

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA E
INFORMÁTICA INDUSTRIAL

RICARDO REGHELIN

UM MODELO DE GERENCIAMENTO MICROSCÓPICO
CENTRALIZADO DE TRÁFEGO DE VEÍCULOS INTELIGENTES EM
UM SEGMENTO DE RODOVIA

TESE

CURITIBA

2014

RICARDO REGHELIN

**UM MODELO DE GERENCIAMENTO MICROSCÓPICO
CENTRALIZADO DE TRÁFEGO DE VEÍCULOS INTELIGENTES EM
UM SEGMENTO DE RODOVIA**

Monografia apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial da Universidade Tecnológica Federal do Paraná como requisito parcial para a obtenção do título de Doutor em Ciências.

Área de concentração: Engenharia de Automação e Sistemas

Orientadora:

Prof^a. Dr^a. Lúcia Valéria Ramos de Arruda

CURITIBA

2014

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação

R334m Reghelin, Ricardo
2014 Um modelo de gerenciamento microscópico centralizado
de tráfego de veículos inteligentes em um segmento
de rodovia / Ricardo Reghelin.-- 2014.
110 f.: il.; 30 cm

Texto em português, com resumo em inglês
Tese (Doutorado) - Universidade Tecnológica Federal
do Paraná. Programa de Pós-Graduação em Engenharia
Elétrica e Informática Industrial, Curitiba, 2014
Bibliografia: f. 101-106

1. Sistemas inteligentes de veículos rodoviários.
2. Veículos - Controle automático. 3. Otimização matemática.
4. Programação linear. 5. Programação inteira. 6.
Algoritmos heurísticos. 7. Robôs autônomos. 8. Inteligência
coletiva. 9. Métodos de simulação. 10. Engenharia
de tráfego. 11. Engenharia elétrica - Teses. I. Arruda,
Lúcia Valéria Ramos de, orient. II. Universidade Tecnológica
Federal do Paraná - Programa de Pós-Graduação em Engenharia
Elétrica e Informática Industrial. III. Título.

CDD 22 -- 621.3

Biblioteca Central da UTFPR, Câmpus Curitiba

Título da Tese Nº. 98

Um modelo para o gerenciamento microscópico centralizado do tráfego de veículos inteligentes em um segmento de rodovia.

por

Ricardo Reghelin.

Orientadora: Prof.^a Dr.^a Lúcia Valéria Ramos de Arruda.

Esta tese foi apresentada como requisito parcial à obtenção do grau de DOUTOR EM CIÊNCIAS – Área de Concentração: Engenharia de Automação e Sistemas, pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial – CPGEI – da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, às 13h30 do dia 29 de maio de 2014. O trabalho foi aprovado pela Banca Examinadora, composta pelos doutores:

Prof. Dr. Werner Kraus Junior
(Presidente – UFSC)

Prof.^a Dr.^a Silvia Galvão de Souza
Cervantes
(UEL)

Prof. Dr. Leandro Magatão
(UTFPR)

Prof. Dr. Flávio Neves Junior
(UTFPR)

Prof.^a Dr.^a Lúcia Valéria Ramos de Arruda
(UTFPR – Presidente)

Visto da Coordenação:

Prof. Emilio Carlos Gomes Wille, Dr.
(Coordenador do CPGEI)

Adendo: A presidente da banca foi a Prof.^a Dr.^a Lúcia Valéria Ramos de Arruda

DEDICATORIA

Dedico este trabalho aos meus pais Arno e Nelsi.

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais Nelsi e Arno que me educaram e me encaminharam em uma carreira profissional.

Agradeço a minha esposa Luciane e minha filha Gabriela que me deram suporte para me dedicar a este trabalho.

Agradeço a minha orientadora Profa. Dra. Lúcia Valéria Ramos de Arruda que gentilmente aceitou me orientar. Obrigado pela paciência inesgotável.

Agradeço a todos meus colegas de aula e de trabalho que me ajudam a realizar o trabalho.

RESUMO

REGHELIN, Ricardo. Um modelo de gerenciamento microscópico centralizado de tráfego de veículos inteligentes em um segmento de rodovia. 2014. 110 f. Tese: Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2014.

Este trabalho insere-se na área de pesquisa de sistemas de transporte inteligente e mobilidade urbana buscando um cenário onde a infraestrutura rodoviária é capaz de monitorar um tráfego exclusivo de veículos inteligentes que não dependem de motoristas para serem guiados. A principal contribuição do trabalho é o desenvolvimento de uma solução matemática para otimizar o gerenciamento microscópico centralizado do tráfego de veículos inteligentes em trechos (segmentos) de rodovia. Para isto é apresentado um modelo de otimização baseado em Programação Linear Inteira Mista (MILP), que determina um plano ótimo de trajetórias individuais dos veículos em uma evolução de tráfego. O objetivo é reduzir o tempo de viagem individualmente e assegurar fluidez do tráfego. O modelo considera componentes essenciais do sistema dinâmico viário como topografia da pista, regras de trânsito e a curva de aceleração máxima de cada veículo. São contempladas várias situações de tráfego, tais como ultrapassagens, inclinação na pista, obstáculos e redutores de velocidade. Os resultados indicaram uma média de 20,5 segundos para o cálculo de um cenário com 6 veículos e 11 intervalos de tempo. Como o modelo MILP não tem solução em tempo computacional aceitável para aplicação real, também é proposto um algoritmo de simulação baseado em heurísticas o qual busca reduzir esse tempo de cálculo em detrimento da otimalidade da solução. O algoritmo reproduz o comportamento de um motorista que tenta manter sempre um valor de velocidade escolhido previamente, e por isso é forçado a ultrapassar outros veículos quando obstruído ao longo do trajeto. O resultado do algoritmo tem importância adicional, pois serve de referência para resolver o problema da prioridade nas ultrapassagens. Também são propostos novos indicadores para a avaliação microscópica de qualidade de tráfego. Finalmente, são apresentados resultados de testes em simulações a fim de avaliar e validar o modelo e o algoritmo.

Palavras-chave: Otimização, MILP, Planejamento de trajetória de multirrobo. Veículos inteligentes, Veículos autônomos, Gerenciamento de tráfego.

ABSTRACT

REGHELIN, Ricardo. Um modelo de gerenciamento microscópico centralizado de tráfego de veículos inteligentes em um segmento de rodovia. 2014. 110 f. Tese: Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2014.

This work focus on the research area of intelligent transportation systems and urban mobility. It considers a scenario where the roadside infrastructure is capable of monitoring traffic composed by 100% of intelligent vehicles that do not rely on drivers to be guided. The main contribution of this work is the development of a mathematical solution to optimize the centralized management of intelligent microscopic vehicular traffic in parts (segments) of highway. Therefore an optimization model based on Mixed Integer Linear Programming (MILP) is presented. The model determines individual trajectories plans of vehicles in a traffic evolution. The objective is to reduce the travel time individually and ensure traffic flow. The model considers essential components of the dynamic highway system, such as, topography of the lane, traffic rules and acceleration curve for each vehicle. Many traffic situations are considered, such as, overtaking, slopes, obstacles and speed reducers. The results indicated an average of 20.5 seconds to calculate a scenario with 6 vehicles and 11 time intervals. As the MILP model has no solution in acceptable computational time for real application, it is proposed an algorithm based on heuristic simulation which seeks to reduce the computation time at the expense of optimality of the solution. The algorithm reproduces the behavior of a driver who always tries to maintain a preselected velocity value, and is therefore forced to overtake other vehicles when blocked along the path. The result of the algorithm has additional importance because it serves as a reference for solving the problem of priority when overtaking. New indicators for microscopic evaluation of quality traffic are also proposed. Finally, test results are presented on simulations to evaluate and validate the model and algorithm.

Keywords: Optimization, MILP, Multiple Robots Motion Planning, Intelligent Vehicles, Autonomous Vehicles, Traffic Management.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Foto do veículo autônomo (<i>driverless car</i>) da empresa Google mostrando também seus dispositivos que sentem o ambiente ao ser redor. Fonte: Traduzido de (MARKOFF, 2010).	16
Figura 2 Exemplo de gráfico do comportamento do fluxo de veículos (q) em uma rodovia em função da densidade (ρ) de veículos. O fluxo aumenta conforme a densidade aumenta até atingir um limite (ρ_{cr}) acima do qual o fluxo na rodovia começa a diminuir. Reproduzido de (PAPAGEORGIOU e KOTSIALOS, 2002).	28
Figura 3 Exemplo típico de infraestrutura de controle de tráfego de uma rodovia (reproduzido de (KIRSCHFINK, 1999)). Coleta informações de passagem de veículos (<i>loop detectors</i>), do ambiente (intempéries, câmeras,...) e informa a condição da faixa (acidente, velocidade máxima no instante,...).	31
Figura 4 Exemplo de nomenclatura para as relações entre os elementos envolvidos no tráfego em uma rodovia. Fonte: Reproduzido de (ANDREWS, SHAHEEN, <i>et al.</i> , 2012).	33
Figura 5 Exemplo da representação tempo-espaço de ocupação de veículos vindos de uma direção em uma pista. Os intervalos de tempo (s_1 (t_1, t_2), s_2 (t_3, t_4), s_3 (t_5, t_6)) representam as ocupações enquanto os veículos viajam através da intersecção. Fonte: reproduzido de (JIN, WU, <i>et al.</i> , 2012).	34
Figura 6 Representação gráfica da movimentação de um veículo em uma rodovia.	46
Figura 7 Curva da máxima aceleração (a) do veículo Audi Q7, em um plano, em função da sua velocidade (v). Os picos se referem à mudança de marcha. Fonte: Adaptado de (ALTHOFF, 2010).	47
Figura 8 Exemplo de discretização da curva de máxima aceleração da Figura 7. Cada faixa de velocidade k corresponde a um valor de aceleração a_k .	49
Figura 9 Exemplo da aproximação considerada no modelo para o deslocamento longitudinal (Px) e transversal (Py). O deslocamento transversal é substituído por uma variável inteira indicando a faixa.	50
Figura 10 Exemplo de espaçamento de segurança mínimo necessário em uma ultrapassagem.	51
Figura 11 Exemplo dos deslocamentos longitudinais Δd de um veículo a cada intervalo de tempo Δt . Os pontos cinza ao longo da pista são as posições ocupadas pelo veículo no início de cada intervalo de tempo	53
Figura 12 Exemplo de (a) uma situação de tráfego com dois veículos e (b) de uma ultrapassagem do veículo B sobre o veículo A.	54
Figura 13 Exemplo de duas evoluções de tráfego possíveis para ocorrer uma ultrapassagem considerando restrições ao longo da pista. O mesmo deslocamento total dos veículos pode ocorrer com diferentes deslocamentos individuais.	55
Figura 14 Exemplos de situações de tráfego onde há necessidade de decisão sobre a ordem de ultrapassagem.	56
Figura 15 Exemplos de duas evoluções de tráfego possíveis dependendo da ordem de ultrapassagem dos veículos que estão na fila.	57

Figura 16 Momento inicial em que todos os veículos do exemplo 1 ficam desobstruídos após ocorrer uma ultrapassagem. Neste exemplo, qualquer ultrapassagem deve causar obstrução visto que todos querem desenvolver as respectivas velocidades desejadas.	58
Figura 17 Gráfico das posições dos veículos em função do tempo T referente à evolução do tráfego da situação de tráfego do exemplo 1.	59
Figura 18 Representação gráfica dos resultados possíveis da evolução de tráfego do exemplo 1. As setas mostram os dois resultados ótimos possíveis. A linha tracejada mostra a função objetivo.	60
Figura 19 Representação gráfica do sistema proposto – Entradas e Saída.	63
Figura 20 Exemplo de parâmetros usados no modelo: (a) espaçamento e (b) curva de aceleração.	65
Figura 21 Exemplos de ultrapassagens que por previsão errada de espaço livre necessário deve ser abortada.	76
Figura 22 Exemplo de situação de <i>deadlock</i> em uma rodovia de pista simples causado por ultrapassagens simultâneas em direções opostas.	77
Figura 23 Exemplo de definição de prioridade dos veículos para eventuais ultrapassagens. O veículo A deixa de ter a maior prioridade em $t=5$, pois neste momento sua distância até o final do trecho é maior que a distância do veículo B.	79
Figura 24 Exemplos de evolução de tráfego calculados a partir da mesma situação inicial. Evolução ideal teria $Z_1=1254m$. $OMT(12)=4,5\%$. $RCE(12) = 15,0\%$	89
Figura 25 Exemplo da mesma situação de tráfego da Figura 24, mas considerando uma evolução calculado pelo modelo MILP para uma pista "du" ($Z_2 = 1141m$). $OMT(12) = 9,0\%$. $RCE(12) = 21,7\%$	90
Figura 26 Desempenho do algoritmo CTIH após 3000 situações de tráfego aplicadas a duas configurações de faixa: (a) "du" e (b) "dbu".	90
Figura 27 Relação entre espaçamento inicial de veículos e MTL para diferentes configurações de faixas.	93
Figura 28 Relação entre quantidade de colisões e espaçamento de veículos considerando $DD=50$	94
Figura 29 Comparação entre MTL e quantidade de colisões em função de DD para uma pista com configuração "DbU".	94
Figura 30 Representação das variáveis FSC e FSS (em relação ao veículo A) utilizadas pelo algoritmo SPVP.	107
Figura 31 Representação das variáveis utilizadas pelo algoritmo MPVP.	108

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 Resumo da definição das camadas de controle na arquitetura PATH.....	45
Tabela 2 Equações geradoras das situações de tráfego iniciais para testes absolutos.....	87
Tabela 3 Evolução dos algoritmos para cálculo de Z. O resultado corresponde ao valor médio de Z (em %) para as mesmas 3000 situações de tráfego aplicado em diferentes configurações de faixas. O algoritmo CTIH é menos eficiente quando comparado com os algoritmos SPVP e SUPVP. Os algoritmos para pistas com sentido único ilustram possíveis melhores desempenhos obtidos para este tipo de configuração.....	91
Tabela 4 Equações geradoras das situações de tráfego iniciais para testes relativos	92

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AHS	<i>Automated Highway Systems</i>
CCS	<i>Central Coordination System</i> (Central de Gerenciamento de Tráfego)
CTIH	<i>Coordinated Trajectories of IVs in Highways</i>
DMV	<i>Department of Motor Vehicle</i>
ITS	<i>Intelligent Transportation System</i>
IV	<i>Intelligent Vehicle</i> (Veículo Inteligente)
MILP	<i>Mixer Integer Linear Programming</i> (Programação Linear Inteira Mista)
MLD	<i>Mixed Logical Dynamical</i>
MPVP	<i>Multilane Predictive Velocity Profile</i>
PPT	<i>Probabilistic Path Planner</i>
PRM	<i>Probabilistic Roadmap</i>
GCTP	<i>Global Coordinated Trajectory Planning</i> (Planejamento Global de Trajetórias)
RHC	<i>Receding Horizon Control</i> (Controle de Horizonte Rolante)
RRT	<i>Rapidly-Exploring Random Trees</i>
SPVP	<i>Single Predictive Velocity Profile</i>
TMD	Distância Mínima Teórica
TVMT	Tempo de Viagem Mínimo Teórico
V2I	<i>Vehicle to Infrastructure</i>
V2V	<i>Vehicle to Vehicle</i>

