes. Se apenas um desviar, este será considerado covarde, ou seja, perde a competição dando a vitória ao seu adversário. A matriz de *payoff's* dos jogadores, dadas as estratégias escolhidas, está representada na Figura 2.5.

Figura 6 – Jogo do *Chicken Game*

		Jogador 2	
		Desvia	Não Desvia
Jogador 1	Desvia	0,0	-1,1
	Não Desvia	1,-1	-2,-2

Fonte: A autora (2021)

O modelo *Chicken Game* possui dois equilíbrios de Nash (“Desvia”, “Não Desvia”) e (“Não Desvia”, “Desvia”). Se os dois jogadores escolherem “Desvia”, ambos serão considerados covardes, porém ainda pior é a combinação de estratégias (“Não Desvia”, “Não Desvia”), a qual resulta em uma colisão. Se um jogador escolhe “Desvia”, a melhor resposta para o outro jogador é “Não Desvia” e vice-versa, assim, são encontrados os dois equilíbrios de Nash.

No jogo Dilema dos Prisioneiros a principal questão é se os jogadores irão cooperar ou não. Nos jogos Batalha dos Sexos e *Chicken Game*, os jogadores decidem que cooperar é a melhor estratégia comparada a estratégia não cooperar. Nestes modelos são representadas situações em que os jogadores ganham sempre que coordenam suas decisões, apesar de terem preferências diferentes. No primeiro, o casal prefere estar juntos a terem que sair sozinhos, já no segundo, os jogadores preferem ser chamados de covardes a sofrerem uma colisão.

2.2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A revisão bibliográfica relacionada a este trabalho é apresentada a seguir, como um aporte das relevantes aplicações da teoria dos jogos ao contexto da automação de veículos. Nesta se encontra os diferentes campos de aplicação através do qual a condução autônoma evoluiu.

2.2.1 Veículos autônomos e Teoria dos Jogos

A abordagem teórica dos jogos tem sido muito requisitada por pesquisas voltadas para veículos autônomos, em virtude das estratégias para a tomada de decisão na interação entre agentes independentes, que buscam obter o melhor retorno dentre as possíveis ações dos jogadores e suas influências no resultado do jogo (BANJANOVIC-MEHMEDOVIC et al. 2016). A teoria dos jogos, em geral, é aplicada para analisar o comportamento dos agentes (veículos, pedestres, ciclistas) que estão em interação e contribuir para a sua tomada de decisão.

Pesquisas que abordam a inserção dos veículos autônomos no trânsito estão sendo realizadas para estudar a interação entre o veículo autônomo e outros agentes (pedestres, ciclistas e outros veículos) a fim de evitar conflitos que podem resultar em colisões. Grande parte destes estudos, estão fazendo uso da teoria dos jogos para analisar o comportamento dos agentes e contribuir com as suas tomadas de decisões. Modelos baseados na Teoria dos Jogos,

como *Chicken Game*, têm sido amplamente utilizados para analisar interações entre veículos autônomos com outros usuários, por exemplo, com veículos em cenários de cruzamento de pistas e com pedestres em travessia de faixa de segurança (PITON; RAMOS, 2019). Há, no entanto, outras situações sendo consideradas como interação na mudança de faixas, rotatórias e entrada/saída da pista.

No trabalho Yu et al. (2018) os autores usaram o modelo de jogo Stackelberg (líder-seguidor) na modelagem do tráfego onde um veículo imita a decisão de mudança de faixa de um motorista humano, para realizar uma ultrapassagem, daí o conceito líder-seguidor. O modelo conta com a presença de um veículo competidor, localizado na faixa em que o motorista humano deseja entrar, porém, sua decisão dependerá da agressividade deste veículo competidor. Com isso, os autores projetaram o processo de tomada de decisão de mudança de faixa, baseado na estimativa da agressividade e dos *payoff's* correspondentes para ambos os veículos. Os autores Li et al. (2017) também usaram o jogo Stackelberg em forma de árvore de decisão. Baseados na política deste modelo, abordaram exemplos específicos de condução autônoma, e modelaram o comportamento do motorista interagindo no tráfego, baseado na teoria dos jogos. Os autores demonstraram dois exemplos e usaram também, um simulador como comparativo de sistemas de controle dos veículos autônomos em termos de segurança e desempenho. Uma terceira aplicação de Stackelberg pode ser encontrada no trabalho (SCHWARTING et al., 2019), em que os autores usaram o jogo em um cenário de cruzamento de pistas, para capturar interações dinâmicas entre os agentes. A partir de sugestões sociais, incorporaram estimativas da personalidade e o estilo de condução dos outros motoristas, o que permitiu que os autores lidassem com cenários mais complexos.

Em Millard-Ball (2018) o modelo *Chicken Game* foi usado para analisar as interações entre diferentes usuários no tráfego, tomando como exemplo a travessia em uma faixa de segurança com pouca fiscalização. Para o pedestre, não há quase nenhum risco ao atravessar em frente a um veículo autônomo, desde que a distância e a velocidade do veículo forneçam um tempo de frenagem suficiente, tendo em vista que o veículo irá parar, dada a sua programação para seguir as leis de trânsito. O autor considera que quanto mais imprudentes forem os usuários (pedestres, ciclistas e motoristas humanos), mais cauteloso será o comportamento do veículo autônomo. É certo que em caso de colisão, o resultado deixará o pedestre em pior situação, porém, levando em conta os custos financeiros, atrasos e ramificações legais, o *payoff* do veículo estará longe de ser zero. Camara et al. (2018) expandiram um modelo sequencial do *Chicken Game*, introduzido por Fox et al. (2018), no qual foi proposto um modelo matemático de dois agentes que negociam a prioridade na

passagem em um cruzamento, para medir o comportamento humano. Durante o experimento, informaram aos participantes seu objetivo: evitar colisões e serem os primeiros a atravessarem a faixa de segurança. Ao terminarem, os autores tornaram o jogo mais competitivo, informou aos participantes quais seriam suas recompensas ao vencer, o vencedor seria aquele que atravessasse a faixa primeiro. Se houvesse colisão, ambos não receberiam a recompensa. O resultado mostrou que houve uma preferência maior por economizar tempo ao evitar acidentes, ou seja, os jogadores, interessados na recompensa, preferiram atravessar a faixa primeiro. Esse efeito ganhou evidência aos participantes ao serem informados sobre as recompensas, tornando o jogo mais competitivo e incentivando os jogadores a pensarem em ganho e perda.

O modelo Dilema do Prisioneiro foi usado no trabalho Banjanovic-Mehmedovic et al. (2016) como uma abordagem para a tomada de decisão na comunicação V2V em uma rotatória, devido às regras de comportamento do veículo de acordo com as leis de trânsito. Os autores propõem uma nova abordagem da estratégia de comportamento cooperativo em situação de conflito envolvendo veículos autônomos usando a teoria dos jogos. O resultado mostra que a integração da teoria dos jogos na capacidade de decisão com comunicação V2V, o problema de entrada na rotatória pode ser resolvido com tempos de espera reduzidos para veículos autônomos individuais.

Os autores Chater et al. (2018) usam o jogo *Chicken Game* para modelar o cenário de desvio de obstáculo, sendo necessário o veículo entrar na outra pista para realizar a manobra de desvio. Quando a interação envolve veículos autônomos, até uma manobra considerada simples se torna complexa. Diante disso, os autores apresentam duas abordagens limitadas: (1) os condutores devem tratar os veículos como objetos em movimento, prevendo sua trajetória para otimizar suas próprias ações, (2) baseada em sistemas de regras, o veículo só realizará se outros veículos mantiverem o caminho e a velocidade atuais.

Há trabalhos que estão sendo desenvolvidos utilizando a abordagem modelos baseados em agentes, como o Riaz et al. (2018), que faz uso do software Netlogo para simular a interação entre veículos autônomos de tamanhos diferentes (carros e caminhões). Os autores apresentam a ideia de usar emoções humanas para melhorar a prevenção de colisão entre VA's. A emoção aplicada neste estudo foi o medo.

O uso da teoria dos jogos na tomada de decisão de veículos autônomos, apesar de ser consideravelmente recente, tem feito um progresso significativo nas pesquisas desta área. Os diversos resultados encontrados, além de apoiar o desenvolvimento de veículos autônomos, bem como a sua interação com os agentes e o ambiente em que está inserido, direcionam

também novas pesquisas, como o presente trabalho que estuda a interação entre veículos autônomos quando há a possibilidade de falha na comunicação, e no comportamento de motoristas humanos na presença de veículos autônomos. No entanto, observa-se que há um número relativamente baixo de pesquisas voltadas para a falha na comunicação entre veículos autônomos. No presente estudo, é avaliado os possíveis resultados que uma interação entre veículos autônomos pode obter quando ocorre falha na comunicação, fazendo uso do modelo *Chicken Game* da teoria dos jogos. Outro diferencial deste trabalho é a utilização do Netlogo para simular o cenário de tráfego de duas pistas, com veículos autônomos e veículos conduzidos por motoristas humanos interagindo entre si. Assim, até onde se tem conhecimento, este trabalho se difere dos demais, e apresenta como potencial melhorias na comunicação entre veículos autônomos.

3 DESENVOLVIMENTO DO MODELO

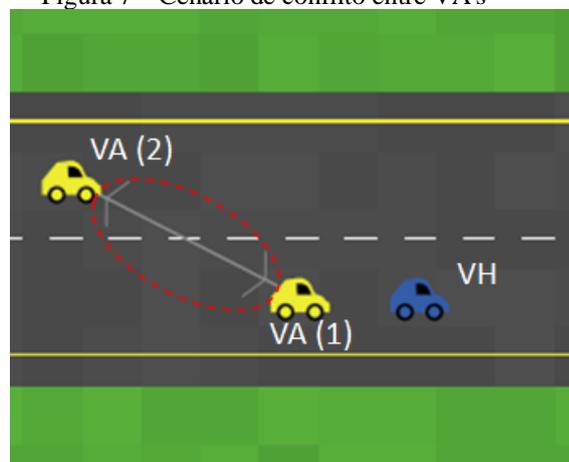
Neste tópico será abordado o desenvolvimento do modelo, o software usado para a simulação, os parâmetros necessários e a construção do cenário.

3.1 FUNCIONALIDADE DA ABORDAGEM PROPOSTA

Considere a seguinte situação apresentada na Figura 3.1. Um veículo autônomo se aproxima de um veículo conduzido por um ser humano com uma velocidade menor do que a sua. Para não colidir, o VA (1) tem duas opções: reduzir a velocidade ou mudar de faixa. Nesta situação, se o VA (1) mudar de faixa, entrará em conflito com o VA (2) que está se aproximando e possivelmente irá ultrapassá-los. Para esta tomada de decisão, é importante que os veículos autônomos tenham conhecimento de suas respectivas velocidades e também de suas localizações. Se $V_{VA(2)} > V_{VA(1)}$, o VA (2) precisa reduzir a velocidade, além disso, é preciso conhecer a localização entre os VA's para saber se a distância é suficiente para que o VA (2) consiga desacelerar a tempo e manter uma distância segura para não colidir com o VA (1) quando este mudar de faixa, para que assim faça uma ultrapassagem com segurança.

Os veículos autônomos por fazerem uso de sensores como o sonar, conseguem reconhecer objetos e mensurar a distância entre eles. Se dentro do alcance sonar, for detectado um veículo com uma distância menor que a distância de segurança estabelecida, o VA irá desacelerar.

Figura 7 – Cenário de conflito entre VA's



Fonte: A autora (2021)

Os carros amarelos são autônomos e o carro azul é conduzido por um ser humano. A linha tracejada em vermelho destaca o link de comunicação entre os carros autônomos.

Para saber essas informações os veículos autônomos contam com o sistema de comunicação V2V. Neste sistema eles vão compartilhar suas atuais velocidades e localizações. Se a comunicação funcionar perfeitamente, o VA (1) mudará de faixa e conseguirá fazer a ultrapassagem sem colisões. Mas, como discutido anteriormente, pode haver ruído na comunicação, e conseqüentemente, irá apresentar falhas. Diante desta possibilidade, o cenário de conflito é apresentado na forma de jogo, em uma matriz 2x2, onde os jogadores são os VA (1) e VA (2) e o conjunto de estratégias possíveis de ambos os jogadores é (Acelerar, Desacelerar). Os valores da matriz são os *payoff's* de cada jogador, dadas suas estratégias.