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	14
1.1. Gerenciamento ativo microscópico centralizado de tráfego.....	17
1.2. Motivação	20
1.3. Objetivos	21
1.4. Contribuições/Publicações	21
1.5. Estrutura do trabalho.....	26
2. GERENCIAMENTO DE TRÁFEGO DE VEÍCULOS INTELIGENTES	27
2.1. Técnicas de gerenciamento de tráfego de veículos.....	27
2.1.1. O controle de fluxo e o <i>Ramp metering</i>	27
2.1.2. A direção colaborativa e o <i>platooning</i>	29
2.1.3. <i>Intelligent Transportation System</i>	30
2.2. Abordagens de Gerenciamento de tráfego para IVs	32
2.3. <i>Automatic guided vehicles</i>	35
2.4. Planejamento de trajetória de multirrobo	37
2.5. Coordenação de trajetória e controle de tráfego	39
2.6. Conclusão.....	41
3. PLANEJAMENTO DE TRAJETÓRIA DE IVS EM UMA RODOVIA	43
3.1. Considerações iniciais.....	43
3.2. Arquitetura de informação no tráfego em rodovias automatizadas	44
3.3. Dinâmica do veículo	45
3.3.1. Equações de estado.....	46
3.3.2. Restrições de velocidade e aceleração.....	46
3.4. Aproximações adotadas no modelo matemático.....	47
3.4.1. Discretização do tempo	48
3.4.2. Discretização da pista	48
3.4.3. Discretização da curva de aceleração	49
3.4.4. Movimentação longitudinal e lateral	49
3.5. Definição formal do problema.....	51
3.6. Problema de otimização do tráfego.....	52
3.6.1. Tráfego com um veículo na rodovia.....	52
3.6.2. Tráfego com dois veículos na rodovia.....	53
3.6.3. Tráfego com múltiplos veículos na rodovia	55
3.7. Exemplo numérico de cálculo da evolução de tráfego	56
3.8. Conclusão.....	60
4. MODELO MILP	62
4.1. Considerações iniciais.....	62

4.2.	Nomenclatura utilizada no modelo	64
4.3.	Função Objetivo.....	66
4.4.	Restrições.....	67
4.5.	Conclusão.....	74
5.	SOLUÇÃO USANDO ALGORITMO HEURÍSTICO.....	75
5.1.	O algoritmo CTIH.....	75
5.2.	Procedimento	78
5.3.	Conclusão.....	79
6.	AValiação MICROSCÓPICA DA EVOLUÇÃO DO TRáfEGO	81
6.1.	Cenário realista otimizado	81
6.2.	Fatores de avaliação microscópica do tráfego	83
6.3.	Conclusão.....	84
7.	TESTES E ANÁLISE DE RESULTADOS.....	85
7.1.	Escolha de parâmetros	85
7.2.	Testes com comparação absoluta.....	86
7.3.	Testes com comparação relativas.....	92
7.4.	Conclusão.....	95
8.	CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS FUTURAS	97
	REFERÊNCIAS	101
	ANEXO A	107

1. INTRODUÇÃO

Dentre os problemas do tráfego de veículos, o congestionamento e os acidentes são provavelmente os mais graves e que mais merecem atenção por parte dos órgãos governamentais e da população em geral. Grande parte destes problemas é decorrente do excesso de tráfego que resulta em uma utilização do sistema viário além da capacidade projetada. Estes problemas são agravados pelo aumento da taxa de motorização (quantidade de veículos automotores por grupo de 100 habitantes), conforme mostram os indicadores, entre 1998 e 2008, tanto do Brasil como da maioria dos países desenvolvidos (CARVALHO, 2011). O problema de congestionamento está diretamente relacionado com o problema de mobilidade urbana, que tem sido discutido em muitos países. Os meios de transporte de massa, como trens e ônibus, não oferecem uma solução tão atrativa como o transporte porta a porta oferecida pelos veículos individuais. Portanto não se vislumbra uma alteração, em curto prazo, deste cenário de excesso de veículos tanto em rodovias como em vias urbanas.

Um estudo do ministério dos transportes do Canadá concluiu que o custo dos congestionamentos urbano recorrentes, isto é, aqueles que acontecem regularmente, como os das horas de pico, é entre 2,3 e 3,7 bilhões de dólares canadenses (valores de 2002). Mais de noventa por cento deste custo são devido ao tempo perdido no tráfego por motoristas e passageiros; sete por cento é atribuído ao aumento do consumo de combustível; e três por cento é de aumento das emissões de CO₂ (TC, 2006). Além disso, o excesso de tráfego acaba potencializando os acidentes. Em 2010, cerca de 2,24 milhões de pessoas ficaram feridas e 32.885 pessoas morreram em acidentes de trânsito de veículos a motor somente nos Estados Unidos (NHTSA, 2012).

Uma alternativa óbvia para o problema é aumentar a quantidade de estradas (ou faixas), entretanto esta solução sempre demanda investimentos altos em termos econômicos e ambientais. Além disto, os recursos naturais necessários são limitados e tendem a aumentar os custos à medida que ficam escassos.

Outra alternativa é limitar a demanda de tráfego através de pedágios, restrição de utilização de veículos (rodízios) e aumento de impostos para utilizar a infraestrutura de tráfego. Esta abordagem resulta em uma solução parcial, pois resolve o problema para somente uma parte dos usuários. Além disso, sofre restrições políticas, pois acarreta insatisfação de muitos motoristas.

Uma alternativa promissora consiste em usar o sistema viário atual de uma maneira mais eficiente. Esta eficiência se refere a uma melhor distribuição dos veículos no tempo e no espaço. A busca por esta melhor distribuição é função da operação chamada gerenciamento de tráfego.

A ideia de gerenciamento de tráfego tem sido explorada desde a década de 50 (BENDER, 1991), mas nos últimos anos ganhou novas e diferentes possibilidades com o avanço na área de veículos autônomos, ou veículos inteligentes (*intelligent vehicle- IV*). Os IVs monitoram o ambiente ao seu redor através de sensores, tais como radares e dispositivos com técnicas de visão, e ajudam o veículo a operar de forma mais eficiente, quer através do apoio ao motorista (emissão de alertas ou avisos) ou tomando o controle total do veículo (BISHOP, 2000). Os IVs também possibilitam comunicação veículo-veículo (V2V) e veículo-infraestrutura (V2I), o que possibilita uma condução autônoma mais segura com informações em tempo real da infraestrutura rodoviária e dos outros veículos.

Atualmente os IVs são mais conhecidos como veículos totalmente autônomos, ou também chamados de automóveis sem motoristas (*driverless car*). Existem vários protótipos de IV em funcionamento, entre eles cita-se o projeto *Junior* da Universidade de Stanford dos Estados Unidos (LEVINSON, ASKEL, *et al.*, 2011), o projeto *Boss* da montadora GM em conjunto com a Universidade Carnegie Mellon também dos Estados Unidos (URMSON, BAKER, *et al.*, 2009) e o projeto *Google Driverless Car* da empresa Google (MARKOFF, 2010) cujo protótipo pode ser visto na Figura 1. Os protótipos são veículos comerciais adaptados, que monitoram o ambiente através de dispositivos embarcados, tais como radares e câmeras, e que conseguem percorrer de forma autônoma qualquer trajetória dentro da rede viária, sem colidir com outros veículos e pedestres e ainda obedecendo às regras de trânsito.

O interesse na utilização de IVs existe tanto pelos usuários como pelas autoridades públicas, devido às várias vantagens potencialmente proporcionadas. Os IVs podem ser programados para não infringirem as leis de trânsito. Eles não são afetados quando o motorista tem sono ou consome drogas. Seus tempos de reação são mais rápidos e podem ser programados para suavizar os fluxos de tráfego, melhorar a economia de combustível e reduzir emissões. Eles ainda podem entregar mercadorias e viajantes não licenciados para os seus destinos (CHEON, 2002), (KOCKELMAN e FAGNANT, 2014).



Figura 1 Foto do veículo autônomo (*driverless car*) da empresa Google mostrando também seus dispositivos que sentem o ambiente ao ser redor. Fonte: Traduzido de (MARKOFF, 2010).

Um exemplo do interesse das autoridades públicas nesta área é o projeto *Darpa Urban Challenge* (PATZ, PAPELIS, *et al.*, 2008) que em 2007 patrocinou uma competição com 53 equipes que desenvolvem veículos autônomos e contaram com uma premiação de 3,5 milhões de dólares. Um dos desafios realizados era percorrer 96 km de um cenário urbano incluindo cruzamentos e outras situações de trânsito, concluindo o trajeto em menos de 6 horas.

Outro fato que marca a seriedade com que o IV é encarado atualmente são as mudanças na legislação permitindo o seu uso. Como por exemplo, a lei *Assembly Bill No. 511*, aprovada em 06/06/2011, no estado de Nevada nos Estados Unidos (DMV, 2012). De acordo com esta lei, o DMV (*Department of Motor Vehicle*), que é o órgão responsável pelo tráfego de veículos naquele estado, deve definir os testes necessários para que um protótipo de veículo autônomo ganhe licença para trafegar. É uma espécie de carteira de motorista provisória concedida a um veículo autônomo. Uma das exigências já definidas para a prova de

licenciamento é que o protótipo deve ter um histórico de pelo menos 100.000 milhas percorridas (de modo assistido por um humano) e sem acidentes. A lei aprovada especifica que o IV deve ser sempre acompanhado por um motorista humano, porém é permitido ao motorista estar distraído e não perceber eventuais obstáculos à frente, como por exemplo, os pedestres. Além destas já aprovadas, vários outros estados nos Estados Unidos estão em processo de aprovação (ANDERSON, KALRA, *et al.*, 2014). O fato de um governo assumir uma corresponsabilidade na segurança do tráfego deste tipo de veículo sugere que a tecnologia atingiu um nível de desenvolvimento que inspira confiança até mesma nas autoridades públicas. Algumas montadoras interessadas em fabricá-los fazem previsões, porém descomprometidas, para lançamento no mercado desse tipo de veículo antes do ano de 2020.

O avanço dos IVs pode finalmente possibilitar a execução de ideias relacionadas a uma rodovia totalmente automatizada (*Automated Highway Systems - AHS*) que envolve a automação completa da tarefa de pilotagem (CONGRESS, 1994), (CONSORTIUM, 1995), o que aparentemente melhoraria o tráfego. Entretanto ainda não se consegue prever se a introdução de IVs vai ser benéfica ao tráfego, pois existe a possibilidade de ser introduzida uma grande quantidade adicional de veículos que atualmente não participam deste tráfego (ANDERSON, KALRA, *et al.*, 2014). De qualquer maneira, o tráfego de IVs deve trazer muitas vantagens e para atingir seu potencial máximo demandará um novo tipo gerenciamento, mais refinado que o atual, que assegure que a trajetória de um veículo seja o menos conflitante possível com a trajetória dos demais. Para isto é necessário o desenvolvimento de modelos para o gerenciamento ativo de veículos inteligentes, passíveis de serem implementados na infraestrutura rodoviária, para o gerenciamento e controle de tais veículos. É neste contexto que se insere a presente tese.

1.1. Gerenciamento ativo microscópico centralizado de tráfego

O gerenciamento de tráfego atual, em que todos os veículos são pilotados por humanos, é um sistema que dispõe de vários tipos de controles para orientar o fluxo de veículos em rodovias e assim poder estabelecer estratégias para evitar congestionamentos e aumentar a segurança. Por outro lado, a capacidade dos IVs de tomar decisões locais na pilotagem, aliado à capacidade de comunicação em tempo real, possibilita o desenvolvimento de uma nova forma de gerenciamento baseada antes nos veículos individualmente que no seu fluxo como um todo. Por definição, pode-se dizer que para um tráfego exclusivo de IVs, é

possível se passar de um gerenciamento *macroscópico*, ou seja, que atua sobre um fluxo de veículos, para um gerenciamento *microscópico*, o qual trata os veículos individualmente.

Além disso, o gerenciamento pode passar de um sistema dito *reativo*, que tenta orientar o comportamento do motorista através de sinalização visual como é feito atualmente, para um sistema dito *ativo*, que orienta diretamente a trajetória individual de cada IV.

Por outro lado, a busca por um tráfego mais eficiente pode focar em um ou mais objetivos diferentes. Esses objetivos podem ser conflitantes, como por exemplo, buscar um menor tempo de viagem para os veículos e ao mesmo tempo uma maior economia de combustível. De acordo com o *Highway Capacity Manual 2000* (BTR, 2000), a qualidade do serviço de uma rodovia refere-se basicamente a dois fatores: tempo de viagem e tempo de viagem seguindo atrás de outros veículos. Assim, em uma primeira abordagem, buscando pela simplicidade, este trabalho adota como critério de otimização a redução do tempo de viagem de cada veículo trafegando na rodovia.

Considerando um cenário de uma rodovia com tráfego exclusivo de IVs, os quais tem capacidade de comunicação entre eles e com a rodovia, pode-se então formular o tema principal atacado neste trabalho. O problema consiste em otimizar o tráfego de IVs percorrendo um mesmo segmento de rodovia, de modo a minimizar o tempo de viagem de cada veículo. Nesta otimização deve ser considerado as diferentes características individuais dos veículos e da pista. Considera-se também que os diversos veículos desejam atingir diferentes velocidades de cruzeiro. A velocidade de cruzeiro, aqui denominada *velocidade desejada*, é a velocidade que cada IV deverá adotar a priori durante todo o trajeto considerado. Por outro lado, considerando que os vários veículos que circulam na via tem todos o mesmo objetivo de minimizar o seu tempo de viagem, dois aspectos tornam-se relevantes: a necessidade de ultrapassagem e a ocorrência de congestionamento.

A hipótese assumida neste trabalho é que o tráfego de IVs por trechos conhecidos de rodovia pode ser previsível e ao mesmo tempo orientado através do cálculo de um plano de trajetórias em conjunto de todos os veículos. O cálculo deste plano de trajetórias deve expressar o critério de desempenho definido e resultar no, aqui denominado, planejamento global de trajetórias coordenadas, ou GCTP (*Global coordinated trajectory planning*). O GCTP consiste em uma lista de valores indicando as posições e respectivas velocidades que cada IV deveria alcançar em uma sequência de intervalos de tempo futuros. O GCTP deve também indicar eventualmente o momento de troca de faixa.

A abordagem proposta neste trabalho busca gerenciar o tráfego com suporte de uma central de gerenciamento de tráfego, ou CCS (*Central Coordination System*), semelhante ao

que acontece no controle de tráfego aéreo. Portanto, além dos IVs, considera-se também disponível uma infraestrutura rodoviária dotada de uma CCS que a cada intervalo fixo de tempo, executa as seguintes funções:

- Coleta de informações (identificação e posição) de todos os veículos no segmento de rodovia sob controle.
- Busca de informações adicionais tais como: características da pista e do veículo, condições climáticas e ocorrências do tráfego tais como acidentes e engarrafamentos.
- Cálculo do GCTP (velocidades e momentos de ultrapassagem) para cada veículo, considerando um determinado período futuro.
- Comunicação do GCTP com cada veículo no segmento de rodovia sob controle.

Entende-se que cada IV possui autonomia para saber tratar os níveis de prioridades das informações de controle do veículo. Portanto, o GCTP recebido pode ser adotado ou não, dependendo de informações mais prioritárias, como por exemplo, uma informação de um obstáculo à frente na faixa. Em caso de contingência, cada veículo afetado deve tomar decisão autônoma em tempo real e passar a determinar seus próximos movimentos deixando de seguir ou não a trajetória sugerida pelo GCTP. Esta movimentação não prevista talvez leve, em efeito cascata, outros IVs também a abandonarem o plano de viagem fornecido pelo CCS. Entretanto, à medida que a contingência e o respectivo tratamento dado pelo IV afetado, forem reportados à CCS, é possível recalcular GCTP, e todos os IVs podem voltar a um movimento coordenado.

O cálculo de um GCTP deve considerar uma quantidade inicial de IVs para um dado segmento de pista. A escolha da quantidade de IV, do tamanho do segmento e do período de tempo em que o tráfego será calculado, deve levar em conta a eficiência do algoritmo utilizado para o cálculo e o tempo disponível para este cálculo.

Do ponto de vista de Pesquisa Operacional, a formulação do problema como descrito acima é complexa devido à dinâmica temporal de cada veículo e a quantidade de veículos considerada, o que multiplica a quantidade de restrições necessárias na determinação de um modelo matemático do problema. Essas restrições estão relacionadas principalmente com as características de cada veículo (curva de aceleração máxima, por exemplo), características da pista (topografia), regras de trânsito (sinalização regulamentar) e parâmetros de segurança (espaçamento entre os veículos). As várias possibilidades de combinações envolvendo a

ordem das ultrapassagens dos veículos é um exemplo das dificuldades e complexidade que a solução matemática deverá contemplar.

A otimização do tempo de viagem para cada veículo gera um problema de decisão entre o ótimo para um veículo em particular e o ótimo para o tráfego como um todo, ou seja, pode ocorrer um conflito entre o ótimo individual e o ótimo global. Por exemplo, uma fila de veículos poderia se formar em uma rodovia, devido à existência de um veículo mais lento à frente. Uma possível solução para eliminar a fila seria orientar este veículo mais lento a encostar permitindo ser ultrapassado pelos outros. Isto significaria uma melhora do fluxo da rodovia (global). Porém, também implicaria o efeito oposto para o veículo mais lento, que aumentaria o seu tempo de viagem. Diante desse impasse, foi adotado como premissa neste trabalho, que nenhum veículo terá seu tempo de viagem sacrificado em prol de um melhor tráfego global. Não serão tratadas neste trabalho as exceções em relação ao sacrifício individual, tais como em passagem de veículos especiais (ambulância, polícia,...) e planos de evacuação em catástrofes (furacão, alagamentos,...).

1.2. Motivação

Considerando os problemas decorrentes do congestionamento de tráfego de veículos e a tendência da crescente utilização de IVs, este estudo se justifica principalmente, pela necessidade de aproveitamento máximo da infraestrutura rodoviária disponível. Os controles atualmente usados no gerenciamento de motoristas humanos não exploram todo o potencial dos IVs.

Adicionalmente, um gerenciamento de tráfego exclusivamente para IVs poderia trazer também (CHEON, 2002), (ANDERSON, KALRA, *et al.*, 2014), (LITMAN, 2014):

- Aumento da capacidade viária e conseqüente redução de custos de construção. Pode permitir pistas mais estreitas com redução da necessidade de intersecções.
- Permite a formação de pelotões de veículos com distanciamento reduzido cujo formato reduz a aerodinâmica e conseqüentemente o consumo.
- Estacionamento mais eficiente e com redução de custos. É possível deixar passageiros e encontrar um espaço de estacionamento, aumentando a conveniência de motorista e reduzindo os custos totais de estacionamento.
- Aumento da eficiência no consumo e redução de poluição. É possível aumentar a eficiência de combustível e reduzir as emissões de poluição. Os IVs podem aproveitar o

conhecimento prévio da topografia da pista para desenvolver uma trajetória mais econômica onde o funcionamento do motor opera mais tempo próximo do seu ponto de eficiência máximo (KAMAL, MUKAI, *et al.*, 2011).

- Suportar o uso de veículos compartilhados. Pode facilitar *carsharing* (serviços de locação de veículo que substitui propriedade de veículo pessoal), que pode fornecer várias economias (FAGNANT e KOCKELMAN, 2014).

1.3. Objetivos

O objetivo geral deste trabalho é modelar e propor solução para a movimentação em conjunto de veículos inteligentes em uma rodovia, com base em modelos de programação matemática. A movimentação é determinada pelo plano de trajetória que indica as posições, velocidades e os momentos de eventuais ultrapassagens para cada veículo, a cada instante.

Os objetivos específicos são:

- Modelar matematicamente a dinâmica do problema de uma forma a se representar as decisões necessárias.
- Desenvolver modelos de programação matemática, em especial modelos de programação linear inteira mista (MILP), para calcular o plano de trajetória.
- Desenvolver um algoritmo baseado em heurísticas para solucionar o problema de cálculo do plano de trajetória em tempo compatível com uma aplicação prática.
- Discutir e propor uma solução para o problema de prioridade nas ultrapassagens de veículos. As ultrapassagens são eventualmente necessárias para diminuir o tempo de viagem de um veículo.
- Analisar o desempenho dos modelos propostos quando aplicados em diferentes situações de tráfegos. Deve-se avaliar e comparar a melhoria de desempenho individual de cada veículo e do tráfego com um todo.

1.4. Contribuições/Publicações

Este trabalho apresenta contribuições para área de sistemas de transportes inteligentes focada no gerenciamento centralizado microscópico de IVs e na área de planejamento de trajetória de multirrobo. O estudo reviu os conceitos de gerenciamento de veículos com motoristas humanos e propôs um novo sistema, onde cada trajetória individual

passa a ser orientada por uma central de controle. A principal contribuição é a proposta de um modelo MILP que calcula uma solução otimizada para trajetórias de veículos inteligentes em rodovias. O estudo iniciou propondo uma solução para uma rodovia com configuração de pista simples. No decorrer do estudo foram desenvolvidas novas soluções para configurações de faixas com maior complexidade até uma proposta para um modelo genérico que contempla qualquer configuração de faixa. Concomitantemente às propostas dos modelos MILP, também foram propostos algoritmos heurísticos para se obter resultados com tempo computacional compatíveis com uma aplicação real. Também foram propostos novos conceitos para a avaliação microscópica de uma evolução de tráfego.

A seguir são listados os trabalhos publicados e que estão relacionados com este estudo:

- REGHELIN, R.; ARRUDA, L. V. R. **An optimization model for microscopic centralized traffic management of intelligent vehicles in a segment of a single lane.** In Proceedings of IEEE Intelligent Vehicles Symposium. Alcalá de Henares, Spain: IEEE. 2012. p. 908 - 913.
 - Nesse artigo foi apresentada uma proposta do gerenciamento centralizado de IV e descrita a metodologia para o cálculo do GCTP relacionado a uma rodovia de pista simples. Foi modelado o problema da colisão frontal entre veículos durante uma ultrapassagem. Também foi proposto o conceito de tempo de viagem mínimo teórico, que possibilita estabelecer a prioridade nas ultrapassagens, e os conceitos de complexidade do tráfego e complexidade do congestionamento.
- REGHELIN, R.; ARRUDA, L. V. R. **An optimization model for microscopic centralized traffic management of intelligent vehicles in a segment of a double lane highway.** In Proceedings of 19th ITS World Congress. Vienna, Austria. 2012d.
 - Nesse artigo foi apresentada a proposta do gerenciamento centralizado de IV e descrito a metodologia para o cálculo do GCTP relacionado exclusivamente a uma rodovia de pista dupla (ambas com o mesmo sentido). Este modelo é mais simples e originou o modelo desenvolvido a seguir para pista múltipla.
- REGHELIN, R.; ARRUDA, L. V. R. **A centralized traffic controller for intelligent vehicles in a segment of a multilane highway.** In Proceedings of IEEE Intelligent Vehicles Symposium. Alcalá de Henares: IEEE. 2012b. p. 135-140.
 - Nesse artigo foi apresentada a proposta do gerenciamento centralizado de IV e descrito a metodologia para o cálculo de rodovia de múltiplas faixas (todas com o mesmo sentido). Foram comparadas as eficiências de duas configurações de

faixas. Com os resultados dos testes apresentados pode-se concluir que o algoritmo proposto tem uma eficiência de 8% para calcular a evolução de tráfego de IVs em uma rodovia com duas faixas (com o mesmo sentido) e uma média de 2,3% quando calcula para uma configuração de três faixas.

- REGHELIN, R.; ARRUDA, L. V. R. **Using a centralized controller to optimize the traffic of intelligent vehicles in a single lane highway provided with a suicide lane.** In Proceedings of 15th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems - ITSC. Anchorage, AK. 2012c. p.1049 – 1054.
 - Nesse artigo foi apresentada a proposta do gerenciamento de IV e descrito a metodologia para o cálculo de rodovia de pista simples dotado de uma faixa “suicida”. Este tipo de faixa separa duas faixas adjacentes de sentidos opostos. Nela é permitido o uso nos dois sentidos e sem prioridade definida, o que demanda decisão para se evitar colisões frontais. Foram comparadas as eficiências de duas configurações de faixas. Com os resultados dos testes apresentados pode-se concluir que o algoritmo proposto tem uma eficiência média de 16,4% para calcular a evolução de tráfego de IVs em uma rodovia de pista simples e uma média de 7,6% quando calcula para uma rodovia de pista simples dotada de faixa suicida
- REGHELIN, R.; ARRUDA, L. V. R. **An algorithm to calculate optimized coordinated trajectories of intelligent vehicles in a segment of road for any lane configuration.** In Proceedings of 2013 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV), 2013, Gold Coast City. 2013 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV), 2013. p. 250-256.
 - Nesse artigo foi apresentada a proposta do gerenciamento de IV e descrito a metodologia para o cálculo de tráfego em rodovias de qualquer configuração de faixas com relação ao sentido e preferência. Também foi proposto um esquema de cálculo de trajetória que permite aumentar o tempo de aceleração do veículo ao iniciar uma ultrapassagem.
- REGHELIN, R.; ARRUDA, L. V. R. **Optimized fuel consumption trajectories of intelligent vehicles in a segment of road for any lane configuration.** In Proceedings of 2013 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV), 2013b, Gold Coast City. 2013 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV). p. 876-881.
 - Nesse artigo foi apresentado um esquema de cálculo para aumentar a economia de combustível através da redução do uso do freio. A ideia é que uma trajetória seja recalculada de maneira a eliminar picos desnecessários de velocidade. O algoritmo

analisa as trajetórias calculadas de todos os veículos e detecta situações onde um veículo teve uma trajetória com consumo desnecessário. Isto acontece quando um veículo acelera para atingir sua velocidade, mas a seguir tem que frear para reduzir e ficar atrás em um pelotão. O algoritmo usa então o tempo perdido acumulado atrás deste pelotão e calcula (individualmente) uma nova trajetória tentando reduzir a necessidade de frenagem. A redução de consumo se dá justamente pela redução do uso do freio nesta nova trajetória. Nesta nova trajetória o tempo de viagem permanece o mesmo.

- REGHELIN, R.; ARRUDA, L. V. R. **An algorithm to calculate coordinated trajectories of intelligent vehicles in roads considering individual priority.** In Proceedings of 2013 16th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC 2013), 2013d, The Hague. 16th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC 2013). p. 1725-1730.
 - Nesse artigo foi apresentada a proposta do gerenciamento de IV considerando a prioridade individual de cada veículo. A ideia é atribuir um nível de prioridade a cada IV e calcular a contribuição deste no tempo de viagem dos demais veículos. Este valor resultante pode ser convertido em créditos e assim passar a ser uma variável de controle do sistema. Os motoristas também podem aumentar a possibilidade de reduzir o tempo de viagem através da compra desses créditos. O sistema pode ser utilizado para reduzir o tempo de viagem de veículos de emergência.
- REGHELIN, R.; ARRUDA, L. V. R. **Concepts of traffic management system and participation policy for intelligent vehicles.** In Proceedings of 20th ITS World Congress Tokyo. 2013e, Tokyo, Japan.
 - Nesse artigo foram propostos novos conceitos de gerenciamentos de tráfego de IV. Foram apresentadas duas possibilidades relacionadas ao tipo de participação dos motoristas que devem se submeter a uma central de controle. A participação total dos IVs é necessária, pois se busca a melhor interação das trajetórias dos IVs. Uma participação foi chamada “voluntária” onde o motorista recebe incentivos calculados com base na sua contribuição para o tráfego com um todo. Outra participação é a “mandatória” onde o sistema penaliza os motoristas que não seguirem as trajetórias calculadas pela central.
- REGHELIN, R.; ARRUDA, L. V. R. **Evaluating algorithms to calculate trajectories of intelligent vehicles considering individual priority in single lane roads.** In Proceedings

IEEE 9th International Conference on Intelligent Computer Communication and Processing, 2013c, Cluj-Napoca. IEEE 9th International Conference on Intelligent Computer Communication and Processing, 2013.

- Nesse artigo foi apresentada uma metodologia para se avaliar de forma sistemática os algoritmos desenvolvidos especificamente para o cálculo de evolução de tráfego. A ideia é simular a evolução de uma mesma situação inicial e fazer uma comparação do resultado do algoritmo proposto com o resultado de um modelo ótimo.
- REGHELIN, R.; ARRUDA, L. V. R. **Optimizing travel time of intelligent vehicles in any highway configuration.** Advances in Transportation Studies an International Journal, v. 32A, 2014. ISSN 1824-5463.
 - Nesse artigo foi apresentado um resumo dos trabalhos gerados com o desenvolvimento do modelo MILP e do algoritmo CTIH, incluindo testes adicionais, dos artigos apresentados nos congressos: IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC) e IEEE Intelligent Vehicles Symposium, nos anos de 2012 e 2013.
- REGHELIN, R.; ARRUDA, L. V. R. **Optimizing coordinated motion planning for multiple car-like robots in a segment of highway.** Robotica, (Cambridge. Print), 2014b. Aceito
 - Nesse artigo foi apresentada a proposta de cálculo de planejamento de movimentos de multirrobo baseado na metodologia desenvolvida para o cálculo de tráfego de IVs em rodovias. Os robôs podem se deslocar em faixas com sentido e preferência previamente definidos. Foram avaliadas as eficiências de algumas configurações destas faixas. As possíveis situações de *deadlock* (obstrução seguido de impasse) foram comentadas mais detalhadamente.
- REGHELIN, R.; ARRUDA, L. V. R. **A methodology to deal with priority for intelligent vehicles in a segment of a single lane highway,** In Proceedings of 21th ITS World Congress. 2014c, Detroit, MI. Aceito.
 - Nesse artigo foram propostos novos conceitos para se calcular trajetórias individuais considerando níveis diferentes de prioridades para cada veículo. Também foi detalhado um sistema onde os motoristas podem comprar ou vender uma quantidade de prioridade e assim tentar variar seu tempo de viagem. Os testes

incluem uma nova sistemática para possibilitar avaliar o impacto do tempo de viagem de um veículo no tempo de viagem dos demais.