É importante ressaltar que nenhum dos veículos têm interesse em reduzir a velocidade, já que a desaceleração causa um atraso no tempo final da viagem. Porém, desacelerar é preferível a colidir. A colisão é o pior resultado para ambos os jogadores. Neste caso, o VA (2) não tem nenhum incentivo para desacelerar a não ser que seja para evitar uma possível colisão ao VA (1) mudar de faixa. Considerando o modelo *Chicken Game*, a matriz do jogo é apresentada na Figura 3.2.

Figura 8 – Jogo do Conflito entre Veículos Autônomos sem falha na Comunicação

		VA (2)	
		Acelerar	Desacelerar
VA (1)	Acelerar	-3,-3	1,-1
	Desacelerar	-1,1	-1,-1

Fonte: A autora (2021)

Suponha que uma falha na comunicação tenha uma consequência com dois possíveis resultados: (1) os veículos vão colidir ou (2) os veículos vão desacelerar e ambos aumentarão o tempo final da viagem, devido ao atraso. Por exemplo, considerando que a colisão é o pior resultado, se VA (1) comunica que vai acelerar, o VA (2) sabe que se também acelerar vai ter uma colisão, então a melhor resposta para este é desacelerar. Se a informação do VA (1) for falsa, devido à falha na comunicação, ambos irão desacelerar. Mas se o VA (1) comunica que vai desacelerar, ou seja, não vai mudar de faixa até que VA (2) ultrapasse, a melhor resposta para o VA (2) é acelerar. Se a informação do VA (1) for falsa, o jogo terá o pior resultado possível porque ambos vão colidir.

A Figura 3.3 apresenta a matriz de *payoff* dos jogadores quando ocorre uma falha na comunicação do VA (1) ao enviar uma informação ao VA (2). O VA (1) vai realizar seu movimento independentemente se a informação que ele passar vai estar correta. Nesta situação, os jogadores não têm muita certeza a respeito do retorno um do outro.

Figura 9 – Jogo do Conflito entre Veículos Autônomos com falha na Comunicação

		VA (2)	
		Acelerar	Desacelerar
VA (1)	Acelerar (D)*	-3, -3 - g_e	1, -1 + g_u
	Desacelerar (A)*	-1, 1 + l_e	-1, -1 - l_u

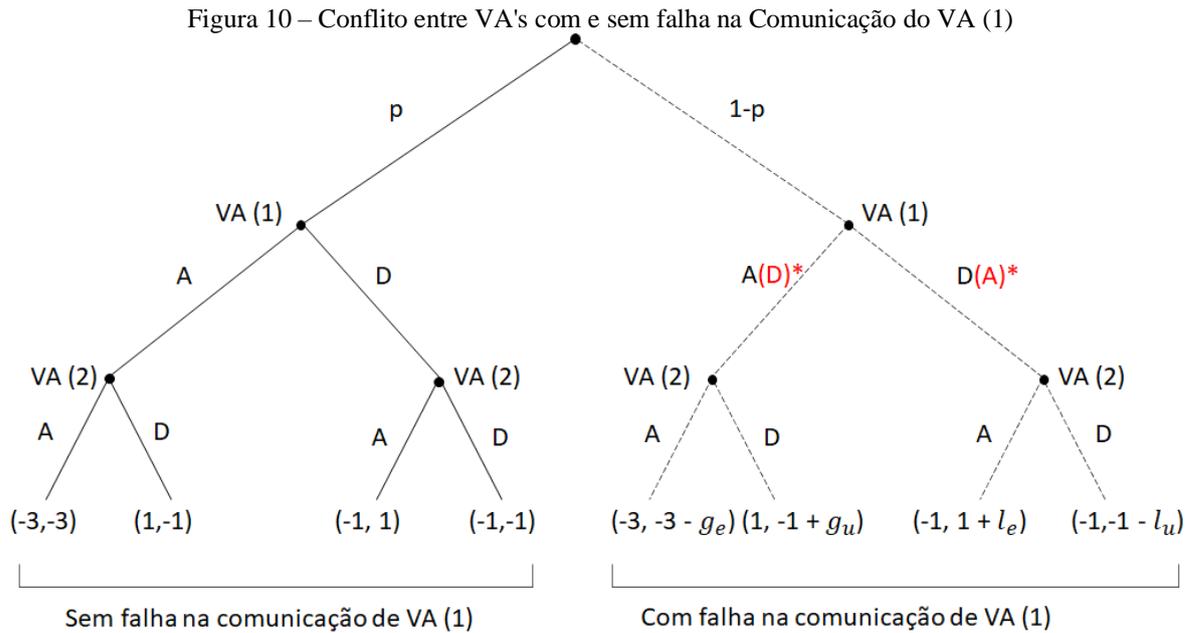
Fonte: A autora (2021)

*A letra em vermelho é a informação recebida pelo VA (2).

A árvore de decisão, representada na Figura 3.4 permite uma melhor visualização sobre o andamento do jogo. Como não se sabe ao certo qual a probabilidade de ocorrer falha na comunicação entre veículos autônomos, considere p a probabilidade de ocorrer uma comunicação sem falha, e $1-p$ a probabilidade de ocorrer uma falha na comunicação. No ramo esquerdo, sem falha, quando o VA (1) informa sua ação “Acelerar” ou “Desacelerar”, ele realmente irá agir de acordo com informação passada. No ramo da direita, ocorre a comunicação com falha: quando o VA (1) informar que vai “Acelerar”, na verdade ele irá “Desacelerar” D(A), quando informar a ação “Desacelerar”, ele irá “Acelerar” A(D). A informação passada pelo VA (1) não condiz com a sua real ação.

Na sequência, os ramos com os respectivos *payoff's* para cada conjunto de estratégia possíveis são apresentados. A questão analisada é a reação do VA (2) quando a comunicação com VA (1) apresentar falha. Os jogadores já conhecem seus retornos quando o jogo é de informação completa, porém quando ocorre uma falha, um jogador não tem certeza da reação do outro, o que torna incerto a informação sobre os possíveis retornos (*payoff's*).

Para recordar, em um jogo de informações incompletas ao menos 1 jogador está incerto quanto a função *payoff* de outro jogador. Gibbons (1992) afirma que a existência de informações privadas leva a tentativas de comunicação da parte informada, e a tentativas de aprendizagem e resposta por repostas não informadas.



Fonte: A autora (2021)

*A letra em vermelho é a informação recebida pelo VA (2).

Observa-se de imediato que todos os *payoff's* do VA (1) permaneceram os mesmos, enquanto todos os *payoff's* do VA (2) foram alterados quando há falha na comunicação de VA (1). Considere g_e , g_u , l_e , l_u como sendo *expected gain*, *unexpected gain*, *expected loss* e *unexpected loss*.

Quando o VA (1) escolhe “Acelerar”, mas informa que vai “Desacelerar”, o VA (2) irá agir de acordo com a informação recebida, assim, há uma grande possibilidade de haver uma colisão. Neste conjunto de estratégia, onde ambos escolhem (“Acelerar”, “Acelerar”) os veículos obtêm retornos $(-3, -3 - g_e)$. O *payoff* do VA (2) $-3 - g_e$ significa que além de ele receber -3 , ele ainda perde o retorno que esperava ganhar (1) por acreditar na informação que o VA (1) iria desacelerar, ou seja, ele também perde o ganho esperado. Mas se ele escolher “Desacelerar”, os veículos terão como resultado $(1, -1 + g_u)$, -1 é retorno que o VA (2) recebe por desacelerar, mas nesse caso específico, ele ganha um valor g_u (ganho inesperado), pois evitou uma colisão. Vale ressaltar, que desacelerar é preferível a colidir. Assim, se houver falha na comunicação, a melhor resposta para o VA (2) ao VA (1) informar “Desacelerar” é “Desacelerar”.

No entanto, quando o VA (1) escolhe “Desacelerar” e informa “Acelerar”, o VA (2), sendo programado para reduzir a velocidade quando encontra um veículo a sua frente, irá “Desacelerar”. Para o conjunto de estratégias (“Desacelerar”, “Desacelerar”) os veículos obtêm *payoff's* $(-1, -1 - l_u)$. O *payoff's* do VA (2) passa a ser $-1 - l_u$, sendo l_u o valor que ele deixa de ganhar por não acelerar, quando na verdade o VA (1) desacelerou também, ou seja,

além de receber -1 por desacelerar ele ainda tem uma perda inesperada, o retorno que deixou de ganhar por ter perdido a oportunidade de acelerar. Mas se o VA (2) escolhe “Acelerar”, os veículos terão *payoff's* iguais a $(-1, 1 + l_e)$. O ganho do VA (2) é 1, pois acelerou enquanto o VA (1) desacelerou, mais o valor l_e , que é o valor que ele esperava receber pela possibilidade de colisão, isto é, a perda esperada. Assim, a melhor resposta para o VA (2) quando o VA (1) informa “Acelerar” é “Acelerar” quando ocorre falha na comunicação.

Ao analisar esta situação pelo ponto de vista ético, apesar de os *payoff's* do VA (1) na Figura 3.4 não terem sido alterados, vale discutir a possibilidade de inserir uma punição para este veículo devido a não realização da ação informada. Se ocorrer uma colisão, onde o VA (1) realiza uma ação diferente da informação enviada ao VA (2), o primeiro não seria o responsável por tal resultado? Ao considerar o VA (1) como responsável pela colisão, os possíveis resultados para este veículo poderiam ser diferentes.

É importante destacar que o jogo apresentado na Figura 3.2, Figura 3.3, Figura 3.4, é o mesmo, mudando apenas a forma de representação, e também, que os valores usados no jogo de conflito entre veículos autônomos apresentado acima são fictícios. A decisão de usá-los é para melhor compreensão do modelo e para levantar hipóteses dos possíveis resultados deste conflito quando há falha na comunicação. O mesmo pode ser usado para análise da interação entre veículo autônomo e veículo conduzido por motorista humano, quando o ser humano desconhece se o carro é autônomo ou não, ou ainda quando o veículo autônomo não tem conhecimento do perfil comportamental do ser humano, se este é paciente ou impaciente.

O cenário de interação entre veículos autônomos e veículos conduzidos por seres humanos, com a utilização do sistema de comunicação V2V entre veículos autônomos é construído no Netlogo para melhor visualização e análise dos resultados gerados. O experimento para simulação é apresentado na próxima seção.

3.1.1 Experimento

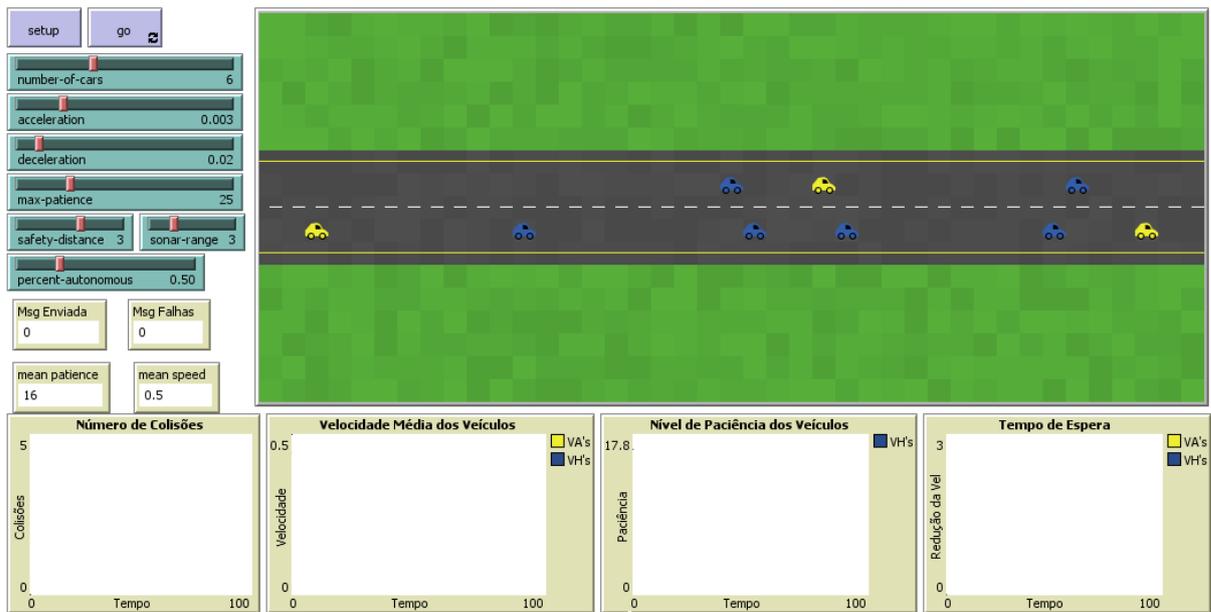
Para a simulação dos experimentos foi utilizado o software Netlogo 6.1.1, baseado nos modelos disponíveis em sua biblioteca. O modelo aqui apresentado é uma adaptação do modelo original Traffic 2 Lanes. A Figura 3.5 apresenta a interface do ambiente experimental no Netlogo, junto com os parâmetros de entrada e saída já com a adaptação para este trabalho. Os botões “*setup*” e “*go*” configuram os carros de acordo com a definição dos parâmetros e o outro inicia a simulação. O símbolo no botão “*go*” significa “para sempre” e, ao ser selecionado, o modelo irá rodar até que se retire a seleção.