1.5. Estrutura do trabalho

A organização deste trabalho é a seguinte:

Neste capítulo foi apresentada a parte introdutória do trabalho. No capítulo 2 é apresentado o estado da arte em relação ao gerenciamento de tráfego relacionado a IVs. No capítulo 3 são detalhadas a dinâmica do tráfego e o planejamento de trajetória de IVs em uma rodovia. Um modelo de otimização, baseado em MILP, para o gerenciamento ativo é apresentado no capítulo 4. No capítulo 5 é apresentado um algoritmo heurístico como alternativa ao modelo MILP. No capítulo 6 é apresentado o conceito de cenário realista ótimo e uma metodologia para avaliação de tráfego microscópico. No capítulo 7 são apresentados resultados experimentais utilizando tanto o modelo MILP quanto o algoritmo heurístico desenvolvidos. Finalmente, as conclusões e perspectivas futuras podem ser encontradas no capítulo 8.

2. GERENCIAMENTO DE TRÁFEGO DE VEÍCULOS INTELIGENTES

Abordagens de gerenciamento de tráfego e controle são utilizadas para controlar os fluxos de tráfego de veículos e para prevenir ou reduzir os engarrafamentos, ou de uma forma mais geral, para melhorar o desempenho do sistema de tráfego como um todo. Neste sentido, o desempenho do tráfego é tipicamente avaliado pelo tempo de viagem, taxa de transferência (*throughput*), segurança, consumo de combustível, confiabilidade e emissões de CO₂. A seguir serão comentadas as técnicas de gerenciamento mais usadas com motoristas humanos e relacionadas com a aplicação com IVs. Também serão ressaltadas as técnicas especificamente relacionadas ao gerenciamento de tráfego de IVs. Algumas técnicas oriundas da robótica autônoma, que inspiraram soluções nesta tese e que são úteis para a solução do problema também serão relatadas.

2.1. Técnicas de gerenciamento de tráfego de veículos

As várias abordagens para o problema podem ser classificadas de acordo com a evolução tecnológica dos dispositivos empregados. A seguir serão discutidas as técnicas mais populares de gerenciamento de tráfego e sua respectiva aplicação com o uso de IVs.

2.1.1. O controle de fluxo e o *Ramp metering*

O gerenciamento tradicional de veículos em rodovias é focado no fluxo de veículos. Consiste basicamente em controlar a densidade de veículos por quilômetro, a fim de não atingir certo limite no qual a capacidade de fluxo começa a diminuir devido à interação desorganizada dos veículos. Este fenômeno é chamado queda de capacidade ou, *capacity drop* (PAPAGEORGIU e KOTSIALOS, 2002) (BASKAR, SCHUTTER, *et al.*, 2011). Um exemplo do comportamento deste fenômeno pode ser visto na Figura 2.

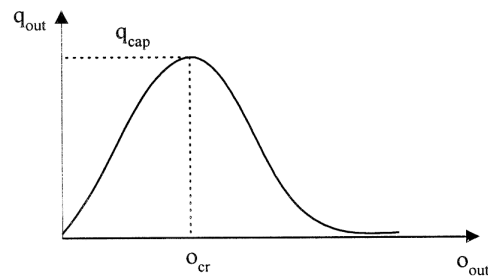


Figura 2 Exemplo de gráfico do comportamento do fluxo de veículos (q) em uma rodovia em função da densidade (o) de veículos. O fluxo aumenta conforme a densidade aumenta até atingir um limite (o_{cr}) acima do qual o fluxo na rodovia começa a diminuir. Reproduzido de (PAPAGEORGIU e KOTSIALOS, 2002).

Considerando um tráfego exclusivo de IVs, este fenômeno pode ter efeito reduzido visto que a interação dos veículos pode ser mais organizada. Entretanto não deve desaparecer completamente visto que permanecem as incertezas próprias da dinâmica do tráfego tais como: pista irregular, tolerância de equipamentos embarcados e intempéries, e que provocarão um efeito de desorganização dos veículos.

Um dos dispositivos mais populares e eficazes criados para se evitar a queda de capacidade é a rampa de medição, ou *Ramp metering*. O *Ramp metering* é aplicado nas rampas de acesso às rodovias e funciona como um buffer de veículos, ou seja, um espaço onde os veículos às vezes são forçados a esperar antes de entrar na rodovia. O controle é implementado basicamente através de semáforos. O objetivo do *Ramp metering* é regular o fluxo de tráfego de entrada na rodovia. Os primeiros modelos eram do tipo de circuito aberto, ou seja, o controle desconhece o valor da saída para determinar um resultado. Neste caso os veículos são liberados na rampa sem considerar o fluxo de veículos na rodovia. Um exemplo é quando se define um período de tempo fixo para os semáforos. A utilização do *Ramp metering* foi melhorada com a implementação de controle por malha fechada, ou seja, quando existe um sinal de realimentação a partir da saída. Assim os veículos passaram a ser liberados em função do fluxo. A evolução seguinte foi usar a abordagem de controle ótimo para se determinar o melhor momento da liberação dos veículos. Outra melhoria decorre da utilização de modelos de inteligência artificial (IA), baseados em dados históricos e informações de entrada mais abrangentes, como ocorrência de acidentes.

Considerando um tráfego exclusivo de IVs, a prevenção do *Capacity drop* pode ser feita de forma mais vantajosa que com *Ramp metering*. O buffer na entrada da rodovia pode ser eliminado e feito de forma mais distribuída ao longo da rodovia, sem necessidade de uma estrutura física em locais específicos. Neste caso os veículos não necessariamente esperarão

em filas, pois as velocidades podem ser controladas desde a entrada na pista e durante todo o percurso. Pode-se concluir que o controle será mais efetivo se ao invés de apenas uma parada na rampa, pode-se promover várias outras ao longo da rodovia.

2.1.2. A direção colaborativa e o *platooning*

A direção colaborativa surgiu com a possibilidade de comunicação entre os veículos. A ideia é estabelecer protocolos nas manobras de tráfego onde um ou mais veículos possam se beneficiar desde um simples alerta de proximidade até detectar colisões em trajetórias concorrentes (HALLÉ, e CHAIB-DRAA, 2004). Dentre as soluções propostas para compactar e organizar o fluxo de veículos, o conceito de *platooning*, ou pelotão, parece estar mais perto de aplicação real e tem recebido mais atenção (FENTON, 1994). A ideia é que os veículos viagem em filas, separados por uma distância curta entre eles, beneficiando-se assim do efeito aerodinâmico. Com a redução de espaço inter veículos existe uma compactação do tráfego aumentando o fluxo. A criação e funcionamento dos pelotões são facilitados pelo uso de um dispositivo embarcado chamado *automatic cruise control (ACC)*. O ACC é um sistema a base de radar, que é capaz de detectar o veículo imediatamente à frente na faixa, e ajustar automaticamente a velocidade do veículo equipado para coincidir com a velocidade do veículo precedente e assim manter uma distância segura entre veículos para evitar colisões. O veículo equipado com ACC desacelera quando o veículo da frente se desloca lentamente, reduzindo a aceleração ou mesmo freando, e após sincronização, se mantém por um intervalo de tempo específico, que é escolhida pelo motorista com antecedência. Se não houver nenhum veículo à frente, então o controlador ACC mantém a velocidade pré-definida que foi selecionada previamente pelo motorista.

Considerando um tráfego exclusivo de IVs, o *platooning* pode ser implementado mais facilmente visto que todos os veículos teriam dispositivos equivalentes ao ACC. Entretanto, o conceito de *platooning* não explora o potencial total dos IVs em otimizar o tempo de viagem individual que é o foco deste trabalho. O conceito de *platooning* é equivalente ao processo de se pegar um trem (pelotão) em uma estação e descer em outra. O problema neste caso é que se for necessário esperar pelo trem ou se o trem não tiver a velocidade desejada, então o tempo de viagem será maior que o esperado.

2.1.3. *Intelligent Transportation System*

A principal área de estudo relacionada com a integração de novas tecnologias da rede rodoviária é conhecida como sistemas de transportes inteligentes, ou ITS (*Intelligent Transportation System*). Dentro desta área se destacam duas subáreas relacionadas ao tema desta tese: *Intelligent Vehicle Highway System Veículo* (IVHS) e *Advanced Traffic Management System* (ATMS). O ITS incorpora “inteligência” na infraestrutura rodoviária e nos veículos, tentando melhorar o desempenho do tráfego através da exploração da natureza distribuída do sistema e tenta fazer uso da cooperação e coordenação entre vários veículos e outros elementos da infraestrutura das estradas. Neste caso, uma abordagem de controle com centralização de informações somente pode ser usada em alguns casos devido aos altos custos computacionais e de comunicação. Neste sentido, o ITS tenta distribuir o processamento de informações entre veículos e a infraestrutura rodoviária e, assim, alcançar uma melhor coordenação de toda a rede viária (BENDER, 1991), (JURGEN, 1991), (VARAIYA, 1993), (FENTON, 1994), (BISHOP, 2000).

Inúmeros sistemas de gerenciamento de tráfego macroscópico utilizam uma infraestrutura dotada de equipamentos avançados de sensoriamento ao longo da rodovia e atuam no controle do tráfego através de painéis visualizados pelos motoristas como exemplificado na Figura 3 (KIRSCHFINK, 1999), (HERNANDEZ, OSSOWSKI e GARCIA-SERRANO, 2002), (BASKAR, SCHUTTER, *et al.*, 2011). Estes sistemas são usados para:

- estimativa de níveis de carga de tráfego no espaço e no tempo em toda a rede;
- análise e compreensão da demanda de tráfego e rotas na área;
- previsão qualitativa da demanda e rotas;
- detecção (previsão) de situações de tráfego e gargalos críticos;
- seleção e implementação de estratégias de prevenção e redução de congestionamento;
- gerenciar objetivos de controle conflitantes e prioridades nas diferentes áreas controladas.

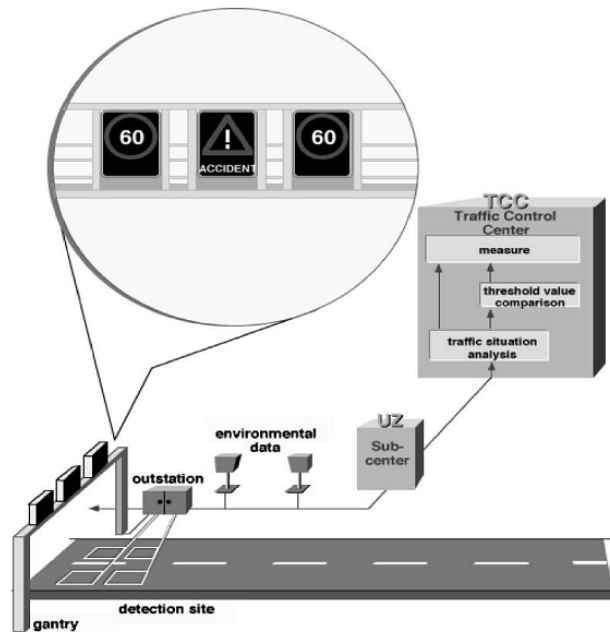


Figura 3 Exemplo típico de infraestrutura de controle de tráfego de uma rodovia (reproduzido de (KIRSCHFINK, 1999)). Coleta informações de passagem de veículos (*loop detectors*), do ambiente (intempéries, câmeras,...) e informa a condição da faixa (acidente, velocidade máxima no instante,...).

Considerando-se um sistema de gerenciamento ativo, ou seja, que tenha mais ação sobre os veículos, pode-se destacar *Active Traffic Management*, também chamado gerenciamento de faixas. Este método inclui basicamente três técnicas: limites de velocidade variável, uso do acostamento como faixa e *ramp metering*. O gerenciamento é chamado ativo porque é capaz de enviar sinais de mensagem variável através de painéis (Figura 3) com base em informações coletadas em tempo real ao longo da rodovia (FEHON e KLIM, 2010), (LOU, YIN e A., 2011). A técnica mais relevante deste sistema usa, eventualmente, o acostamento da rodovia (dentro ou fora) como uma faixa de rodagem durante os períodos de congestionamento. Outra técnica é chamada de Harmonização de Velocidades e Controle de Faixa, que reduz dinamicamente os limites de velocidade em áreas congestionadas ou temporariamente sob intervenção, como acidente ou intempéries. O mesmo sistema também envia informações sobre viagens, como o tempo de viagem através de rotas alternativas, e ocorrência de incidentes à frente (DESNOUAILLES e COHEN, 2007), (SPARMANN, 2007).

Considerando um tráfego exclusivo de IVs, estes sistemas citados anteriormente não conseguem explorar o potencial total dos IVs. Principalmente quando se refere a otimizar o tempo de viagem individual que é o foco deste trabalho. O problema é que este tipo de sistema considera apenas o fluxo de veículos e assim não consegue determinar trajetórias individuais.

O passo à frente do IVHS/ATMS é chamado *Automated Highway System* (AHS). A ideia é implementar um sistema controlado por uma infraestrutura rodoviária que assume o controle completo das operações dos veículos (BISHOP, 2000), (CHEON, 2002), (BASKAR, SCHUTTER, *et al.*, 2011). Inicialmente o AHS foi sugerido como um complexo viário com faixas tanto automatizadas como não automatizadas. Neste contexto, os motoristas entram na rodovia em uma faixa não-automatizada e depois podem decidir ou não por rodar em uma faixa com automatização. Ao ocupar esta faixa, as tarefas de condução são assumidas pelos controladores a bordo e o veículo passa a ser guiado automaticamente com a ajuda de dispositivos sensores instaladas ao longo da faixa-automatizada, tais como imãs no chão (TSUGAWA, 2011). Este conceito tem o mesmo problema conceitual do *platooning*. Entretanto, considerando um tráfego exclusivo de IVs, o conceito de AHS pode ser interpretado de outra forma. Ao invés de se considerar apenas uma faixa dedicada à automatização, todas as faixas da pista serão automatizadas e adicionalmente, o processo dos veículos para trocar não de faixa, mas de modo de condução (assistido ou não) também será automatizado. Desta maneira será atingido o máximo potencial de otimização.

2.2. Abordagens de Gerenciamento de tráfego para IVs

Com o avanço da tecnologia, principalmente nas áreas de comunicação sem fio e visão robótica, novos conceitos de gerenciamento estão surgindo na literatura de pesquisa. Esses novos conceitos incorporam mais elementos da dinâmica do tráfego e as respectivas relações entre seus elementos (ANDREWS, SHAHEEN, *et al.*, 2012). Um exemplo dessas relações pode ser visto na Figura 4. Nesta nomenclatura existem cinco círculos representando os elementos principais do tráfego em relação a um motorista. São eles: o motorista (D), o seu veículo (V), os outros veículos (V), a infraestrutura rodoviária (I), incluindo, por exemplo, as condições da pista, e também um círculo representando os demais participantes (P), incluindo, por exemplo, pedestres e ciclistas. Nas intersecções de dois ou mais círculos estão representados a denominação da respectiva relação. Por exemplo, a intersecção dos dois círculos dos veículos e da infraestrutura tem a denominação de V2I.