Para os experimentos, considera-se que a velocidade máxima permitida da pista seja igual a 1, como os veículos autônomos são programados para seguirem as normas de trânsito, o que inclui a velocidade máxima permitida, todos os veículos autônomos têm a velocidade máxima igual a 1. Considere também que todos os motoristas respeitam a velocidade máxima permitida, ou seja, nenhum terá uma velocidade maior que 1, no entanto, esta velocidade pode ser menor que 1. Sabe-se que existem motoristas mais agressivos que outros, logo, cada um possui sua própria velocidade máxima dentro daquela permitida. Os veículos iniciam a simulação com velocidade e posição aleatórias, os veículos conduzidos por motoristas humanos, além destas, iniciam também com o nível de paciência aleatório. Os carros são programados a diminuir a velocidade sempre que se aproximam de um outro carro para evitar quaisquer possíveis colisões. Os motoristas com perfil agressivo são escolhidos aleatoriamente de acordo com suas velocidade e paciência máximas.

Os veículos tem como objetivo chegar no término da sua viagem no menor tempo possível, de acordo com sua velocidade máxima, e em segurança. Assim, irão decidir mudar de faixa quando sua paciência for menor ou igual a zero. A paciência do motorista diminui conforme a necessidade de reduzir sua velocidade atual, devido à velocidade do carro a sua frente ser menor, a fim de evitar uma colisão.

É importante ressaltar que durante a simulação, ao ocorrer uma colisão, novos veículos serão inseridos no cenário. A respeito dos veículos conduzidos por motoristas humanos, novos perfis com características comportamentais diferentes serão inseridos, ou seja, o nível de paciência para cada condutor é aleatório respeitando o parâmetro de paciência máxima.

Figura 11 – Interface do modelo desenvolvido no Netlogo



Fonte: A autora (2021)

O modelo representa a comunicação V2V através de linhas que são ligadas entre os veículos autônomos. Quando os veículos estão conectados, eles estão enviando informações, porém se um veículo ganhar uma distância maior de outro veículo, e essa distância for maior que o alcance sonar, a linha é quebrada, ou seja, a comunicação é interrompida. Quando isso acontece, a cor da linha se torna vermelha. O número de mensagens enviadas e não enviadas são contabilizadas e mostradas nos monitores. O número total de mensagens será, portanto, a soma de mensagens enviadas e não enviadas. No modelo, uma linha (*link*) que liga dois carros, contém 2 mensagens a cada *tick*, se houver três carros conectados serão 6 mensagens a cada *tick* e assim sucessivamente, pois conforme ocorre movimentação no cenário, os veículos atualizam as informações. O tempo de envio da mensagem também pode ser programado.

A falha na comunicação neste experimento se dá pela interrupção da comunicação, quando a distância entre os veículos autônomos se torna maior que o alcance sonar, e também pelo atraso no envio da mensagem, em caso de o tempo de envio ser muito longo.

A colisão acontece quando dois veículos estão no mesmo *patch*, ou seja, quando ocupam o mesmo espaço. Após a colisão, a pista será limpa (*clear-in*), e novos carros irão surgir. Por exemplo se VA (1) e VA (2) colidirem, será contabilizado 1 acidente, e dois novos veículos autônomos serão adicionados. O cenário sempre vai manter o número de agentes de acordo com o estabelecido nos parâmetros, independentemente do número de colisões. O mesmo acontece com os veículos conduzidos por motoristas humanos. Se estes se envolverem em

uma colisão, novos veículos com motoristas de diferentes características comportamentais irão surgir.

A rotina de programação deste modelo encontra-se no Apêndice A. Na próxima seção serão fornecidas maiores informações a respeito do programa escolhido para simulação deste trabalho.

3.1.1.1 Netlogo

O Netlogo é uma linguagem de programação multiagente e um ambiente de modelagem para simular fenômenos complexos (WILENSKY, 1999). O programa contém vários exemplos de simulação, com a possibilidade de aprimorar os modelos ao implementar cenários da vida real. Além disso, pode ser baixado gratuitamente e tem a opção online da plataforma disponível. O mundo Netlogo é formado por quatro tipos de agentes que podem seguir instruções. O mundo é dividido em uma grade de *patches*, as *turtles* podem se mover sobre cada um deles, e podem também estar conectadas a outras *turtles* por meio dos *links*. O observador está “olhando” para o mundo de *turtles* e *patches*.

O modelo Traffic 2 Lanes⁵ demonstra a formação de engarrafamentos em uma pista com duas faixas. Os motoristas têm a opção de acelerar, desacelerar e trocar de faixa (WILENSKY; PAYETTE, 1998). O modelo é executado por uma velocidade padrão normal, porém é possível alterá-la através da caixa de quadros na configuração na guia *Interface*. Na velocidade normal, a taxa de quadros é de 30 *ticks* por segundo.

Na próxima seção são apresentados os parâmetros da simulação.

3.1.2 Parâmetros da simulação

A simulação consiste em diferentes tipos de parâmetros de entrada e saída. Para fornecer a entrada são usados diferentes controles deslizantes, enquanto os gráficos e monitores são usados para obter a saída.

Nos parâmetros de entrada há dois parâmetros que definem o número de veículos na simulação. O primeiro é o “*number-of-cars*” que define o número de veículos conduzidos por seres humanos, enquanto o segundo, “*percent-autonomous*”, define a proporção de veículos

⁵ Disponível na Biblioteca de Modelos Netlogo: <http://ccl.northwestern.edu/netlogo/models/Traffic2Lanes>

autônomos que serão inseridos no cenário, dado o número total de veículos. Com este parâmetro é possível analisar quatro diferentes tipos de cenários:

1. $VA = 0$, sem a participação de veículos autônomos.
2. $VA < VH$, menor número de veículos autônomos em relação ao total de veículos.
3. $VA = VH$, número de veículos autônomos igual ao número de veículos conduzidos por seres humanos.
4. $VA > VH$, número de veículos autônomos maior que o número de veículos conduzidos por seres humanos.

Os parâmetros referentes à distância são os parâmetros *safety-distance* e *sonar-range*. O primeiro, distância de segurança, determina a distância que um veículo autônomo deve manter de outro veículo, para realizar sua viagem sem colisão. O segundo, alcance sonar, determina o alcance do veículo para detectar objetos. Este parâmetro está relacionado com a distância que os veículos autônomos conseguem se conectar e trocar informações entre si, ou seja, a comunicação V2V. Se o veículo criar uma distância maior que a do alcance, a comunicação é interrompida.

A descrição de cada parâmetro de entrada junto com as definições do intervalo de seus respectivos valores é apresentada na Tabela 3.1.

Tabela 2 – Parâmetros da simulação e suas descrições

Parâmetros gerais da simulação	Variação	Descrição
Number-of-cars	[1-15]	Define o número máximo de veículos conduzidos por seres humanos.
Acceleration	[0,001-0,01]	Define a aceleração que pode ser usada por todos os veículos quando não há carros à frente.
Deceleration	[0,01-0,1]	Define a desaceleração que pode ser usada por todos os veículos quando há um carro próximo.
Max-patience	[0-100]	Define o número máximo de vezes que um veículo pode reduzir a velocidade antes de perder a paciência e decidir trocar de faixa.
Safety-distance	[1-5]	Define a distância de segurança entre os VA's.
Sonar-range	[1-5]	Define o alcance do sonar de cada VA para descobrir a distância entre os VA's.

Percent-autonomous	[0-5]	Define o número de VA's em um número total de veículos pelo controle "number-of-cars".
---------------------------	-------	--

Fonte: A autora (2021)

Através do parâmetro "*max-patience*", também é possível identificar o perfil agressor do motorista. Sua agressividade pode estar relacionada a uma paciência menor do que a definida pelo parâmetro (ser mais impaciente), ou também pela sua própria velocidade máxima.

Os parâmetros de aceleração "*acceleration*" e desaceleração "*deceleration*" foram mantidos de acordo com o modelo original Traffic 2 Lanes.

Entre os parâmetros de saída há 4 monitores e 4 gráficos. Os monitores "Msg Enviada" e "Msg Falha" representam os números de mensagens enviadas e mensagens que, devido a ocorrência de falhas no envio, não foram enviadas. Os outros dois monitores "*mean patience*" e "*mean speed*" apresentam as médias de paciência e velocidade dos veículos conduzidos por motoristas humanos. O primeiro gráfico "Número de Colisões", apresenta em tempo real as colisões que ocorrem no cenário. O gráfico "Nível de paciência dos Veículos" mostra a média da paciência que os motoristas têm no decorrer da simulação. Os outros dois gráficos "Velocidade Média dos Veículos" e "Tempo de Espera" além de apresentarem seus resultados em tempo real, possuem duas linhas: a linha amarela mostra os valores referentes aos veículos autônomos, enquanto a linha azul mostra os resultados encontrados a respeito dos veículos conduzidos por seres humanos. O gráfico "Velocidade Média dos Veículos" mostra a velocidade média dos VA's e dos VH's. Por último, o gráfico "Tempo de Espera", calcula o tempo que o veículo permanece parado. Sempre que o veículo autônomo obter sua $VA \leq 0$, o tempo de espera será contado.

3.2 RESULTADOS E DISCUSSÕES

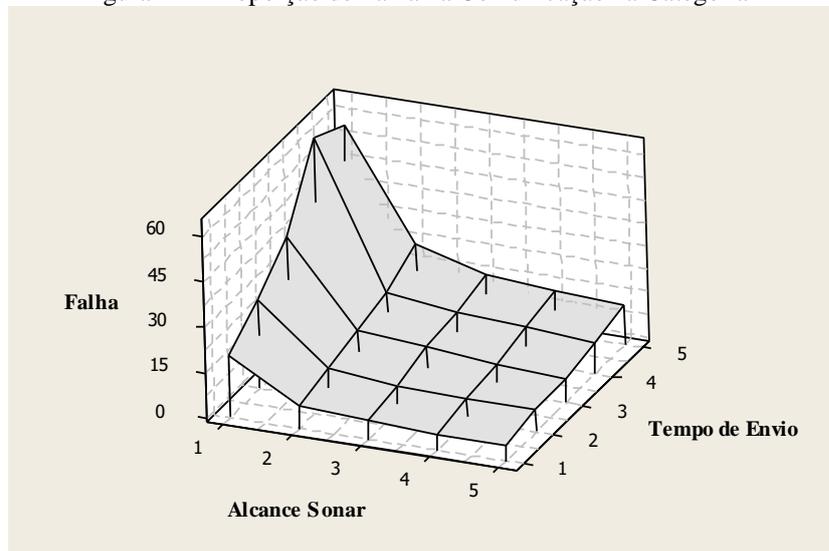
O objetivo do experimento é estudar o comportamento dos agentes diante um cenário de conflito quando ocorre a mudança de faixa por um dos veículos. O modelo simula a interação entre veículos autônomos (carros amarelos) e veículos conduzidos por seres humanos (carros azuis). Para isso, foram feitas 6 categorias com 5 conjuntos de experimentos para cada uma. Vale ressaltar que, para cada experimento, foram realizadas três repetições, o que totalizou em um número de 450 rodadas. Para gerar os gráficos dos resultados, foi feita uma média dos resultados obtidos nas três rodadas. Em todas as simulações o número de *ticks*, tempo de

simulação no Netlogo, é aproximadamente 134.000. Os gráficos apresentados foram gerados no Minitab 16.

Dentre essas categorias, as 3 primeiras são voltadas para a 1^o interação deste trabalho. Os experimentos destas categorias, foram realizados para testar a proporção de falha na comunicação V2V, ou seja, a proporção de mensagens não enviadas dados os parâmetros: alcance sonar x tempo de envio, alcance sonar x número de VA's, tempo de envio x número de VA's.