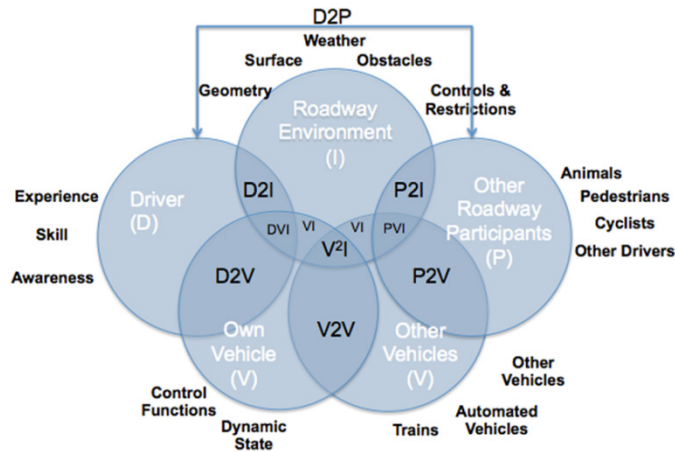


Figura 4 Exemplo de nomenclatura para as relações entre os elementos envolvidos no tráfego em uma rodovia. Fonte: Reproduzido de (ANDREWS, SHAHEEN, *et al.*, 2012).

Nesta seção serão abordados os sistemas que usam conceitos de gerenciamento que atuam mais diretamente na trajetória do veículo graças à capacidade de trocar informações de tráfego em tempo real entre veículos (veículo-veículos V2V) e/ou veículo-infraestrutura de comunicações (V2I/I2V).

Algumas aplicações já foram propostas usando dados obtidos de veículos conectados para modificar estratégias de controle de tráfego e melhorar o desempenho geral do sistema. Estes dados podem ser relativos às atividades do veículo (por exemplo, posição e velocidade) e/ou as demais informações do tráfego ou da rodovia. Alguns sistemas já interagem individualmente com os veículos, porém são limitados, pois dependem da vontade e velocidade de reação do motorista para atuar. Um exemplo é um sistema que avalia o tráfego e envia sugestão aos motoristas de mudança para uma determinada faixa (PARK, MILOSLAVOV, *et al.*, 2011);

Na literatura podem-se encontrar algumas propostas para a gestão de tráfego de IVs com base em direção cooperativa. A maioria destes trabalhos está restrita a manobras em intersecções de pistas, quando um grupo de IVs se aproxima de uma intersecção. Neste caso, os veículos se comunicam uns com os outros (V2V) ou com a infraestrutura (V2I), a fim de prevenir colisões e/ou otimizar o fluxo de tráfego. Propostas recentes usam técnicas de agendamento de tarefas (FAJARDO, AU, *et al.*, 2011), (KOWSHIK, CAVENEY e KUMAR, 2011), (COLOMBO e DEL VECCHIO, 2012) e controle ótimo (LEE e PARK, 2012), (HAFNER, CUNNINGHAM, *et al.*, 2013) para evitar colisão em intersecções.

Outras abordagens usam o conceito de Sistemas Multiagentes (SMA). Por exemplo, em (JIN, WU, *et al.*, 2012) foram considerados dois tipos de agentes: um referente aos

veículos e outro referente ao gerenciador de tráfego de uma intersecção. A ideia é que esses agentes possam tirar proveito do intercâmbio de informações de trânsito em tempo real. Esta estratégia dinâmica permite que o agente de gerenciamento de intersecção receba informações sobre o estado dos agentes veículos, reserve as ocupações de intersecção do tempo-espço associados, e, em seguida, forneça *feedback* para os veículos. O tempo-espço total é dividido em uma grade de células $n \times n$ (Figura 5). Para se evitar colisões, cada célula pode ser ocupada por apenas um veículo. Os intervalos de tempo (s_1 (t_1, t_2), s_2 (t_3, t_4), s_3 (t_5, t_6)) representam as ocupações enquanto os veículos viajam através da intersecção. Cada veículo deve decidir sua trajetória considerando que algumas células da grade já foram reservadas pelos demais. Conforme os autores, a estratégia proposta pode reduzir significativamente o consumo de combustível e as emissões de veículos em comparação com sistemas de controle de sinal tradicionais.

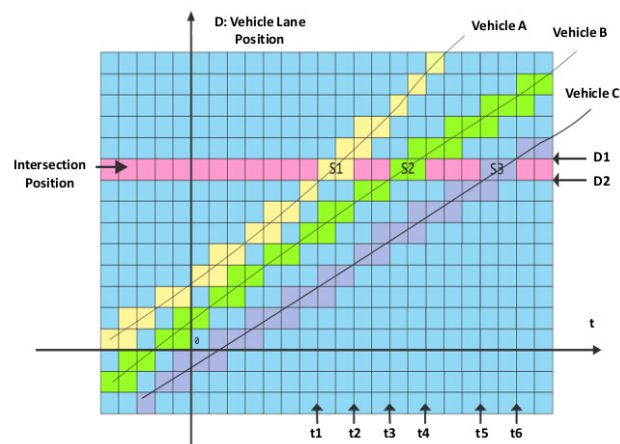


Figura 5 Exemplo da representação tempo-espço de ocupação de veículos vindos de uma direção em uma pista. Os intervalos de tempo (s_1 (t_1, t_2), s_2 (t_3, t_4), s_3 (t_5, t_6)) representam as ocupações enquanto os veículos viajam através da intersecção. Fonte: reproduzido de (JIN, WU, *et al.*, 2012).

Um modelo de otimização PLIM para minimizar a soma dos atrasos individuais durante a travessia da intersecção foi proposto em (ZOHDY, KAMALANATHSHARMA e RAKHA, 2012). A ideia é definir uma zona específica em que os veículos ajustam o seu tempo de chegada ao cruzamento através da aceleração ou desaceleração (ZOHDY, KAMALANATHSHARMA e RAKHA, 2012). Outro foco de pesquisa é automação de semáforos. Em um estudo para se determinar um melhor controle de semáforos (HE e HEAD, 2011), uma central recebe as informações do tráfego e os pedidos de prioridade dos veículos que estão se aproximando da intersecção. A central então calcula um plano relativo à sequência de aberturas para os semáforos, baseado em um algoritmo heurístico proposto.

Segundo os autores, o atraso médio de ônibus pode ser reduzido em 50%, sem impactos negativos sobre os outros veículos.

Outra área de pesquisa busca o controle de tráfego de modo auto-organizado, ou seja, com decisões descentralizadas, utilizando regras heurísticas de inspiração biológica (*bio-inspire*), mais precisamente, inspirado no funcionamento de sistemas biológicos. A ideia central é tentar reproduzir padrões complexos dos sistemas com regras simples dos indivíduos (TONGUZ, 2011). Uma proposta é substituir o semáforo físico por um virtual através de um protocolo distribuído, que estabelece as regras de preferência entre os veículos de um sistema viário urbano. Nesta proposta, todos os veículos são agrupados em filas, mesmo com espaçamentos diversos, sendo que o primeiro da fila é considerado como líder. O líder, ao se aproximar de uma intersecção, se comunica com outros líderes que também estão se aproximando da mesma intersecção. Após trocarem mensagens, é definida a sequência que os grupos devem cruzar a intersecção. Um grupo deve aguardar enquanto todo o outro grupo cruza a intersecção. O critério de prioridade é a menor distância do líder até a intersecção. Os autores demonstraram que o fluxo de tráfego pode aumentar uma média de 60% (FERREIRA, FERNANDES, *et al.*, 2010).

Em todos os casos as colisões entre dois veículos são impedidas, apenas se controlando a velocidade longitudinal de deslocamento de cada veículo ao longo do seu caminho, e nunca controlando a direção do veículo. Este foco no controle longitudinal é o mesmo adotado por esta tese. Entretanto o problema de todas essas abordagens é que o veículo é desacelerado para sincronizar sua chegada à intersecção, ou seja, o objetivo é apenas viabilizar trajetórias sem colisão e não procurar a melhor combinação entre tempo de viagem, fluidez do tráfego e prevenção de colisões.

2.3. *Automatic guided vehicles*

O tráfego de IVs pode ser considerado semelhante ao tráfego de *Automatic guided vehicles* (AGVs), ou veículos guiados automaticamente. Os AGVs são dispositivos avançados de manuseio de materiais usados extensivamente em sistemas de manufatura automatizados para o transporte de materiais entre as estações de trabalho. O tráfego é restrito a uma rede de caminho de fluxo pré-definida, a qual consiste de um conjunto de nós interligados por meio de um conjunto de pistas. Os nós representam locais das estações de trabalho onde ocorre a coleta e entrega de cargas. Estes veículos navegam automaticamente ao longo de um caminho

fixo guiado que é usualmente definido por um fio incorporado no pavimento, por tiras de fita refletora, visão robótica (RONZONI, OLMI, *et al.*, 2011) ou por outros métodos de orientação. Os veículos são enviados para diferentes estações usando algum tipo de regra de despacho feita por um computador host, ou por um computador embarcado ou por terminais remotos. O objetivo principal é definir qual veículo vai participar de determinado trabalho.

Grande parte das pesquisas em AGV, subárea da robótica móvel, foca em objetivos semelhantes aos desejados para um sistema de gerenciamento de tráfego com IVs, tais como: menor tempo de viagem, capacidade da pista, evitar colisão e *deadlocks* (impasse), e coordenação de múltiplos AGVs (MAGVs) (LE-ANH e DE KOSTER, 2006), (VIS, 2008), (SRIVASTAVA, CHOUDHARY, *et al.*, 2008).

Um dos primeiros trabalhos nesta área compara três abordagens alternativas básicas para controlar o tráfego de AGV (GROSSMAN, 1988):

1) As pistas são restringidas de modo que existe um percurso único de qualquer ponto a qualquer outro ponto. Este é o caso, por quase todos os sistemas existentes.

2) Existem várias rotas possíveis, e cada AGV tem autonomia para escolher seu próprio caminho, de acordo com as regras e objetivos do sistema.

3) Existem várias rotas possíveis, e todos os AGV estão sob o controle de tráfego centralizado. O nível de controle pode variar de semáforos simples até otimização global de roteamento.

Uma vez que qualquer restrição de pista (caso 1) pode ser reformulada na forma restrições de seleção rota de AGV autônomos (caso 2), fica claro que a melhor solução do caso 2 é sempre pelo menos tão bom quanto no Caso 1. Da mesma forma, uma vez que o planejador de rotas centralizado (caso 3) sempre pode ser restrito para executar precisamente o planejamento autônomo (caso 2), fica claro que a melhor solução em caso 3 é sempre pelo menos tão bom quanto no caso 2. O autor demonstra que o caso 3 envolve elevada complexidade combinatória e propõe regras de despacho heurísticas que aumentam a quantidade de arcos percorridos e assim melhorando o desempenho do sistema.

Esta área de estudo também aplica várias técnicas de inteligência computacional, como a lógica *fuzzy*, redes neurais e algoritmos genéticos para alcançar melhores resultados (JEONG e RANDHAWA, 2001), (LE-ANH e DE KOSTER, 2006).

Entretanto, duas diferenças importantes fazem as aplicações de AGVs pouco relevante para a aplicação em IVs. A primeira é que a configuração (*layout*) de chão de fábrica pode ser facilmente modificada para reduzir as restrições, o que difere da infraestrutura rodoviária. Outro problema é a dinâmica do tráfego de AGVs que é muito mais simples do que o tráfego real, como por exemplo, a baixa velocidade e a pouca inércia dos veículos.

2.4. Planejamento de trajetória de multirrobo

Os IVs podem ser considerados como robôs móveis tipo automóveis (*car-like*) autônomos (TSUGAWA, 2011). Assim o problema do tráfego de IVs pode ser relacionado ao problema clássico de planejamento de trajetória de multirrobo (LATOMBE, 1991), (LAVALLE, 2006), (PARKER, 2008), (GOERZEN, KONG e METTLER, 2010).

O problema de planejamento de trajetórias de multirrobo é muito complexo conforme analisados em vários trabalhos (CANNY, 1988), (REIF e SHARIR, 1994). Mais precisamente, se refere à classe PSPACE-hard de complexidade, que inclui problemas de decisão para os quais as respostas podem ser encontradas com os recursos (memória) que são polinomiais no tamanho da entrada. O tempo de execução não é limitado. A classe de complexidade NP é conhecida por ser um subconjunto de PSPACE (GAREY e JOHNSON, 1979).

Em geral, abordagens de planejamento de trajetórias podem ser avaliadas em termos de completude (se é garantido a obtenção de uma solução se houver), de complexidade (quais são os requisitos computacionais do processo de busca), e otimalidade (isto é, a qualidade da solução resultante). Muitas vezes técnicas que são completas e ótimas não tem tempo computacional para serem usadas na prática.

Em robótica móvel, abordagens que utilizam informação global e planejam as trajetórias diretamente no espaço de configuração são chamadas de abordagens acopladas ou centralizadas (*coupled, centralized*). Estas abordagens tratam a equipe de robôs como um sistema robótico composto. No entanto, este tipo de abordagem de planejamento requer um tempo de computação que cresce de forma exponencial com a dimensão do espaço de configuração multirrobo. Assim, essas abordagens são limitadas a problemas em tempo real de pequeno porte. Como exemplo, pode-se destacar o trabalho de Kala (KALA, 2012) que

considera um sistema complexo onde cada robô tem uma velocidade particular e pode ou não parar em um cruzamento para dar passagem. A abordagem usa programação genética para gerar uma trajetória viável para cada veículo (robô) até o respectivo destino. A trajetória é gerada em partes, correspondendo a intervalos de tempo onde cada veículo pode ter diferentes velocidades, inclusive velocidade zero (parado). Também é usado um algoritmo genético para pesquisar a combinação de trajetórias que resultam no ótimo global. A função objetivo (*fitness*) do algoritmo minimiza o total dos tempos de viagem e penaliza aqueles que não completarem o trajeto no período considerado. Desta maneira também as trajetórias com colisão são descartadas. Entretanto, esta abordagem ainda é limitada na representação da dinâmica do tráfego como um todo.

Para lidar com a alta dimensionalidade do espaço de configuração envolvendo multirrobo, as abordagens alternativas desacoplam o problema de planejamento de trajetória em componentes independentes que podem encontrar boas soluções rapidamente, embora à custa de perder a otimalidade e completude. Estas técnicas desacopladas (*decoupled*) podem ser centralizadas ou descentralizadas. Exemplos comuns de abordagens desacopladas incluem aquelas que separam o planejamento da trajetória do cálculo de velocidade. Abordagens típicas para o planejamento desacoplado é determinar caminhos individuais para um robô ou um conjunto de robôs, seguido por um segundo passo para resolver os conflitos potenciais entre os caminhos calculados.