Para a categoria 1, alcance sonar x tempo de envio, foram fixados os parâmetros: número de veículos conduzidos por motoristas humanos (VH's = 5), número de veículos autônomos (VA's = 2), paciência máxima (max-patience = 30) e distância de segurança (safety-distance = 3). Para os cinco experimentos do conjunto 1, o alcance sonar foi fixado em 1, enquanto o tempo de envio variou de 1 a 5. No segundo conjunto, o alcance sonar foi fixado em 2, enquanto o tempo de envio variou de 1 a 5, e assim sucessivamente até o 5^o conjunto, em que o alcance sonar foi igual a 5. Os resultados desses experimentos são apresentados nos gráficos das Figuras 3.6 e 3.7.

Figura 12 – Proporção de Falha na Comunicação na Categoria 1

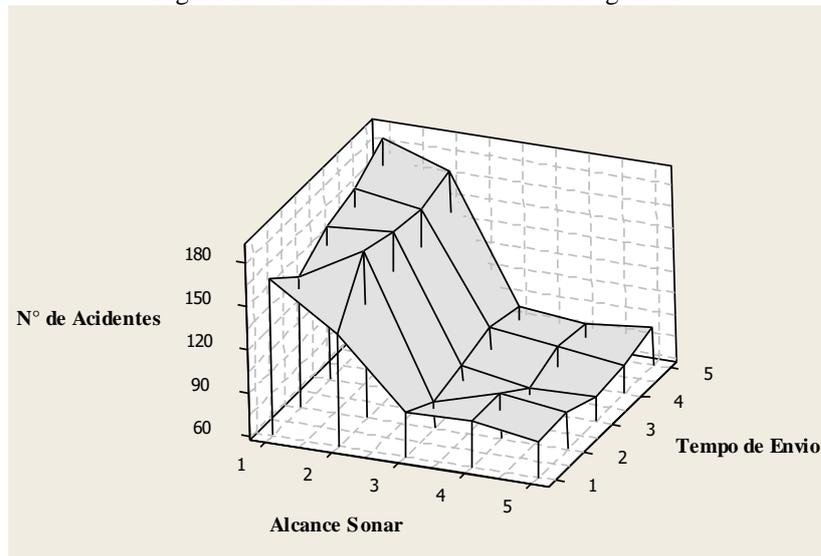


Fonte: A autora (2021)

Observa-se na Figura 3.6, que o aumento do tempo de envio e uma curta distância no alcance sonar está fortemente relacionado com a proporção de falha na comunicação, ou seja, quanto maior for o tempo de envio e menor a distância de detecção de veículos, maior será o número de mensagens não enviadas. Quando há esta implicação na comunicação V2V, as

informações deixam de ser compartilhadas entre os veículos, o que pode contribuir para um cenário de colisão. O resultado apresentado na Figura 3.7, sustenta esta hipótese.

Figura 13 – Número de Acidentes na Categoria 1



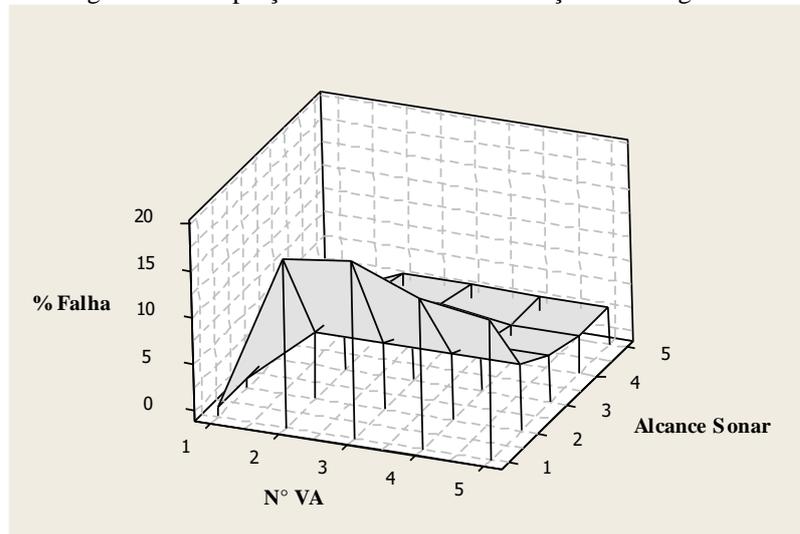
Fonte: A autora (2021)

O número de acidentes aumenta com um tempo de envio alto, no entanto, esse número se torna ainda mais elevado quando há uma curta distância do alcance sonar. Uma distância tão curta (alcance sonar = 1) provoca uma situação de risco para os veículos autônomos, já que estes não conseguem manter a distância de segurança, por não conseguirem detectar nenhum outro veículo dentro desta área. Para que um veículo autônomo, nesta situação, consiga detectar um outro veículo, é necessário que esteja a uma curta distância deste, o que pode favorecer para o cenário de acidente. Outro ponto importante, quanto a esses resultados, se dá na redução da proporção de falhas e do número de acidentes que o aumento da distância do alcance sonar provoca na simulação. É possível notar, que um alcance sonar igual ou maior que 2, diminui significativamente esses números. Com estes experimentos, pode-se concluir que o atraso no envio da mensagem, gerado pelo elevado tempo de envio, e a interrupção/não envio das mensagens devido a uma distância muito curta para o alcance sonar, pode influenciar negativamente na probabilidade de falha, ou seja, aumenta a chance de erro.

A categoria 2, alcance sonar x número de VA's, foram fixados os parâmetros: número de veículos conduzidos por motoristas humanos (VH's = 5), paciência máxima (max-patience = 30), distância de segurança (safety-distance = 3) e tempo de envio (TE = 1). Para os cinco experimentos do primeiro conjunto, o número de VA's foi fixado em 1, enquanto o alcance sonar variou de 1 a 5. No segundo conjunto, fixou-se o número de VA's em 2, enquanto o

alcance sonar variou de 1 a 5, e assim sucessivamente até o quinto conjunto, onde o número de VA's foi fixado em 5. Os resultados desses experimentos são apresentados nos gráficos das Figuras 3.8 e 3.9.

Figura 14 – Proporção de Falha na Comunicação na Categoria 2

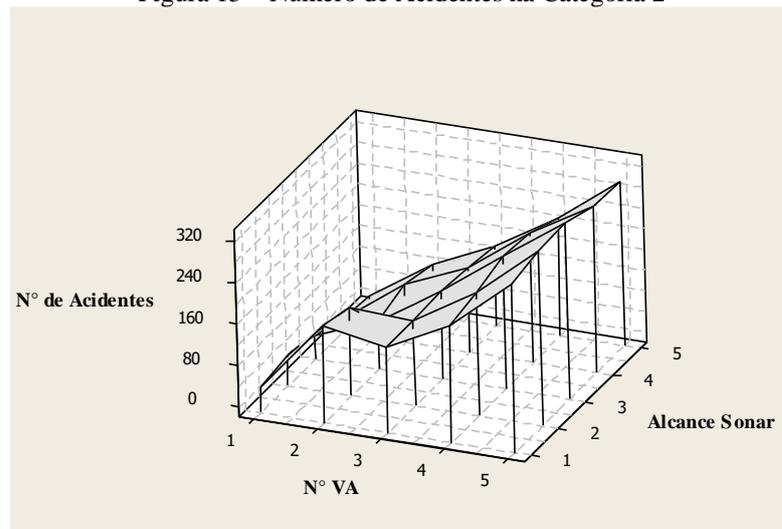


Fonte: A autora (2021)

Ao testar a relação do número de veículos autônomos e a distância do alcance sonar, observa-se na Figura 3.8, que mesmo aumentando o número de veículos autônomos no cenário, a proporção de falha na comunicação tende a diminuir com o aumento do alcance sonar. As maiores taxas de falhas são referentes a uma distância curta do alcance sonar, igual a 1.

Quando a distância do alcance sonar é maior, aumenta a área disponível para o veículo autônomo detectar e comunicar com outros veículos. Assim, os VA's conseguem trocar um maior número de informações entre eles, a respeito do ambiente em que estão e suas velocidades, por exemplo. Contudo, aumentar o número de mensagens não significa que irá aumentar a probabilidade de falha, estes fatores não tem influência um sobre o outro, de acordo com a simulação.

Figura 15 – Número de Acidentes na Categoria 2

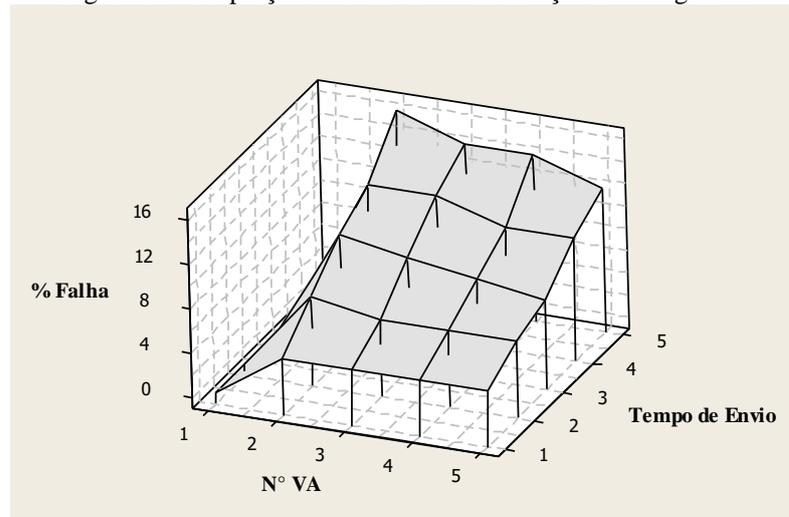


Fonte: A autora (2021)

Quanto a ocorrência de acidentes, na Figura 3.9, apesar do número aumentar quando há um número elevado de veículos no cenário, não é possível afirmar que o aumento do número de acidentes está relacionado com o aumento do número de veículos autônomos, desde que na Figura 3.8, mostra que a proporção de falha na comunicação tende a diminuir com o aumento da distância do alcance sonar. Vale lembrar, que há cinco VH's no ambiente, e que a paciência máxima, foi fixado num valor médio igual a 30. Logo, um número elevado de veículos pode comprometer o fluxo do tráfego, formando um congestionamento e contribuindo para o cenário de colisão.

A categoria 3, tempo de envio x número de VA's, foram fixados os parâmetros: número de veículos conduzidos por motoristas humanos (VH's = 5), paciência máxima (max-patience = 30), distância de segurança (safety-distance = 3) e alcance sonar (AS = 3). Para os cinco experimentos do conjunto 1, o número de VA's foi fixado em 1, enquanto o tempo de envio variou de 1 a 5. No conjunto 2, fixou-se o número de VA's em 2, enquanto o tempo de envio variou de 1 a 5, e assim sucessivamente até o conjunto 5, onde o número de VA's foi fixado em 5. Os resultados desses experimentos são apresentados nos gráficos das Figuras 3.10 e 3.11.

Figura 16 – Proporção de Falha na Comunicação na Categoria 3

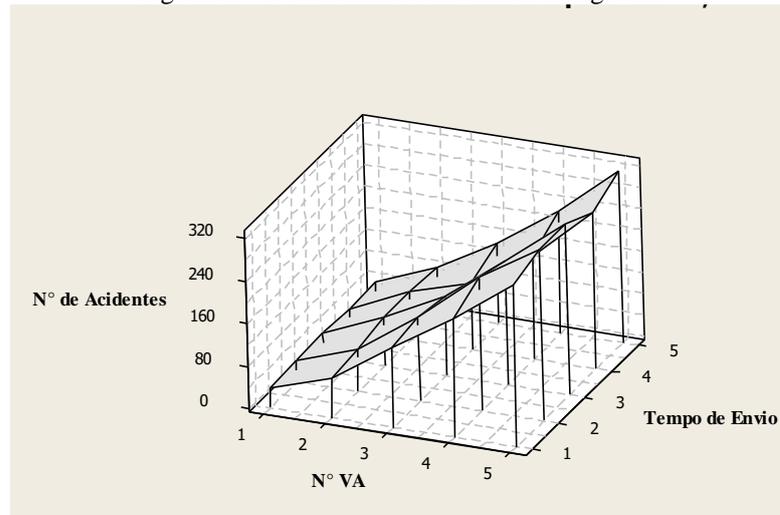


Fonte: A autora (2021)

O gráfico da Figura 3.10, mostra que o aumento do número de veículos autônomos não aumenta significativamente a proporção de falha na comunicação, no entanto, ao aumentar o tempo de envio o mesmo não ocorre. O que sustenta a informação da Figura 3.6, que o aumento no tempo de envio das mensagens durante a comunicação V2V, aumenta consideravelmente a proporção de falhas. Apesar do alcance sonar ser fixado em 3, visto que a partir de uma distância igual a 2 havia uma redução na proporção de falhas, o número de veículos autônomos aumenta, o que conseqüentemente, aumenta o número de mensagens sendo compartilhadas. Com um tempo de envio elevado, um maior número de mensagens é perdido, ou seja, um maior número de mensagens não é enviado a outros veículos. Sabe-se que a interrupção/não envio e o atraso no envio da mensagem, podem influenciar na falha de comunicação entre os veículos.