Alguns trabalhos propõem abordagens baseadas em Programação Linear Inteira-Mista (*Mixed-Integer Linear Programming* - MILP) para veículos e/ou robôs autônomos (*unmanned vehicles*) (SCHOUWENAARS, DE_MOOR, *et al.*, 2001), Fierro et al. (FIERRO, BRANCA e SPLETZER, 2005), (YILMAZ, EVANGELINOS e LERMUSIAUX, 2008), (GOERZEN, KONG e METTLER, 2010). MILP é uma estrutura de otimização que permite a inclusão de variáveis inteiras e discretas em um problema de otimização linear contínuo. Estas variáveis podem ser usadas para modelar restrições lógicas, tais como obstáculo e regras anti-colisão, enquanto as propriedades dinâmicas e cinemáticas do veículo são formuladas como restrições contínuas. Uma visão geral de aplicações e algoritmos para resolver os problemas MILP genéricos pode ser encontrada em (NEMHAUSER e WOLSEY, 1988) e (GOLDBARG e LUNA, 2000). A modelagem MILP é uma subárea da Pesquisa Operacional e os métodos do estado da arte incluem algoritmos baseados em planos de corte (*cutting plane*), algoritmos *branch-and-bound*, métodos de base integral, e algoritmos de aproximação. A principal vantagem de se usar MILP para o planejamento de trajetória é que os modelos manipulam

sistematicamente restrições de prevenção de colisões e relativas a obstáculos rígidos com precisão. Também permite incluir recursos de decisão no problema de otimização tal como atribuição de tarefas. Além disso, os algoritmos são completos, ou seja, resultam em uma solução ótima ou factível, se existir. O planejamento de trajetória baseado em modelos MILP é um caso especial de uma classe mais ampla de problemas de controle em sistemas dinâmicos lógicos mistos (*Mixed Logical Dynamical - MLD*), desenvolvidos por Bemporad e Morari em (BEMPORAD e MORARI, 1999). Eles fornecem um método geral para a formulação da dinâmica de sistemas híbridos (sistemas que combinam um comportamento contínuo e discreto). A escolha da função objetivo do método MILP pode acarretar em diferentes níveis de complexidade dependendo da formulação do problema. Por exemplo, Schouwenaars et al. (SCHOUWENAARS, DE_MOOR, *et al.*, 2001) usam uma função objetivo baseada em grafos de visibilidade, por outro lado, Bellingham et al. (BELLINGHAM, RICHARDS e HOW, 2002) definem uma função objetivo que tem solução através do algoritmo de Dijkstra.

Embora estes métodos proporcionem uma solução elegante para o problema geral, eles não podem lidar com a complexidade computacional de um problema típico de planejamento de trajetória, em que muitos veículos com características diversas estão presente, e assim, não são muito úteis em ambientes dinâmicos como é o caso do gerenciamento de IVs.

2.5. Coordenação de trajetória e controle de tráfego

Ainda considerando estudos na área de robótica que podem ser extensíveis ao gerenciamento de tráfego de IVs, nesta seção são apresentadas algumas abordagens sobre o tratamento de conflitos em tráfego de robôs/veículos autônomos. As técnicas de coordenação de trajetórias em robótica focam em abordagens descentralizadas *on-line* que permitem que robôs possam evitar e/ou resolver conflitos à medida que for necessário, durante a execução de sua trajetória, como por exemplo, através da utilização de regras de controle de tráfego.

Existem muitas variantes sobre o tema controle de tráfego e de resolução de conflitos em robótica. Por exemplo, Kato, et al (KATO, NISHIYAMA e TAKENO, 1992), classificam as regras de trânsito em três tipos: 1) regras de trânsito a serem aplicadas para as posições atuais do robô (os exemplos incluem zona de passagem, parada, desaceleração), 2) regras de trânsito a serem aplicadas para as posições e condições vigentes em cada instante (os

exemplos incluem ultrapassagens, evitando obstáculos, atravessar cruzamentos, etc.) e, 3) regras de trânsito para garantir a segurança em caso de acidentes ou falhas. Estas regras são ilustradas para as equipes de robôs que operam no interior de um laboratório onde foram posicionados obstáculos fixos.

Asama, et al (ASAMA, OZAKI e ITAKURA, 1991), propuseram duas regras básicas para um robô evitar colisões com outros robôs: "Se um robô está à frente em rota de colisão e se aproximando, então desvie a esquerda", e "Se um robô está à frente em rota de colisão e se afastando, então pare por um determinado período". Estas regras são combinadas através de um processo de negociação de comunicação que resolve os conflitos (*deadlock*) baseado nas exigências da tarefa (se o robô está executando uma tarefa suas chances de desviar são menores e, portanto tem mais prioridade), na situação ambiental (se existem obstáculos no local as chances de desviar com sucesso são menores e portanto o robô tem mais prioridade), e no desempenho dos robôs (se o robô tem capacidade de aceleração menor, ganha mais prioridade).

Em (YUTA e PREMVUTI, 1992), os robôs se movem ao longo de caminhos pré-planejados através de uma rede de estradas, que podem envolver conflitos nos cruzamentos. Essas situações de bloqueio nos cruzamentos são resolvidas através de um processo chamado *shunting*, em que um robô, atuando como um líder define uma solução para movimentar os outros robôs através do cruzamento, e depois transmite instruções para os outros robôs a fim de resolver o conflito. Qualquer veículo pode se tornar líder, quando existe a necessidade de decisão em um conflito, o robô envolvido requisita esta condição ao controle central. Se a liderança não estiver alocada para outro robô, ela é concedida. Após resolver o conflito, a condição de liderança é liberada.

Outra abordagem para a resolução de conflitos é a utilização de técnicas de computação distribuída, como ilustra o trabalho de Wang (WANG, 1991), no qual os robôs usam um protocolo de exclusão mútua para concorrer ao direito de circular por determinados caminhos ou para resolver conflitos nos cruzamentos. A ideia de exclusão mútua é semelhante ao trabalho citado anteriormente. Um robô independente requisita um recurso, como por exemplo, um caminho para poder se locomover, e se este já estiver alocado para outro robô, então não consegue o recurso e deve esperar ou tentar solicitar recursos equivalentes.

Lumelsky, et al. (LUMELSKY e HARINARAYAN, 1997) apresentaram uma abordagem descentralizada para o planejamento de movimentação em que os robôs planejam

e executam suas trajetórias em tempo real, resolvendo eventuais conflitos. Os autores fazem uma analogia com uma festa tipo coquetel, em que as pessoas não planejam trajetórias ideais com antecedência, nem consultam os outros sobre seus destinos, em vez disso, eles se movem em direção aos seus destinos, evitando colisões. Esse tipo de abordagem baseia-se em técnicas de saída de labirinto.

A abordagem proposta no trabalho de Alami, et al. (ALAMI, FLEURY, *et al.*, 1998) não requer planejamento antecipado de todas as trajetórias dos robôs. Em vez disso, os robôs se movem o quanto necessário, coordenando as suas trajetórias à medida que novos objetivos surjam. Nesta abordagem de planejamento descentralizado, os robôs tratam segmentos de suas trajetórias como recursos compartilhados. No entanto, quando um robô elabora um novo plano para si mesmo, ele deve validar esse plano no contexto multirrobô atual. Isto é feito através da coleta dos planos de todos os membros da equipe de robôs (via comunicação), e fundindo seu próprio plano dentro dos planos existentes dos outros robôs. Esta operação de fusão é feita sem afetar os planos de outros robôs, permitindo-lhes continuar com suas execuções atuais. Nesta abordagem, o ambiente é representado como um grafo topológico de áreas, vias e cruzamentos. Rotas são compostas de faixas com direção, criando assim um padrão de tráfego através do ambiente. A abordagem de planejamento de movimento faz uso de uma técnica de pesquisa em grafo, planejamento de grafos dependentes para coordenar os movimentos dos robôs.

Todas as abordagens citadas anteriormente nesta seção são aplicáveis a um tráfego exclusivo de IVs. Entretanto todos focam somente em soluções para impasses (*deadlocks*), o que não contribui para a otimização do tempo de viagem individual dos veículos. Embora os critérios propostos para a solução de conflito sejam relevantes, entende-se que a solução matemática focada neste trabalho, embora recorra a algumas estratégias abordadas nos trabalhos citados anteriormente, deve propor novos critérios relacionados diretamente ao tempo de viagem.

2.6. Conclusão

Considerando as várias abordagens citadas não se pode identificar uma que atenda integralmente o foco do problema deste trabalho. As abordagens com coordenação central são as únicas que garantem encontrar o ótimo global, e, portanto são as desejáveis para este

trabalho, porém não possuem tempo computacional aplicável para situações reais, devido a complexidade do problema.

Também fica claro que a inclusão de restrições para representar melhor a dinâmica do veículo tem alto custo computacional. Entretanto para a representação da dinâmica do tráfego de uma rodovia é fundamental a inclusão das características de aceleração e frenagem de um veículo. Nenhuma abordagem lidou diretamente com estas características.

A pesquisa bibliográfica também buscou referências para a adoção de estratégias de sucesso na obtenção de prioridade de ultrapassagens e para resolver eventuais conflitos em um tráfego automatizado. Em vários trabalhos foram tratados o problema de conflitos em um tráfego, como por exemplo, a decisão de quem avança primeiro quando dois veículos chegam em um cruzamento. De uma forma geral os métodos de decisão propostos são baseados em prioridades alocadas previamente ao veículo, ou baseadas em informações locais, como por exemplo, a simples ordem de chegada ao cruzamento. Yuta e Premvuti (YUTA e PREMVUTI, 1992) afirmam que o veículo ou toma a decisão baseado no seu benefício ou no benefício do tráfego como um todo. Entretanto não apresenta solução aplicável no caso de rodovias. Enfim, não foi encontrada uma referência teórica adequada para o problema como proposto nesta tese.

Outra lacuna da literatura refere-se a como ponderar o desempenho dos veículos que participam de um determinado tráfego a ser avaliado, e que iniciam e terminam em pontos diferentes da pista. Como os veículos poderiam escolher entre inúmeras trajetórias possíveis, dependendo principalmente da interação dos veículos, e como avaliar cada escolha.

A solução proposta nesta tese para o problema de movimentação ótima dos IVs deve buscar então dois métodos distintos para o problema apresentado. Um modelo matemático para se calcular o valor ótimo teórico de uma evolução de tráfego, este sem preocupação de tempo computacional para uma aplicação real, e outra solução alternativa usando algoritmo heurístico. A proposta deve permitir também uma comparação entre a solução ótima e a solução relaxada (obtida através de heurística) usando para isto métricas que permitam avaliar a resolução dos problemas citados acima.

3. PLANEJAMENTO DE TRAJETÓRIA DE IVS EM UMA RODOVIA

Este capítulo apresenta o problema básico de planejamento de trajetória de IVs em uma rodovia. Um aspecto fundamental do veículo autônomo é planejar trajetórias. Conforme Tsugawa (TSUGAWA, 2011) a automação da condução de veículos é a área de estudo comum entre veículos e robôs. Historicamente, dois campos têm contribuído no desenvolvimento de métodos de planejamento de trajetória (ou movimento): robótica e controle de sistemas dinâmicos. O primeiro normalmente tem um foco mais forte em questões computacionais e controle em tempo real do robô, enquanto o último enfatiza o comportamento dinâmico do veículo e ressalta aspectos mais específicos de desempenho na obtenção da trajetória (SCHOUWENAARS, DE_MOOR, *et al.*, 2001).

A seguir são apresentados detalhes das restrições matemáticas para representar a dinâmica microscópica dos movimentos em um tráfego. Em especial as limitações físicas dos veículos, como aceleração e frenagem, e limites de afastamento inter-veicular para prevenção de colisões, entre outros. Também é proposta uma métrica para a avaliação de desempenho do tráfego. Ao final é apresentado um exemplo numérico de otimização de trajetória de veículos em um segmento de rodovia, mostrando o conflito na decisão sobre a ordem de ultrapassagens dos veículos e que se reflete diretamente na eficiência do tráfego.

3.1. Considerações iniciais

O tráfego de veículos em uma rodovia pode gerar situações conflitantes relacionadas às ultrapassagens à medida que um veículo pode bloquear a passagem de outro. Em um tráfego com motoristas humanos, a decisão sobre a ultrapassagem é tomada individualmente e baseada em informações locais, como por exemplo, o espaço livre disponível na faixa contrária e percepção de velocidade relativa entre os veículos. Nesta decisão também são levados em conta critérios subjetivos do motorista, tais como estimativa das distâncias entre veículos ou a simples vontade de ultrapassar. Em um tráfego de IVs, existe a oportunidade de se tomar uma decisão melhor tanto do ponto de vista do motorista quanto do tráfego com um todo, pois essa decisão pode ser baseada em informações globais mais precisas.

Um planejamento centralizado ideal deve levar em consideração os objetivos individuais e indicar a trajetória ideal de cada veículo. Entretanto surge um problema de

conflito onde a definição de uma trajetória pode interferir em outra, dado que todos os veículos tem o mesmo objetivo de reduzir seu tempo de viagem. Como resultado, uma trajetória pode ficar comprometida em função de melhorias em outras, surgindo assim a necessidade de se estabelecer uma ordem de prioridade na tomada de decisão.

O modelo matemático a ser proposto para o cálculo de trajetórias de um GCTP otimizado utiliza a modelagem MILP com discretização uniforme no tempo, isto é, considerando o modelo dividido em slots de tempo iguais. Outra abordagem possível seria a discretização da distância percorrida que divide a rodovia em pequenos segmentos iguais. A abordagem de discretização de distância remeteria ao tratamento do problema de forma similar aos modelos adotados em simuladores baseados em autômato celular (NAGEL e SCHRECKENBERG, 1992). Neste tipo de simuladores existe uma maior facilidade na modelagem, porém a solução torna-se pesada computacionalmente devido ao grande número de variáveis.

3.2. Arquitetura de informação no tráfego em rodovias automatizadas

O gerenciamento de tráfego ITS envolve informações provenientes de muitos tipos de dispositivos, cada um com período de atualização diferente. Por exemplo, o radar na frente do IV deve ser atualizado muito mais frequentemente que a informação da decisão do destino do veículo. A abordagem de controle centralizado dessas informações tem sido evitada provavelmente pelos altos custos computacionais e de comunicação. Neste sentido, o gerenciamento ITS tenta distribuir o processamento de informações entre os veículos e a infraestrutura rodoviária de acordo com características da informação e assim conseguir uma melhor coordenação de toda a rede (BENDER, 1991), (VARAIYA, 1993).

As principais arquiteturas de controle propostas para o gerenciamento de informação em rodovias tais como: PATH, Dolphin, CVIS, e PReVENT, conforme resumidas em Baskar et al. (BASKAR, SCHUTTER, *et al.*, 2011), propõem gerir as informações de controle por níveis de prioridade organizadas em camadas hierárquicas (*Hierarchical control frameworks*).

Para melhor se ilustrar como as informações são coletadas e podem ser otimizadas, tomou-se como base a arquitetura PATH, que apresenta melhor detalhamento das camadas hierárquicas. A ideia desta arquitetura é que as informações mais prioritárias, que são as referentes aos dispositivos embarcados no veículo, são tratadas na camada mais inferior da hierarquia. Em cada nova camada superior são considerados mais elementos do sistema viário

de forma cumulativa. De maneira que a camada mais alta seja responsável pelas informações globais do sistema. Um resumo das definições das camadas pode ser visto na Tabela 1.