Com a Figura 3.11, pode ser feita a mesma análise da Figura 3.9 quanto ao número elevado de veículos no cenário. Um total de dez veículos neste cenário, para esta simulação, pode gerar um congestionamento e aumentar a possibilidade de colisão. Neste caso, nota-se que aumenta o número de acidentes conforme aumenta o número de veículos.

Figura 17 – Número de Acidentes na Categoria 3



Fonte: A autora (2021)

Com a simulação, é possível notar que, se os veículos autônomos criam uma distância maior do que o alcance sonar, a comunicação é interrompida e o envio da mensagem com as informações é invalidado. O monitor “Msg Falhas” mostra o número de mensagens que, devido a interrupção no compartilhamento, não foram enviadas. O atraso na comunicação, dado o tempo elevado de envio, pode causar uma colisão na ação de mudança de faixa. Por exemplo, quando o VA (1) está interagindo com outro VA (2) que se aproxima da sua posição na outra faixa, e, no entanto, não recebe a informação de sua velocidade ou orientação geográfica (localização). Apesar de ser definido uma distância de segurança entre os veículos, a velocidade do VA (2) sendo superior a velocidade do VA (1), pode levar a um cenário de colisão, se o mesmo não conseguir desacelerar a tempo. Lembrando que os veículos só mudam de faixa quando não têm mais paciência para reduzir a sua velocidade, devido a velocidade do carro a sua frente ser relativamente menor do que a sua. As causas de falha na comunicação, atraso no envio das mensagens e/ou mensagens não enviadas, e ainda, uma distância do alcance sonar, para os VA’s detectarem outros objetos, muito curta, estão fortemente relacionadas com o aumento do número de acidentes, conforme as Figuras 3.6 e 3.7.

Apesar de ser definida uma distância de segurança através do parâmetro “*safety-distance*”, por muitas vezes os veículos autônomos não conseguiram manter esta distância. Algumas razões que justificam este comportamento, se deve pela ocorrência de congestionamento na pista, devido ao número elevado de veículos no cenário, e quando o veículo autônomo está localizado entre dois veículos conduzidos por motoristas humanos. O veículo a sua frente pode reduzir a velocidade, e mesmo que o VA desacelere, o veículo logo

atrás pode decidir manter uma distância menor do que a distância de segurança programada para o VA.

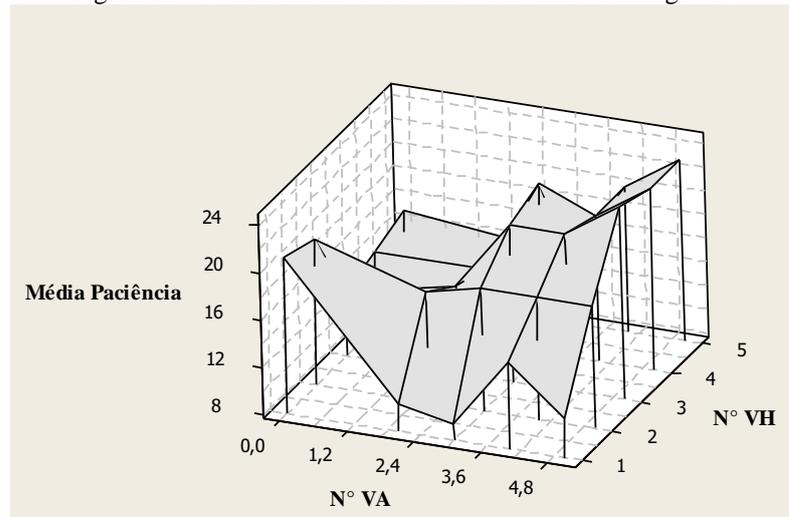
Pela simulação, pode-se notar que na formação de congestionamentos havia mais acidentes entre os veículos. É possível que o aumento do número de veículos no ambiente tenha causado um congestionamento, já que são mais veículos interagindo. Segundo os autores Liu e Jaekel (2019), o congestionamento é um fator crítico que leva ao atraso ou falha na entrega de mensagens. Desta forma, aderir a outro tipo de sistema de comunicação, como o V2I, pode ser uma alternativa para evitar um congestionamento na comunicação V2V, para que não ocorra ruídos que possam comprometer o desempenho do sistema, evitando o envio de falsas mensagens (MARE, 2018).

Outras 3 categorias foram realizadas para testar a 2ª interação deste trabalho, veículos autônomos e veículos conduzidos por motoristas humanos, dados os seguintes parâmetros: número de VA's x número de VH's, número de VA's x paciência dos motoristas humanos, número de VH's x paciência dos motoristas humanos. O objetivo desses experimentos é testar a influência dos veículos autônomos sobre o comportamento dos motoristas humanos, e se o número de veículos no cenário e a paciência dos motoristas influenciam no número de acidentes na simulação.

Para a categoria 4, número de VA's x número de VH's, foram fixados os parâmetros: paciência máxima ($\text{max-patience} = 30$), distância de segurança ($\text{safety-distance} = 3$), alcance sonar ($\text{AS} = 3$) e tempo de envio ($\text{TE} = 1$). Para os cinco experimentos do conjunto 1, número de VA's foi fixado em 0, enquanto número de VH's variou de 1 a 5. No segundo conjunto, o número de VA's foi fixado em 2, enquanto o número de VH's variou de 1 a 5. No terceiro conjunto, o número de VA's foi fixado em 3, enquanto o número de VH's variou de 1 a 5, e assim sucessivamente até o 5º conjunto, em que o número de VA's foi igual a 5. A variação do número de VA's se deu desta forma, para que fosse testado cenários sem a presença de VA's e o número de VA's igual ao número de VH's. Os resultados desses experimentos serão apresentados em três gráficos, pela média da paciência dos motoristas, pela média da velocidade dos motoristas e pelo número de acidentes entre veículos. Os gráficos das Figuras 3.12, 3.13 e 3.14 mostram esses resultados.

Observa-se na Figura 3.12, que o número de veículos autônomos no ambiente não tem uma influência significativa sobre a paciência dos motoristas.

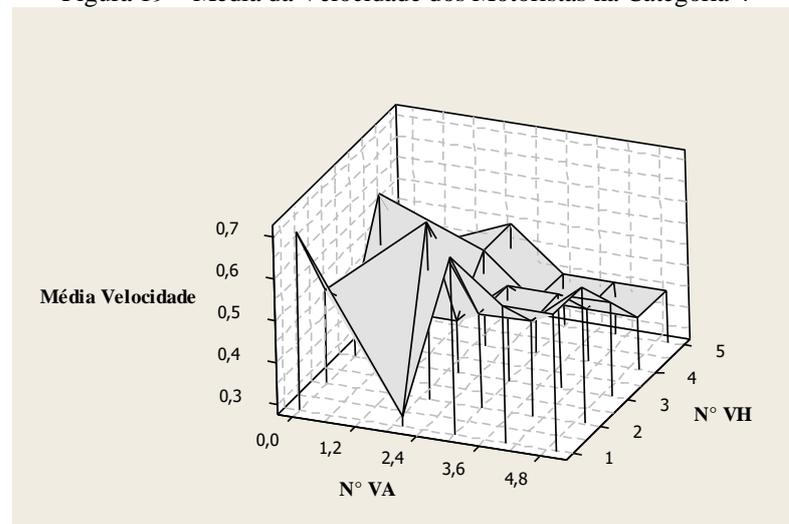
Figura 18 – Média da Paciência dos Motoristas na Categoria 4



Fonte: A autora (2021)

No entanto, na Figura 3.13, à medida que aumenta o número de veículos, a velocidade média dos motoristas se torna menor. Este efeito pode ser devido ao congestionamento formado dado o número elevado de veículos no ambiente.

Figura 19 – Média da Velocidade dos Motoristas na Categoria 4

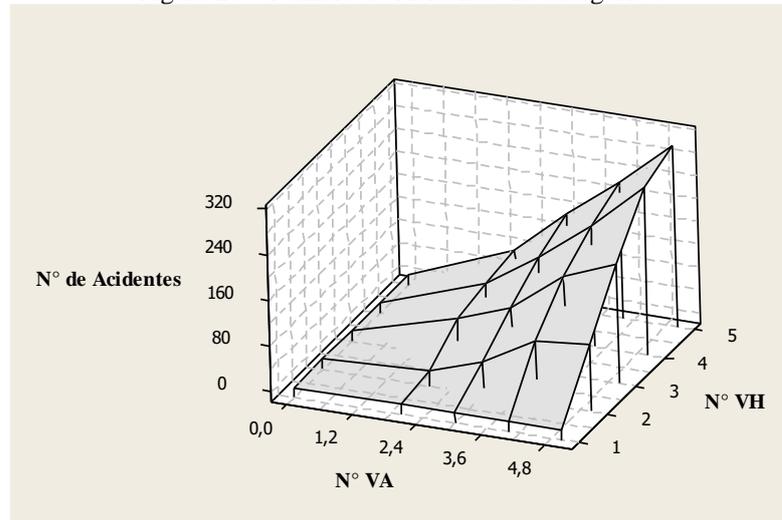


Fonte: A autora (2021)

Outra observação pode ser feita, nesta categoria para uma paciência máxima igual a 30, com os gráficos das Figuras 3.12 e 3.13, no momento em que a média de paciência dos motoristas é maior, a média de suas velocidades está menor. Em alguns momentos, nota-se também, quando a média de paciência é menor, a média de suas velocidades está maior. Na Figura 3.14, é apresentado o número de acidentes que ocorreram na simulação. Nota-se que o número de acidentes está diretamente relacionado com o aumento do número de veículos

conduzidos por motoristas humanos. Ainda que nestes experimentos, são testados o número de veículos no ambiente, com o gráfico é possível observar que apesar de aumentar o número de veículos autônomos, o número de acidentes ganha uma proporção maior quando se aumenta o número de motoristas humanos.

Figura 20 – Número de Acidentes na Categoria 4

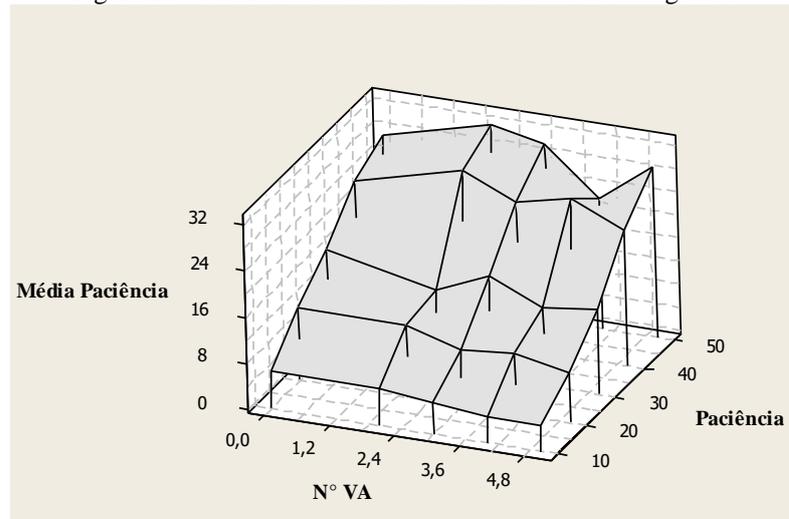


Fonte: A autora (2021)

Para a categoria 5, número de VA's x paciência dos motoristas humanos, foram fixados os parâmetros: número de veículos conduzidos por motoristas humanos (VH's = 3), distância de segurança (safety-distance = 3), alcance sonar (AS = 3) e tempo de envio (TE = 1). Para os cinco experimentos do conjunto 1, número de VA's foi fixado em 0, enquanto a paciência máxima variou de 1 a 5. No segundo conjunto, o número de VA's foi fixado em 2, enquanto a paciência máxima variou de 1 a 5. No terceiro conjunto, o número de VA's foi fixado em 3, enquanto a paciência máxima variou de 1 a 5, e assim sucessivamente até o 5º conjunto, em que o número de VA's foi igual a 5. Os resultados desses experimentos são apresentados nos gráficos das Figuras 3.15, 3.16 e 3.17.

A Figura 3.15 mostra que a média de paciência dos motoristas aumenta, conforme aumenta o parâmetro de paciência máxima, no entanto, o número de VA's não tem influência na paciência dos motoristas.