Tabela 1 Resumo da definição das camadas de controle na arquitetura PATH.

Nome da camada	Escala de tempo na atualização	Extensão das informações	Área de abrangência
<i>Network</i>	15 minutos	Envolve o fluxo de toda a rede viária considerada	Definição das rotas que afetam toda a rede viária
<i>Link</i>	Um minuto	Para um grupo formado por um adensamento e fluxo em cada seção	Definição dos caminhos e das velocidades em cada seção de pista, afetam vários quilômetros da rodovia
<i>Planning</i>	Um plano a cada minuto	Coordenação com veículos vizinhos	O plano afeta os veículos vizinhos
<i>Regulation</i>	Fração de segundo	Estado do veículo	Um pelotão ou veículo individual

Fonte: Adaptado de (VARAIYA, 1993)

Para melhor detalhar o movimento dos veículos, a arquitetura PATH define alguns conceitos que são encontrados na maioria das outras arquiteturas. Uma *rota (route)* é considerada como a sequência dos segmentos de rodovias necessários para o trajeto completo de um veículo. O *caminho (path)* é o detalhamento do movimento ao longo dos segmentos escolhidos, como por exemplo, as manobras de mudança de faixas. Considerando-se que o problema em estudo busca uma otimização da movimentação dos veículos, entende-se que a necessidade recai sobre o cálculo do caminho de cada veículo, pois a rota dos veículos é considerada conhecida. Portanto o método de cálculo a ser proposto neste trabalho deve ser executado na camada *Link* (ver Tabela 1). Nesta camada as informações são coletadas e processadas a cada 60s aproximadamente, sendo esta a base de tempo adotada neste trabalho.

3.3. Dinâmica do veículo

Do ponto de vista de controle, o comportamento dinâmico de qualquer veículo do tipo automóvel é tipicamente não linear. Para possibilitar a modelagem do problema usando programação matemática, este comportamento dinâmico deve ser linearizado de forma total ou por partes (trechos). Esta seção descreve o sistema de equações usadas para representar a dinâmica dos veículos incluindo aceleração, velocidade, frenagem e aderência nas curvas da pista.

3.3.1. Equações de estado

Esta tese considera que o veículo é um ponto de massa representado pelas coordenadas de posição (x, y) ao longo de um ambiente bidirecional. O veículo pode receber uma aceleração (a_x, a_y) em cada direção resultando nas respectivas velocidades (v_x, v_y) . Esta abordagem é semelhante a uma proposta anterior que representa a dinâmica de veículos terrestres (SCHOUWENAARS, DE_MOOR, *et al.*, 2001), através do seguinte sistema de equações:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} x \\ y \\ v_x \\ v_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ v_x \\ v_y \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_x \\ a_y \end{bmatrix} \quad (1)$$

Uma representação gráfica das variáveis pode ser vista na Figura 6.

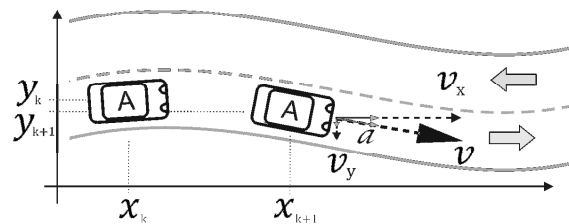


Figura 6 Representação gráfica da movimentação de um veículo em uma rodovia.

3.3.2. Restrições de velocidade e aceleração

A velocidade de um veículo a cada instante é limitada, pois deve ser a menor dentre as seguintes velocidades:

- velocidade desejada, ou seja, a velocidade máxima escolhida para o veículo,
- velocidade máxima permitida para o local da pista (sinalização regulamentar),
- velocidade possível de ser atingida, dependendo de fatores tais como: velocidade anterior, capacidade de aceleração, aerodinâmica e peso do veículo, topografia da pista.

Entende-se que a velocidade máxima permitida seja sempre menor que a velocidade limite para as condições da pista. A velocidade limite é aquela que garante a aderência dos pneus quando o veículo é submetido a uma curva. Esta velocidade pode ser obtida, por

exemplo, pelo estudo de Velenis (VELENIS e TSIOTRAS, 2005) que determina o perfil de velocidades máximas de um veículo para uma dada curvatura da pista.

A aceleração de um veículo depende principalmente da sua velocidade no instante anterior, de seu peso, da potência do motor e da sua aerodinâmica. O valor da aceleração máxima de um veículo específico, em um plano, pode ser determinado por uma *curva de aceleração máxima* conforme exemplo da Figura 7. Esta curva pode ser obtida por experimento prático onde partindo-se de uma velocidade inicial zero, se mede o incremento de velocidade do veículo enquanto se imprime o valor máximo do acelerador.

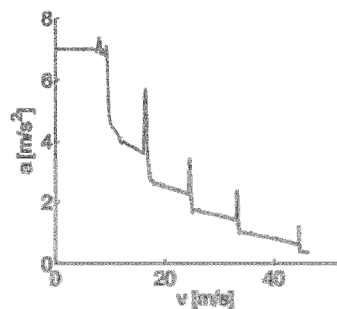


Figura 7 Curva da máxima aceleração (**a**) do veículo Audi Q7, em um plano, em função da sua velocidade (**v**). Os picos se referem à mudança de marcha. Fonte: Adaptado de (ALTHOFF, 2010).

Pela curva nota-se que a máxima aceleração possível ocorre quando o veículo está parado e que a capacidade de aceleração diminui à medida que o veículo ganha velocidade. Portanto a curva indica a velocidade máxima que um veículo pode atingir considerando todas as suas características (potência do motor, peso,...).

Além de proporcionar os limites de velocidades possíveis em função da aceleração de um determinado veículo, a curva de aceleração máxima possibilita também se definir a aceleração mínima necessária a ser aplicada pelo motor para se atingir uma determinada velocidade em um plano.

3.4. Aproximações adotadas no modelo matemático

Para possibilitar a futura implementação do método de programação matemática, são propostas aproximações referentes à simplificação na representação da movimentação lateral dos veículos e nas discretizações do tempo, do comprimento da pista e da curva de aceleração.

3.4.1. Discretização do tempo

Como condição fundamental para a implementação de um modelo em programação matemática deve adotar uma representação para o tempo. O modelo adotado considera uma discretização uniforme do tempo em intervalos de tamanho Δt . Considerando a equação de estados (1), o resultado aproximado para cálculo das derivadas de estado é obtido então por (CULLIGAN, 2006):

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ v_x \\ v_y \end{bmatrix}_{k+1} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \Delta t & 0 \\ 0 & 1 & 0 & \Delta t \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ v_x \\ v_y \end{bmatrix}_k + \begin{bmatrix} (\Delta t)^2/2 & 0 \\ 0 & (\Delta t)^2/2 \\ \Delta t & 0 \\ 0 & \Delta t \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_x \\ a_y \end{bmatrix}_k \quad (2)$$

Sendo que k representa o índice do k -ésimo intervalo Δt . É importante notar que os valores de (a_x, a_y) permanecem constantes durante todo o intervalo de tempo Δt .

3.4.2. Discretização da pista

A discretização da pista em trechos menores é feita dividindo-se o comprimento longitudinal da pista, chamado de *segmento*, em trechos discretos com comprimento variável, chamados de *seções*. A definição do início e fim de cada seção é escolhida de tal maneira a se representar um efeito ou restrições do ambiente naquele trecho. Quando a posição de um veículo estiver dentro de uma determinada seção, o cálculo de seu deslocamento ficará sujeito, por exemplo, ao efeito da topografia ou limitado pela velocidade máxima do segmento. O efeito da topografia diz respeito ao incremento adicional da aceleração do veículo quando este desce um aclive ou, decremento da aceleração no caso de subida.

Assim a representação das seções pode afetar os cálculos principalmente: alterando a aceleração, limitando a velocidade e/ou evitando ultrapassagens ou troca de faixa. Uma seção também pode representar conjuntamente duas ou mais características, como por exemplo, o efeito de aceleração aplicada a um veículo quando desce um aclive e ao mesmo tempo a necessidade de limitar a velocidade.

3.4.3. Discretização da curva de aceleração

A aceleração de um veículo depende principalmente da sua velocidade no instante anterior, de sua massa, da potência do motor e da sua aerodinâmica. O valor desta aceleração pode ser determinado por uma curva de aceleração máxima específica do veículo conforme mostrado na Figura 7. Esta curva representa a velocidade máxima que o veículo pode atingir considerando as suas características (potência do motor, peso,...). A discretização proposta pode ser vista na Figura 8 onde a faixa de velocidades é dividida em k intervalos. A ideia é considerar um valor constante de aceleração a_k enquanto o veículo estiver em uma faixa k de velocidade correspondente.

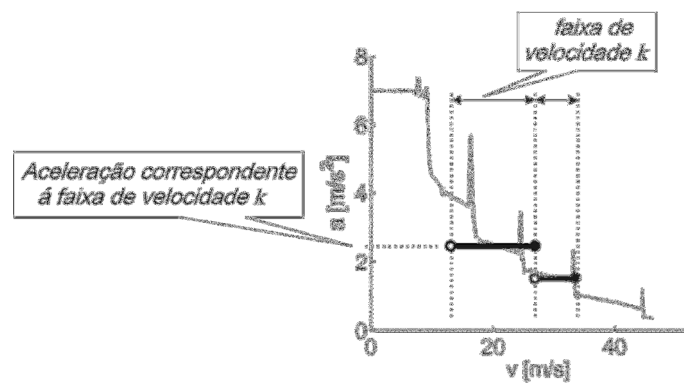


Figura 8 Exemplo de discretização da curva de máxima aceleração da Figura 7. Cada faixa de velocidade k corresponde a um valor de aceleração a_k .

3.4.4. Movimentação longitudinal e lateral

A movimentação lateral diz respeito à manobra de desvio do veículo em relação ao centro da faixa e é executada normalmente quando da troca de faixa para uma ultrapassagem. No tráfego em rodovia o valor do deslocamento lateral é insignificante se comparado com o longitudinal. Com base neste fato, o deslocamento lateral não será representado de forma contínua, como o longitudinal, mas de forma discreta. O resultado do cálculo da movimentação lateral feito pelo modelo a ser proposto deve simplesmente indicar qual a faixa que o veículo se encontra a cada momento. A posição lateral do veículo será sempre considerada no centro da largura da faixa. Quando um veículo trocar de faixa, o veículo será considerado no centro da largura de uma faixa no instante anterior e, no instante seguinte considerado, estará no centro da largura da outra faixa. Um exemplo pode ser visto na Figura 9. A posição do veículo antes definida por (x, y) passa a ser definida agora por (P_x, P_y) ,

sendo que P_x é a posição longitudinal no centro da faixa desde o início de um segmento e P_y indica qual a faixa em que se encontra.

Reforça-se que o foco deste trabalho é a tomada de decisão sobre o momento de troca de faixa em função da movimentação dos outros veículos. Portanto entende-se que um detalhamento da manobra de troca de faixa pode ser assumida por controladores de hierarquia mais baixa e embarcados no veículo.

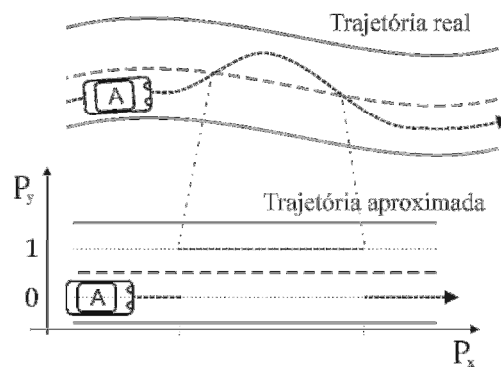
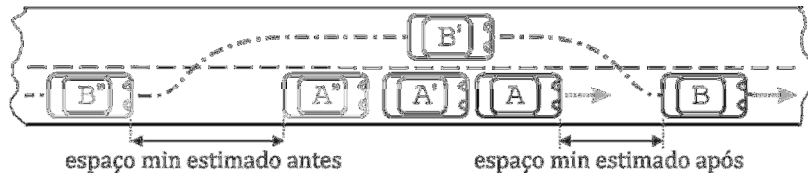
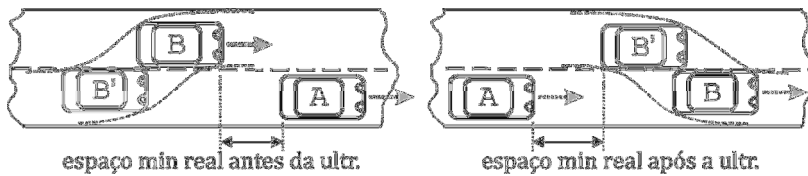


Figura 9 Exemplo da aproximação considerada no modelo para o deslocamento longitudinal (P_x) e transversal (P_y). O deslocamento transversal é substituído por uma variável inteira indicando a faixa.

Para possibilitar uma trajetória segura na troca de faixa, o modelo deve levar em conta a exigência de um espaçamento mínimo entre os veículos (de uma mesma faixa) antes e depois do momento da troca de faixa (Figura 10a). Considerando que as posições são calculadas para intervalos discretos de tempo, existe um problema de não se respeitar um espaçamento mínimo real conforme demonstrado na Figura 10b. Como solução, deve-se estimar um valor maior para o espaçamento mínimo adotado a ser definido empiricamente.



(a) evolução de dois veículos em três instantes mostrando o espaçamento mínimo estimado no momento anterior e posterior a ultrapassagem para assegurar que a trajetória mantenha espaçamento do veículo à frente.



(b) duas situações de tráfego mostrando um momento intermediário ao intervalo de tempo considerado na Figura 10a em que um espaçamento mínimo deveria ser respeitado.

Figura 10 Exemplo de espaçamento de segurança mínimo necessário em uma ultrapassagem.

3.5. Definição formal do problema

Esta seção apresenta mais formalmente o problema de planejamento de trajetória de um grupo de veículos que foi descrito no capítulo inicial.

Dados vários veículos rotulados por um índice $i = 1, 2, \dots, I$, o comportamento dinâmico de cada veículo é considerando uma discretização linear do tempo em períodos constantes e fixos é calculada como segue:

$$\mathbf{x}_i(t+1) = \mathbf{A}_i \mathbf{x}_i(t) + \mathbf{B}_i \mathbf{u}_i(t) \quad \forall i = 1, 2, \dots, I; t = 1, 2, \dots, T-1 \quad (3)$$

Onde $\mathbf{x}_i(t) \in \mathbb{R}^{N_x}$ é o vetor de estado e $\mathbf{u}_i(t) \in \mathbb{R}^{N_u}$ é o vetor de entrada referente ao t -ésimo $t (t = 1, 2, \dots, T-1)$ instante de tempo. O vetor de estado $\mathbf{x}_i(t)$ é definido por informações de posição e velocidade em um ambiente bidimensional respectivamente representado por: $\mathbf{P}_i(t) = [\mathbf{x}_i(t) \ \mathbf{y}_i(t)]' \in \mathbb{R}^2$ e o vetor de entrada $\mathbf{u}_i(t)$ é definido por informações de controle da aceleração respectivamente representadas por: $\mathbf{v}_i(t) = [\dot{\mathbf{x}}_i(t) \ \dot{\mathbf{y}}_i(t)]' \in \mathbb{R}^2$. Por definição, a trajetória será constituída de uma sequência de estados $\mathbf{x}_i(t) = [\mathbf{P}'_i(t) \ \mathbf{v}'_i(t)]'$.