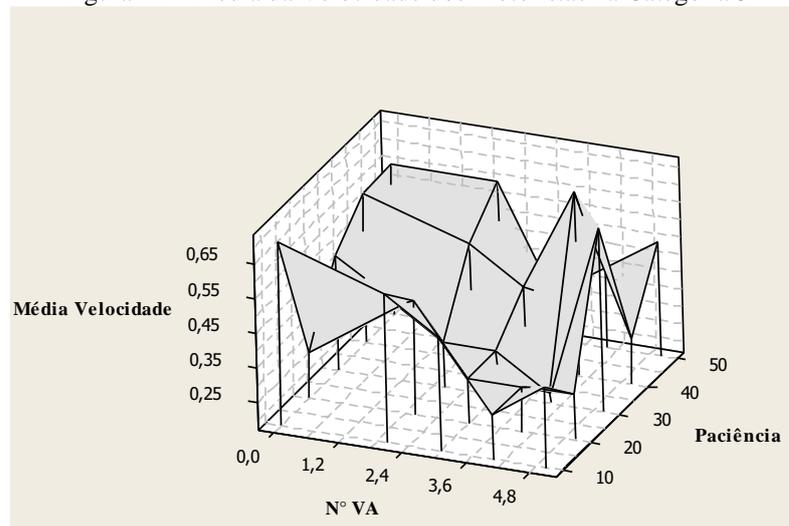
Figura 21 – Média da Paciência dos Motoristas na Categoria 5



Fonte: A autora (2021)

Nesta categoria, de acordo com o gráfico da Figura 3.16, há uma observação diferente da que foi feita na categoria 4. O aumento da velocidade dos motoristas, não é proporcional a diminuição da sua paciência. Nestes experimentos, em um determinado momento a paciência não mais influenciou na velocidade dos motoristas.

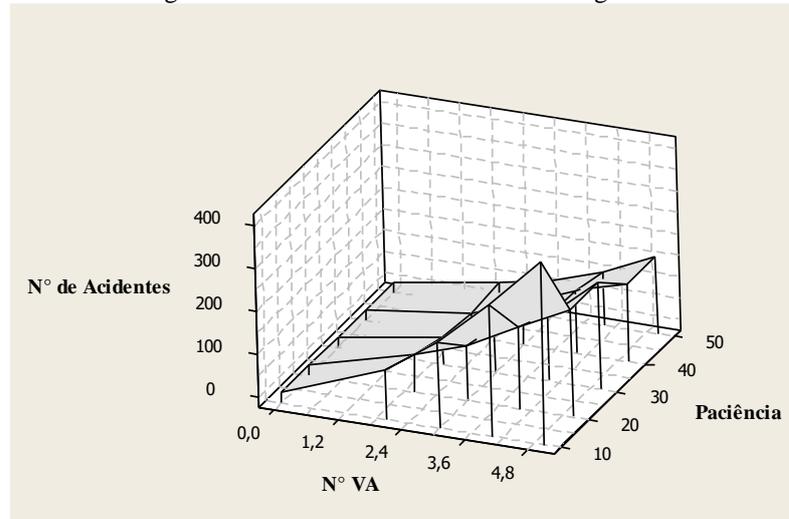
Figura 22 – Média da Velocidade dos Motoristas na Categoria 5



Fonte: A autora (2021)

Nesta categoria, há um número fixo de veículos conduzidos por motoristas humanos igual a 3. O número de acidentes aumenta na medida que mais veículos são inseridos no ambiente e os motoristas são mais impacientes. Com os resultados destes experimentos, a Figura 3.17, mostra que a possibilidade de ocorrência de acidentes é maior quando os motoristas são mais impacientes e há mais veículos no cenário.

Figura 23 – Número de Acidentes na Categoria 5

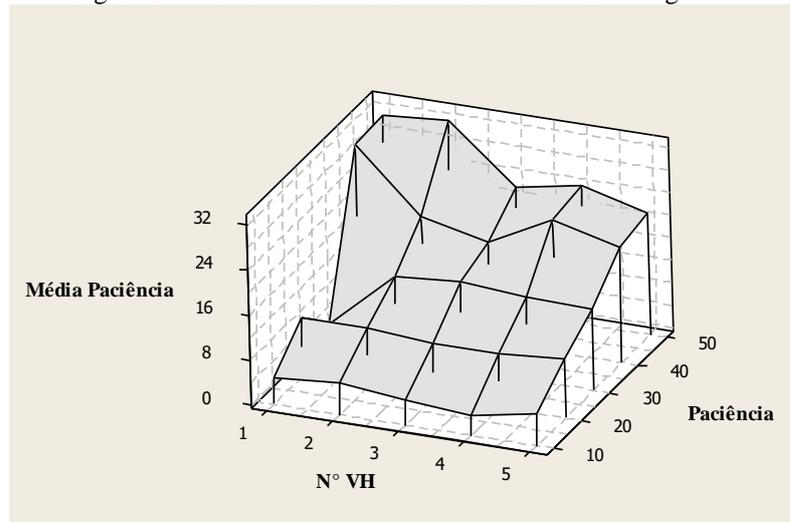


Fonte: A autora (2021)

Para a categoria 6, número de VH's x paciência dos motoristas humanos, foram fixados os parâmetros: número de veículos autônomos (VA's = 3), distância de segurança (safety-distance = 3), alcance sonar (AS = 3) e tempo de envio (TE = 1). Para os cinco experimentos do conjunto 1, número de VH's foi fixado em 1, enquanto a paciência máxima variou de 1 a 5. No segundo conjunto, o número de VH's foi fixado em 2, enquanto a paciência máxima variou de 1 a 5, e assim sucessivamente até o 5º conjunto, em que o número de VH's foi igual a 5. Os resultados desses experimentos são apresentados nos gráficos das Figuras 3.18, 3.19 e 3.20.

Como na categoria 5, a Figura 3.18 mostra que a média da paciência dos motoristas é maior conforme aumenta o parâmetro de paciência máxima, tendo uma leve diminuição com o aumento do número de VH's. No entanto, pode-se dizer que o número de veículos no ambiente não influencia significativamente na paciência dos motoristas.

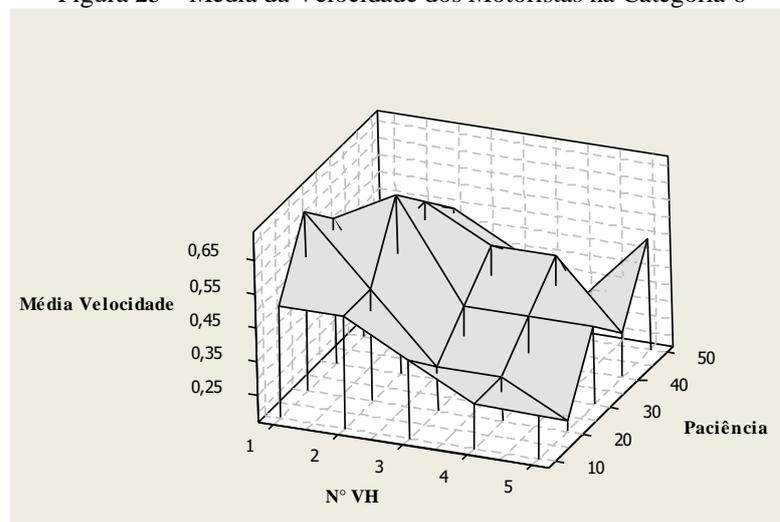
Figura 24 – Média da Paciência dos Motoristas na Categoria 6



Fonte: A autora (2021)

Outra conclusão pode ser feita com o gráfico da Figura 3.19, a paciência também não influenciou na velocidade dos motoristas. Os VH's mantiveram uma média de velocidade maior quando havia poucos veículos no ambiente, à medida que o número de veículos aumentou, sua velocidade média diminuiu.

Figura 25 – Média da Velocidade dos Motoristas na Categoria 6

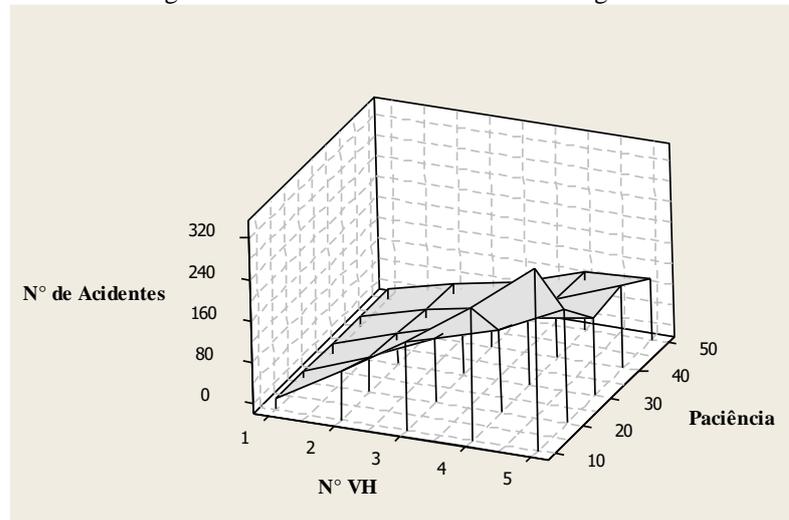


Fonte: A autora (2021)

Nesta categoria, os experimentos tinham como fixo, o número de veículos autônomos igual a 3. Para número de veículos conduzidos por motoristas humanos igual a 1, a proporção de veículos autônomos no ambiente é maior, neste experimento, não houve nenhuma ocorrência de acidente. Diferente da categoria 5, em que haviam 3 VH's e nenhum VA, e houve ocorrência de 1 acidente em 4 experimentos do conjunto de 5. Com a Figura 3.20

conclui-se que, quanto menor for a paciência dos motoristas, maior a possibilidade de ocorrência de acidentes.

Figura 26 – Número de Acidentes na Categoria 6



Fonte: A autora (2021)

Um motorista muito paciente pode, por muitas vezes, reduzir sua velocidade, neste caso, se há um veículo autônomo atrás, ele será obrigado a reduzir sua velocidade até que consiga mudar de faixa. Se o motorista for impaciente, seu comportamento pode resultar numa condução mais agressiva, se houver muitos veículos no cenário, isso pode dificultar para o veículo autônomo realizar a ação de mudança de faixa de forma segura.

Quanto ao comportamento agressivo dos motoristas, é notável com a simulação que quanto menor for a sua paciência, maior a probabilidade de ocorrer uma colisão. A impaciência é um dos tipos de agressividade com maior relação ao comportamento de risco (SILVA, 2016).

Um comportamento de direção agressivo é também motivado pela tentativa do motorista em economizar tempo (TASCA, 2000), o que pode justificar o cenário de colisão quanto a impaciência em aguardar por uma distância segura antes de mudar de faixa. De acordo com o estudo dos autores Hui et al. (2011), motoristas impacientes estão fortemente relacionados com a ocupação do espaço de condução, avanço rápido, obtenção de liderança e desconsideração dos outros. Esta afirmação pode ser justificada pelos resultados obtidos nesta simulação.

4 CONCLUSÃO

Neste trabalho foram apresentados alguns avanços no que diz respeito à tomada de decisão em um cenário de conflito entre veículos autônomos, quando há a possibilidade de ocorrer falha na comunicação, e ao comportamento de motoristas humanos quando estão interagindo com veículos autônomos.

Ao tomar como base o modelo *Chicken Game*, foram levantadas hipóteses para os possíveis resultados que a falha na comunicação entre veículos autônomos pode gerar. Para melhor visualização do resultado desta interação, foi construída a árvore para o jogo. Em um cenário de falha, a melhor escolha que o jogador pode fazer é aquela que seu adversário comunicar, pois sabendo-se da ocorrência de falha, o adversário irá escolher a ação oposta à informada.

O software escolhido para simular a interação entre os veículos foi o Netlogo. Em um primeiro momento, foi observada a probabilidade de falha na comunicação entre veículos autônomos. Durante a simulação observou-se que o aumento no tempo de envio das mensagens, ou seja, o atraso e a curta distância para o alcance sonar estão fortemente relacionados com o aumento na ocorrência de falhas e com o aumento no número de colisões. Conclui-se que apesar de ser definida uma distância de segurança através do parâmetro “*safety-distance*”, os veículos autônomos não conseguem manter esta distância durante todo o percurso, principalmente quando ocorre um congestionamento na pista e o veículo autônomo se encontra entre dois veículos conduzidos por seres humanos.

No segundo momento, ao realizar simulações para observar a influência do veículo autônomo sobre o comportamento do motorista humano, viu-se que quanto mais impaciente for o motorista mais agressiva é a sua condução, aumentando assim a possibilidade de colisões. Notou-se que o número elevado de veículos, causa congestionamento no ambiente, podendo interferir no tempo de viagem final, devido a velocidade média ser baixa, além de aumentar o risco de acidentes. O congestionamento no ambiente, também dificulta para o veículo autônomo realizar a ação de mudança de faixa de forma segura. Em alguns experimentos, como os da categoria 4, é possível notar que o aumento no número de VH's pode aumentar a ocorrência de colisões, enquanto que em um ambiente com maior número de VA's, o número de colisão é reduzido e chega a ser próximo ou igual a zero, como mostram os resultados das categorias 4 e 6. Outro parâmetro que reduziu o número de colisões, apesar do número de veículos, é o aumento da paciência máxima, como já foi mencionado.

Em geral, percebe-se que o objetivo geral e os objetivos específicos deste trabalho foram alcançados ao longo da dissertação.

Vale ressaltar que este trabalho consiste em um estudo exploratório, onde as hipóteses levantadas através da simulação não foram testadas no cenário real. Além desse fator, houve uma limitação em trabalhos encontrados na literatura com a incorporação em suas modelagens de possíveis falhas presentes no processo decisório a partir do sistema de comunicação (V2V). No entanto, com base no estudo de aspectos comportamentais de veículos autônomos e motoristas humanos, das hipóteses levantadas e da relevância que os modelos da teoria dos jogos podem ter para abordagens de tomada de decisão em situações de conflito, é possível perceber a incitação de pesquisas futuras que podem ser desenvolvidas sobre este tema.

4.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Conforme abordado anteriormente, a pesquisa desenvolvida teve caráter exploratório e ainda há muito o que ser investigado sobre a interação com veículos autônomos. Como propostas para trabalhos futuros, sugere-se a elaboração da comunicação V2I quando há congestionamento no tráfego, se ao inserir essa forma de comunicação irá beneficiar o tráfego quanto ao desempenho de veículos autônomos ao identificar a presença de veículos conduzidos por motoristas humanos. Uma segunda sugestão é analisar o comportamento de outros usuários no tráfego quando estão em interação com veículos autônomos. Outra sugestão é relacionar a tomada de decisão com um fator de emoção (ansiedade, medo, orgulho) de outros usuários participantes, buscando assim a complementação desta pesquisa, assim como de outras que estão sendo desenvolvidas. E por fim, seria interessante levantar posições éticas para apresentar os possíveis *payoff's* do veículo autônomo ao realizar uma ação diferente da ação informada a outra veículo, ou seja, quando ocorrer uma falha na comunicação que resulta em uma colisão.

REFERÊNCIAS

- ABD-ELRAHMAN, E.; SAID, A.M.; TOUKABRI, T.; AFIFI, H.; MAROT, M. Assisting V2V failure recovery using device-to-device communications. In: 2014 IFIP Wireless Days (WD). IEEE, p. 1-3, 2014.
- ACKERMANN, C.; BEGGIATO, M.; SCHUBERT, S.; KREMS, J.F. An experimental study to investigate design and assessment criteria: What is important for communication between pedestrians and automated vehicles?. *Applied ergonomics*, v. 75, p. 272-282, 2019.
- AL-SULTAN, S.; AL-DOORI, M.M.; AL-BAYATTI, A.H; ZEDAN, H. A comprehensive survey on vehicular ad hoc network. *Journal of network and computer applications*, v. 37, p. 380-392, 2014.
- BANJANOVIC-MEHMEDOVIC, L.; HALILOVIC, E.; BOSANKIC, I.; KANTARDZIC, M.; KASAPOVIC, S. Autonomous vehicle-to-vehicle (v2v) decision making in roundabout using game theory. *Int. J. Adv. Comput. Sci. Appl*, v.7, p. 292-298. 2016.
- CAMARA, F.; ROMANO, R.; MARKKULA, G.; MADIGAN, R.; MERAT, N.; FOX, C. Empirical game theory of pedestrian interaction for autonomous vehicles. In: *Proceedings of Measuring Behavior*. Manchester Metropolitan University, 2018.
- CHATER, N.; MISYAK, J.; WATSON, D.; GRIFFITHS, N.; MOUZAKITIS, A. Negotiating the traffic: can cognitive science help make autonomous vehicles a reality? *Trends in cognitive sciences*, v. 22, n. 2, p. 93-95, 2018.
- CLAMANN, M.; AUBERT, M.; CUMMINGS, M.L. Evaluation of vehicle-to-pedestrian communication displays for autonomous vehicles. 2017.
- DIAS, J.E.A. Modelagem longitudinal e controle de velocidade de um carro autônomo. *Dissertação de Mestrado*. 2013.
- DO NASCIMENTO, F.P. Classificação da Pesquisa. Natureza, método ou abordagem metodológica, objetivos e procedimentos. Brasília: Thesaurus, 2016.
- DU, S.; HUANG, T.; HOU, J.; SONG, S.; SONG, Y. FPGA based acceleration of game theory algorithm in edge computing for autonomous driving. *Journal of Systems Architecture*, v. 93, p. 33-39, 2019.
- FIANI, R. *Teoria dos jogos*. Elsevier Brasil, 2006.
- FREITAS, J.A.P. Desenho e regulação de redes viárias: Desafios colocados pelos veículos autônomos. *Dissertação de Mestrado integrado em Engenharia Civil à Faculdade de Ciências e Tecnologia*. Coimbra, 2019.
- GAO, P.; HENSLEY, R.; ZIELKE, A. A road map to the future for the auto industry. *McKinsey Quarterly*, Oct, 2014.
- Gibbons, R.S. (1992). *Game Theory for applied Economists*. Princeton University Press.

GIL, A.C. Como elaborar projetos de pesquisa. São Paulo: Atlas, 2002.

GOGOLL, J.; MÜLLER, J.F. Autonomous cars: in favor of a mandatory ethics setting. *Science and engineering ethics*, v. 23, n. 3, p. 681-700, 2017.

HUI, L.; YONG, L.; SHIBO, Z.; YANFEI, S.; XIAOHAN, L.; JIAN, L.; XIA, L. RESEARCH BETWEEN AGGRESSIVE DRIVING BEHAVIOR AND TYPE A BEHAVIOR 2. In: 3rd International Conference on Road Safety and Simulation Purdue University Transportation Research Board. 2011.

JING, P.; HU, H.; ZHAN, F.; CHEN, Y.; SHI, Y. Agent-based simulation of autonomous vehicles: A systematic literature review. *IEEE Access*, v. 8, p. 79089-79103, 2020.

KATRAKAZAS, C.; QUDDUS, M.; CHEN, WH.; DEKA, L. Real-time motion planning methods for autonomous on-road driving: State-of-the-art and future research directions. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, v. 60, p. 416- 442, 2015.

LEVINSON, J.S. Automatic laser calibration, mapping, and localization for autonomous vehicles. Stanford University, 2011.

LITMAN, T. Autonomous vehicle implementation predictions. Victoria, Canada: Victoria Transport Policy Institute, 2017.

LI, N.; OYLER, D.W.; ZHANG, M.; YILDIZ, Y.; KOLMANOVSKY, I.; GIRARD, A.R. Game theoretic modeling of driver and vehicle interactions for verification and validation of autonomous vehicle control systems. *IEEE Transactions on control systems technology*, v. 26, n. 5, p. 1782- 1797, 2017

LIU, C.; TOMIZUKA, M. "Enabling safe freeway driving for automated vehicles", *Proc. IEEE 2016 Amer. Control Conf.*, pp. 3461-3467, 2016.

LIU, X.; JAEKEL, A. Congestion control in V2V safety communication: Problem, analysis, approaches. *Electronics*, v. 8, n. 5, p. 540, 2019.

LOBO JUNIOR, A.F. Modelos para o planejamento de infraestruturas de comunicações veiculares. Dissertação - Programa de Pós Graduação do Centro de Informática da Universidade Federal de Pernambuco. Recife, 2016.

LOUSA, A.J.M. Veículos autónomos e conectados-tecnologia e identificação de possíveis alterações na infraestrutura de transporte. Dissertação de Mestrado. Universidade de Coimbra. 2018.

MACEDO, P. Tudo sobre Veículos Autônomos. *Brazil Journal*. 2019. Disponível em: <https://braziljournal.com/tudo-sobre-veiculos-autonomos>.

MAHADEVAN, K.; SOMANATH, S.; SHARLIN, E. Communicating awareness and intent in autonomous vehicle-pedestrian interaction. In: *Proceedings of the 2018 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*. 2018. p. 1-12.

- MARÈ, R. M. Proposta e avaliação de um sistema complementar de posicionamento baseado em comunicação por luz visível aplicado a sistemas inteligentes de transporte. São Paulo, 2018.
- MAS-COLELL, A.; WHINSTON, M.D.; GREEN, J.R. Microeconomic theory. New York: Oxford University Press, 1995.
- MAURER, M.; GERDES, J.C.; LENZ, B.; WINNER, H. Autonomous driving. Berlin, Germany: Springer Berlin Heidelberg, v. 10, 2016.
- MILLARD-BALL, A. Pedestrians, autonomous vehicles, and cities. *Journal of Planning Education and Research*, v. 38, n. 1, p. 6-12, 2018.
- MINITAB Inc. Statistical Software Data Analysis Software. Version 16.
- MITCHELL, W.J.; BORRONI-BIRD, C.E.; BURNS, L.D. Reinventing the automobile: Personal urban mobility for the 21st century. MIT press, 2010
- MOSTEFA, F.Z.; MAAZA, Z.M.; DUVALLET, C. Secure Communications by Tit-for-Tat Strategy in Vehicular Networks. *International Journal of Networked and Distributed Computing*, v. 8, n. 4, p. 214-221, 2020.
- MYERSON, R.B. (1991), *Game Theory: Analysis of Conflict*. Harvard University Press, Cambridge, MA.
- NASH, J. Non-cooperative games. *Annals of mathematics*, p. 286-295, 1951.
- NASH, J. Two-person cooperative games. *Econometrica: Journal of the Econometric Society*, p. 128-140, 1953.
- [NHTSA, 2013] NHTSA. *Driving Safety*. National Highway Traffic Safety Administration.
- OSBORNE, M.J.; RUBINSTEIN, A. *A course in game theory*. MIT press, 1994.
- PETERS, H. *Game theory: A Multi-leveled approach*. Springer, 2015.
- PETTIGREW, S. WORRALL, C.; TALATI, Z.; FRITSCHI, L.; NORMAN, R. Dimensions of attitudes to autonomous vehicle. *Urban, Planning and Transport Research*, v. 7, n. 1, p. 19-33, 2019.
- PIMENTEL, E.A. Um ensaio em teoria dos jogos. 2010. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.
- PISSARDINI, R.S. Veículos autônomos de transporte terrestre: proposta de arquitetura de tomada de decisão para navegação autônoma. Dissertação de Mestrado. Universidade de São Paulo. 2014.
- PITON, C.L.; RAMOS, F.S. Análise da tomada de decisão na interação de veículos autônomos em cenários específicos. INSID, 2019.

RASHID, K.I.; TAHIR, M.; NAN, D.; AHMED, A. An Adaptive Cruise Control Model based on PDLCA for Efficient Lane Selection and Collision Avoidance. *INTERNATIONAL JOURNAL OF ADVANCED COMPUTER SCIENCE AND APPLICATIONS*, v. 9, n. 4, p. 41-49, 2018.

RIAZ, F.; JABBAR, D.; SAJID, M.; AHMAD, M.; NASEER, K.; ALI, N. A collision avoidance scheme for autonomous vehicles inspired by human social norms. *Computers & Electrical Engineering*, v. 69, p. 690-704, 2018.

ROMP, G. *Game theory: introduction and applications*. Oxford University Press on Demand, 1997.

ROSS, D. "Game Theory", *The Stanford Encyclopedia of Philosophy* (Winter 2019 Edition), Edward N. Zalta (ed.) 2019.

SÁ, M.; GORENDER, S. *Monitoração inteligente de estados de comunicação para aplicações sobre redes veiculares*. Salvador, BA. 2012.

SAE International. *SAE Standards News: J3016 automated-driving graphic update*. Warrendale, PA 15096: Jennifer Shuttleworth. 2019.

SANTOS, L. C.B.; TACO, P.W.G.; FEITOSA, Z.O. Panorama geral dos potenciais benefícios e desafios da implantação de veículos autônomos individuais para a mobilidade urbana por meio de uma revisão sistemática da literatura. *Revista dos Transportes Públicos-ANTP*, v. 40, p. 3, 2017.

SARAOGLU, M.; HART, F.; MOROZOV, A.; JANSCHKEK, K. Fault-tolerant path planning in networked vehicle systems in presence of communication failures. *IFAC-PapersOnLine*, v. 51, n. 23, p. 82-87, 2018.

SAVIC, V.; SCHILLER, E.M.; PAPATRIANTAFILOU, M. Distributed algorithm for collision avoidance at road intersections in the presence of communication failures. In: *2017 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV)*. p. 1005-1012. IEEE, 2017.

SIHLOBO, W. *A review of game theory*. 2012.

SILVA, J.R.C. *Estudo da relação entre estilos de agressividade, comportamentos de risco na condução e resolução de problemas em condutores*. Dissertação de Mestrado. 2016.

SILVA, N.C.; GALHARDI, A.C. A influência da densidade e mobilidade na comunicação inter-veicular. In: *Anais do Simpósio de Engenharia de Produção - SIMEP*. Joinville, SC. 2017.

SINGH, S. *Critical reasons for crashes investigated in the national motor vehicle crash causation survey*. 2015.

SOUSA, R.S. *Protocolo de Sinalização de Congestionamento para Redes Veiculares*. Dissertação - Programa de Pós-Graduação em Ciência da Computação da Universidade Federal do Piauí. Teresina, 2016

STANCIU, S.C.; EBY, D.W.; MOLNAR, L.J.; ST. LOUIS, R.M.; ZANIER, N.; KOSTYNIUK, L.P. Pedestrians/bicyclists and autonomous vehicles: how will they communicate?. *Transportation research record*, v. 2672, n. 22, p. 58-66, 2018.

SCHWARTING, W.; PIERSON, A.; ALONSO-MORA, J.; KARAMAN, S.; RUS, D. Social behavior for autonomous vehicles. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, v. 116, n. 50, p. 24972-24978, 2019.

TASCA, L. A review of the literature on aggressive driving research. Ontario, Canada: Ontario Advisory Group on Safe Driving Secretariat, Road User Safety Branch, Ontario Ministry of Transportation, 2000.

TUROCY, T. L. Texas a&m University. von STENGEL, B. London School of Economics. *Game Theory*. CDAM Research Report, 2001.

UNSAI, C. Intelligent navigation of autonomous vehicles in an automated highway system: Learning methods and interacting vehicles approach. 1998. Tese de Doutorado. Virginia Tech.

WEI, D.C. Método de desvio de obstáculos aplicado em veículo autônomo. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo. 2015.

WILENSKY, U.; PAYETTE, N. NetLogo traffic 2 lanes model. Center for Connected Learning and Computer-Based Modeling, Northwestern University, Evanston, IL, 1998.

WILENSKY, U. NetLogo. Center for connected learning and computer-based modeling, Northwestern University, Evanston, IL. 1999. See <http://ccl.northwestern.edu/netlogo>.

WOLF, I. The interaction between humans and autonomous agents. In: *Autonomous driving*. Springer, Berlin, Heidelberg, 2016. p. 103-124.

XU, L.; WANG, Y.; SUN, H.; XIN, J.; ZHENG, N. Integrated longitudinal and lateral control for Kuafu-II autonomous vehicle. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, v. 17, n. 7, p. 2032-2041, 2015.

YU, H.; TSENG, H. E.; LANGARI, R. A human-like game theory-based controller for automatic lane changing. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, v. 88, p. 140-158, 2018.

ZHENG, B.; SAYIN, M.O.; LIN, C.W.; SHIRAISHI, S.; ZHU, Q. Timing and security analysis of VANET-based intelligent transportation systems. *IEEE/ACM International Conference on Computer-Aided Design*. 2017.

APÊNDICE A – ROTINA DE PROGRAMAÇÃO

```
globals [
  lanes
  message-time
  lost-message
  success-message
  success-rate
  message?
]
```

```
breed [ accidents accident ]
```

```
links-own [ messages message ]
```

```
accidents-own [
  clear-in
  speed
  wait-time
  patience
  accident-count
]
```

```
breed [ cars car ]
```

```
breed [ vas va ]
```

```
cars-own [
  speed
  top-speed
  target-lane
  patience
]
```

```
vas-own [
  speed
  top-speed
  target-lane
  patience
  nearest-va
]
```

```
to setup
  clear-all
  set-default-shape cars "car"
  set-default-shape vas "car"
  draw-road
  create-or-remove-cars
  create-or-remove-vas
  set message-time 1
  set lost-message 0
```

```

    set success-message 0
  set-default-shape accidents "fire"
  reset-ticks
end

```

```

to create-or-remove-cars
  let road-patches patches with [ member? pycor lanes ]
  if number-of-cars > count road-patches [
    set number-of-cars count road-patches
  ]

```

```

  create-cars (number-of-cars - count cars) [
    ask cars [set color blue]
    move-to one-of free road-patches
    set target-lane pycor
    set heading 90
    set top-speed 0.1 + random-float 0.9
    set speed 0.5
    set patience random max-patience
  ]
end

```

```

to create-or-remove-vas
  let road-patches patches with [ member? pycor lanes ]
  let num-vas round (percent-autonomous * number-of-cars)
  if num-vas > count road-patches [
    set num-vas count road-patches
  ]

```

```

  create-vas (num-vas - count vas) [
    ask vas [ set color yellow ]
    if any? vas [
      move-to one-of free road-patches
      set target-lane pycor
      set heading 90
      set top-speed 1
      set speed 0.1 + random-float 0.9
      set patience 1 ]
  ]
end

```

```

to-report free [ road-patches ]
  let this-car self
  report road-patches with [ (
    not any? cars-here with [ self != this-car ] ) or ( not any? vas-here with [ self != this-car ] )
  ]
  let this-va self
  report road-patches with [ (
    not any? vas-here with [ self != this-va ] ) or ( not any? cars-here with [ self != this-va ] )
  ]

```

```
]
end
```

```
to-report autonomous [ road-patches ]
let num-vas number-of-cars * percent-autonomous
set nearest-va sum [ count vas-here ] of sonar-range
set nearest-va count link-neighbors with [ color = yellow ]
if any? vas [
  ifelse free patch-ahead sonar-range < safety-distance [ safety ] [ move-to road-patches ]
  ifelse distance patch-ahead nearest-va > safety-distance
  [ safety ]
  [ check-for-collisions ]
  die ]
end
```

```
to safety
let closest min-one-of other vas [ distance myself ]
show closest
type "distance closest: " print distance closest
type "safety-distance: " print safety-distance
ifelse (distance closest > safety-distance)
[ speed-up-va ]
[ slow-down-va]
end
```

```
to draw-road
ask patches [
  set pcolor green - random-float 0.5
]
set lanes n-values number-of-lanes [ n -> number-of-lanes - (n * 2) - 1 ]
ask patches with [ abs pycor <= number-of-lanes ] [
  set pcolor grey - 2.5 + random-float 0.25
]
draw-road-lines
end
```

```
to draw-road-lines
let y (last lanes) - 1
while [ y <= first lanes + 1 ] [
  if not member? y lanes [
    ifelse abs y = number-of-lanes
    [ draw-line y yellow 0 ]
    [ draw-line y white 0.5 ]
  ]
  set y y + 1
]
end
```

```
to draw-line [ y line-color gap ]
```

```

create-cars 1 [
  setxy (min-pxcor - 0.5) y
  hide-turtle
  set color line-color
  set heading 90
  repeat world-width [
    pen-up
    forward gap
    pen-down
    forward (1 - gap)
  ]
  die
]
create-vas number-of-cars * percent-autonomous [
  setxy (min-pxcor - 0.5) y
  hide-turtle
  set color line-color
  set heading 90
  repeat world-width [
    pen-up
    forward gap
    pen-down
    forward (1 - gap)
  ]
  die
]
end

to go
  create-or-remove-cars
  create-or-remove-vas
  ask cars [ move-forward ]
  ask cars with [ patience <= 0 ] [ choose-new-lane ]
  ask cars with [ ycor != target-lane ] [ move-to-target-lane ]
  ask vas [ move-forward ]
  ask vas with [ patience <= 0 ] [ choose-new-lane ]
  ask vas with [ ycor != target-lane ] [ move-to-target-lane ]
  check-for-collisions
  v2v-break
  v2v
  ping-everyone
  summarize
  tick
end

to-report communication
  ask vas [ v2v ]
  ifelse any? other vas-here with [ message? ]
  [ set message? true ] [ safety]

```

```

set message? false ifelse distance myself < safety-distance
[ slow-down-va ]
[ check-for-collisions ]
die
end

```

```

to ping-everyone
ask links [ if message = 0 [ set message [ ] ] ]
ask links [ set message lput ticks message set thickness (0.02 * length message)]
ask links [ if ( item 0 message < ( ticks - message-time ) )
[ set message butfirst message
set success-message success-message + 1 ] ]
end

```

```

to summarize
let time ticks
if (time = 0) [ set time 1 ]
set success-rate ( success-message / time )
end

```

```

to v2v-break
ask links with [ link-length > sonar-range + 1 ] [
let losing-count length message
set lost-message lost-message + losing-count
set color red
display
die ]
end

```

```

to v2v
ask vas [ create-links-to other vas with [ distance myself <= sonar-range ] ]
end

```

```

to move-forward
set heading 90
speed-up-car
let blocking-cars other turtles in-cone (1 + speed) 180 with [ y-distance <= 1 ]
let blocking-car min-one-of blocking-cars [ distance myself ]
if blocking-car != nobody [
set speed [ speed ] of blocking-car
slow-down-car
]
set heading 90
speed-up-va
let blocking-vas other turtles in-cone (1 + speed) 180 with [ y-distance <= 1 ]
let blocking-va min-one-of blocking-vas [ distance myself ]
if blocking-va != nobody [
set speed [ speed ] of blocking-va
slow-down-va
]

```

```

]
forward speed
end

```

```

to slow-down-car
  set speed (speed - deceleration)
  if speed < 0 [ set speed deceleration ]
  set patience patience - 1
end

```

```

to slow-down-va
  set speed (speed - deceleration)
  if speed < 0 [ set speed deceleration ]
set patience patience - 1
end

```

```

to speed-up-car ; turtle procedure
  set speed (speed + acceleration)
  if speed > top-speed [ set speed top-speed ]
end

```

```

to speed-up-va
  set speed (speed + acceleration)
  if speed > top-speed [ set speed top-speed ]
end

```

```

to choose-new-lane
  let other-lanes remove ycor lanes
  if not empty? other-lanes [
    let min-dist min map [ y -> abs (y - ycor) ] other-lanes
    let closest-lanes filter [ y -> abs (y - ycor) = min-dist ] other-lanes
    set target-lane one-of closest-lanes
    ask cars [ set patience random max-patience ]
    ask vas [ set patience 1 ]
  ]
end

```

```

to move-to-target-lane
  set heading ifelse-value target-lane < ycor [ 180 ] [ 0 ]
  let blocking-cars other turtles in-cone (1 + abs (ycor - target-lane)) 180 with [ x-distance <=
1 ]
  let blocking-car min-one-of blocking-cars [ distance myself ]
  ifelse blocking-car = nobody [
    forward 0.2
    set ycor precision ycor 1
  ]
  [
    ifelse towards blocking-car <= 180 [ slow-down-car ] [ speed-up-car ]
  ]
]

```

```

    set heading ifelse-value target-lane < ycor [ 180 ] [ 0 ]
    let blocking-vas other turtles in-cone (1 + abs (ycor - target-lane)) 180 with [ x-distance <= 1
]
    let blocking-va min-one-of blocking-vas [ distance myself ]
    ifelse blocking-va = nobody [
      forward 0.2
      set ycor precision ycor 1 ]
    [
      ifelse towards blocking-va <= 180 [ slow-down-va ] [ speed-up-va ]
    ]
  ]
end

```

to check-for-collisions

```

ask accidents [
  set clear-in clear-in - 1
  if clear-in = 0 [ die ]
]
ask patches with [ (( count cars-here ) + ( count vas-here)) > 1 ] [
  sprout-accidents 1
  [
    set accident-count accident-count + 1
    print ( word "new accident # " accident-count " at ( " pxcor ", " pycor " )" )
    set size 1.5
    set color yellow
    set clear-in 1
    ask cars-here [ die ]
    ask vas-here [ die ]
  ]
]
end

```

to-report x-distance

```

report distancexy [ xcor ] of myself ycor
end

```

to-report y-distance

```

report distancexy xcor [ ycor ] of myself
end

```

to-report number-of-lanes

```

report 2
end

```