Dependendo das restrições/condições adotadas no modelo, o vetor de entrada $\mathbf{u}_i(t)$ é um vetor relacionado às acelerações ou referências de velocidades. Em ambos os casos, no entanto, combinada com restrições adicionais de $\mathbf{x}_i(t)$ e $\mathbf{u}_i(t)$, o modelo de estado (equação 1) deve representar o mais fielmente possível a evolução dinâmica do veículo. Essas restrições devem reproduzir as propriedades cinemáticas e dinâmicas dos veículos tais como a velocidade máxima, aceleração e frenagem, e serão indicadas como se segue: $\mathbf{x}_i(t) \in X_i(t)$ e $\mathbf{u}_i(t) \in U_i(t)$ (RICHARDS e HOW, 2003).

3.6. Problema de otimização do tráfego

A seguir são apresentadas algumas considerações sobre o cálculo dos deslocamentos de veículos. São apresentadas algumas evoluções de tráfego para tentar explicar a complexidade envolvida no cálculo desses deslocamentos.

3.6.1. Tráfego com um veículo na rodovia

Considerando-se apenas um veículo trafegando em uma rodovia, não existe obstrução por outros veículos e este pode desenvolver sua velocidade desejada respeitando apenas as restrições de cada seção.

Para o cálculo dos deslocamentos, consideram-se os seguintes fatores essenciais: a velocidade e posição do veículo no instante anterior, a inclinação da pista, a curva de aceleração máxima do veículo e os limites de velocidade permitidos pela sinalização. A cada instante t depois de transcorrido um período de tempo Δt , os deslocamentos Δd e as posições P do veículo i são calculados, respectivamente, pelas equações (4) e (5):

$$\Delta d_i(t) = P_i(t-1) - P_i(t) \quad \forall i = 1, 2, \dots, I; t = 2, 3, \dots, T \quad (4)$$

$$P_i(t) = P_i(t-1) + v_i(t)\Delta t + a_i(t) (\Delta t)^2/2 \quad \forall i = 1, 2, \dots, I; t = 2, 3, \dots, T \quad (5)$$

Sendo que a_i é a aceleração do veículo resultante da potência do motor e do efeito da inclinação da pista. A representação gráfica de um exemplo destes deslocamentos Δd pode ser visto na Figura 11.

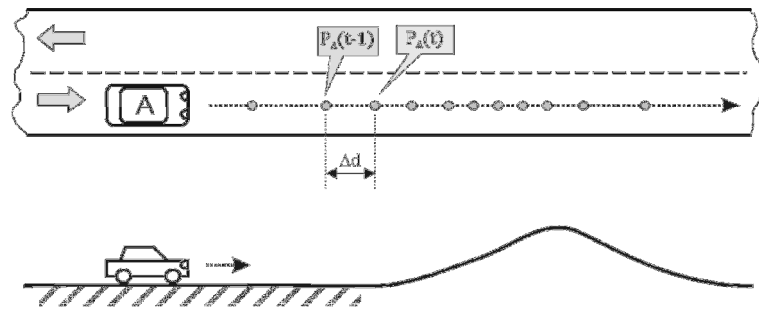


Figura 11 Exemplo dos deslocamentos longitudinais Δd de um veículo a cada intervalo de tempo Δt . Os pontos cinza ao longo da pista são as posições ocupadas pelo veículo no início de cada intervalo de tempo

Conforme mencionado no capítulo inicial, o objetivo da otimização escolhido para este trabalho é o menor tempo de viagem para cada veículo. Para isso seria necessário se definir o início e o final do percurso de uma viagem. Entretanto, para facilitar a formulação MILP do problema, o objetivo foi considerado de uma forma equivalente. Ao invés de menor tempo de viagem, o objetivo passa a ser buscar o maior deslocamento possível dos veículos para um período fixo de tempo considerado. O cálculo deve buscar o maior valor possível da posição final do veículo no instante de tempo final do período. É importante notar que neste caso, com um veículo na pista, a função objetivo é equivalente a buscar o maior valor do somatório dos deslocamentos. Considerando Z o valor do deslocamento total do veículo i no período de tempo T , dividido em intervalos t , a função objetivo fica:

$$Z = \max \sum_{i=1}^I (P_{i,T} - P_{i,0}) = \max \sum_{i=1}^I \sum_{t=2}^T (P_{i,t} - P_{i,t-1}) \quad (6)$$

Também é importante notar que para possibilitar a formulação do modelo, deve-se decidir a quantidade de deslocamentos a serem calculados, ou seja, o horizonte de tempo da otimização.

3.6.2. Tráfego com dois veículos na rodovia

Com dois veículos em uma rodovia, ambos buscando a máxima posição final em um período, existem duas possibilidades. A primeira diz respeito a duas situações: o veículo inicialmente à frente, chamado veículo *líder*, tem uma velocidade maior que o outro veículo ou então os dois veículos estão em sentidos opostos. Em ambas as situações o comportamento dos veículos são equivalentes ao apresentado anteriormente para apenas um veículo. Ou seja,

os dois veículos são considerados viajando independentemente. A segunda possibilidade ocorre no caso de o veículo líder ser mais lento que aquele que está logo atrás, chamado *seguidor*, então em algum momento pode haver obstrução no deslocamento do veículo seguidor causado pelo líder. Este caso pode ser visualizado na evolução de tráfego mostrado na Figura 12, que requer ultrapassagem para não se aumentar o tempo de viagem do veículo seguidor.

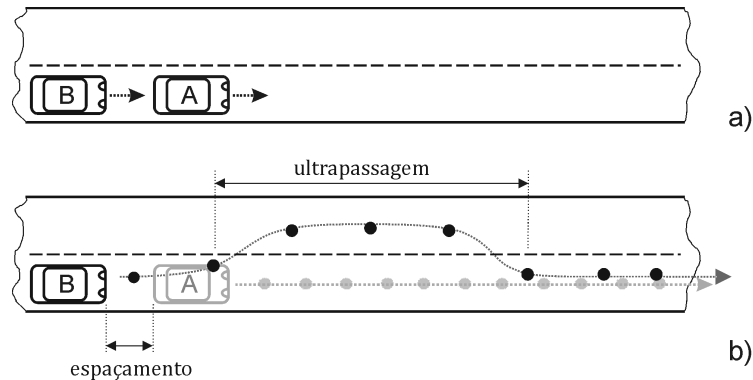


Figura 12 Exemplo de (a) uma situação de tráfego com dois veículos e (b) de uma ultrapassagem do veículo B sobre o veículo A.

Uma ultrapassagem ocorre quando o veículo seguidor utiliza uma faixa adjacente da rodovia conforme mostrado na Figura 12b. Como medida de segurança o veículo seguidor deve manter um espaçamento longitudinal mínimo estimado, em relação ao líder, no instante anterior ao início da troca de faixa e também no instante posterior quando retorna na faixa a frente do primeiro veículo (Figura 10b), passando a ser o novo líder.

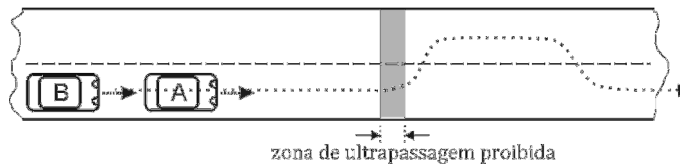
A busca pelo maior deslocamento possível dos dois veículos (A e B) tem como função objetivo:

$$Z = \max(P_{A,T} - P_{A,0} + P_{B,T} - P_{B,0}) \quad (7)$$

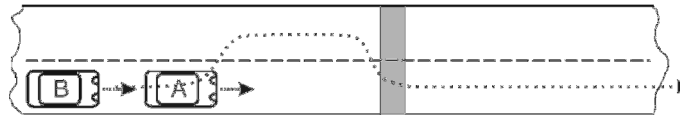
A decisão do momento da ultrapassagem aumenta a complexidade do cálculo dos deslocamentos, pois depende de fatores tais como a topografia da pista, a sinalização de placas regulatórias e as capacidades de aceleração dos veículos.

O resultado ótimo do problema admite diferentes evoluções possíveis. Como o objetivo é o total dos deslocamentos finais, pode ocorrer o caso em que um veículo compromete seu tempo de viagem para proporcionar um menor tempo ao outro e assim resultar em um somatório maior. Em outras palavras, passa a existir conflito entre se buscar o ótimo local, ou seja, o objetivo particular de cada veículo, e o ótimo global, referente ao

tráfego como um todo. Um exemplo pode ser visto na Figura 13 onde uma ultrapassagem pode ocorrer em dois momentos.



(a) Ultrapassagem após a zona de proibição (cor cinza) quando o veículo A não reduz sua velocidade



(b) Ultrapassagem antes da zona de proibição quando o veículo A reduz voluntariamente sua velocidade para permitir ser ultrapassado

Figura 13 Exemplo de duas evoluções de tráfego possíveis para ocorrer uma ultrapassagem considerando restrições ao longo da pista. O mesmo deslocamento total dos veículos pode ocorrer com diferentes deslocamentos individuais.

Na Figura 13a o veículo *B* segue atrás do veículo *A* até o final da zona de ultrapassagem proibida e somente então consegue ultrapassá-lo. Neste caso não é possível se antecipar a ultrapassagem, pois se considerou que a velocidade do veículo *B* não seria suficiente para a ultrapassagem ser concluída antes da zona de proibição. Por outro lado, na Figura 13b considerou-se que o veículo *A* decide reduzir sua velocidade e assim permitir a ultrapassagem de *B*. Comparando-se as duas evoluções pode-se notar que o valor máximo do deslocamento total, ou seja, a soma dos deslocamentos dos dois veículos pode ocorrer com diferentes combinações dos dois deslocamentos individuais. Esta possibilidade gera um conflito na decisão na ordem das ultrapassagens e será abordada na próxima seção.

3.6.3. Tráfego com múltiplos veículos na rodovia

Considerando mais de dois veículos, podem acontecer problemas adicionais para o cálculo das trajetórias individuais dos veículos. Um problema são os veículos em sentido contrário que podem restringir o espaço livre necessário para uma ultrapassagem, conforme definido no problema anterior. Outro problema é a decisão sobre a ordem de ultrapassagem. Decidir, por exemplo, qual dos veículos atrás em uma fila será o primeiro a iniciar a ultrapassagem sobre os veículos a sua frente (Figura 14a). Outro exemplo é a decisão entre ultrapassagens de veículos em sentidos opostos em relação a seus respectivos veículos líderes e quando existe espaço somente para uma das ultrapassagens (Figura 14b).

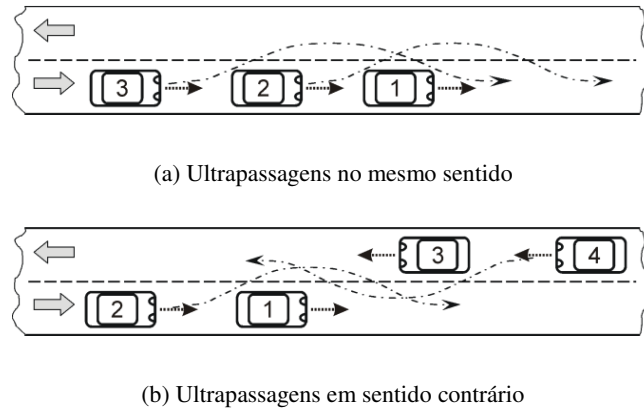


Figura 14 Exemplos de situações de tráfego onde há necessidade de decisão sobre a ordem de ultrapassagem.

Estes exemplos explicam a necessidade de se estabelecer uma prioridade nas ultrapassagens. Esta prioridade deve influenciar a eficiência do tráfego e também o desempenho individual dos IVs. Uma medida de eficiência é definida como sendo o total das distâncias percorridas (Z) pelos veículos durante o horizonte de tempo considerado para o segmento da rodovia. Portanto, esta passa a ser a métrica considerada para se avaliar a evolução de um tráfego.

É possível também observar pelo exemplo da Figura 14 que existem múltiplas possibilidades de combinações de ultrapassagens. Isto exige variáveis discretas para representar as decisões na modelagem do problema, tornando o problema do tipo combinatorial e de difícil solução quando existem muitos veículos transitando no mesmo segmento de rodovia.

A seguir é apresentado um exemplo numérico para demonstrar a influência de uma trajetória sobre outra gerando conflitos entre os objetivos individuais.

3.7. Exemplo numérico de cálculo da evolução de tráfego

Para entender melhor o aspecto combinatorial do problema de ultrapassagem, é apresentado a seguir um exemplo numérico detalhado. O objetivo é ilustrar a melhor evolução possível, ou seja, buscar o máximo valor do total dos deslocamentos.

Supondo uma situação de tráfego inicial com três veículos viajando no mesmo sentido em uma pista plana e reta, conforme pode ser visto na Figura 14a. Consideram-se os veículos 1, 2 e 3 com velocidade inicial, igual à velocidade desejada para todo o período, como respectivamente: 12, 18 e 22m/s, e com posições iniciais (desde o início do segmento)

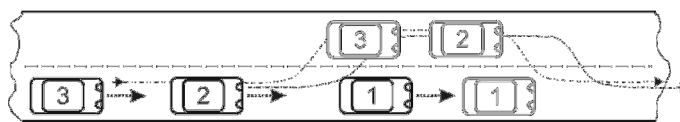
respectivamente 100, 80 e 60m. Deseja-se então calcular o valor máximo possível do total dos deslocamentos em um período de tempo de 11s e considerando as seguintes premissas:

- os veículos não podem exceder suas respectivas velocidades desejadas,
- os veículos devem manter um espaçamento mínimo entre eles de 18,1m,
- o veículo 1, que está inicialmente na frente, deve manter sua velocidade,
- os veículos tem as mesmas dimensões, e sem prejuízo para a solução do problema esta dimensão é considerada zero,
- os veículos tem capacidade de aceleração constantes e iguais a $7m/s^2$.

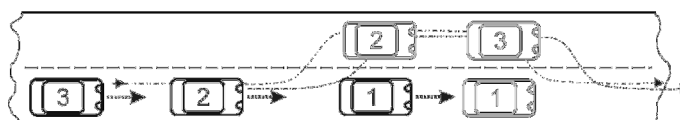
O cálculo do deslocamento do veículo 1 é simples, pois sua velocidade é constante e não enfrenta obstrução durante todo o período. Conforme premissa do exemplo, seu deslocamento no período independe dos demais e será: $d = v \times t = 12 \times 11 = 132m$.

Para o cálculo dos outros dois veículos é necessário considerar duas possibilidades. Ambos têm capacidade de ultrapassar o veículo 1, porém um de cada vez, como pode ser visto na Figura 15.

Em ambas as possibilidades deve ocorrer uma situação de obstrução, que obriga um veículo seguidor a reduzir a velocidade. Na primeira possibilidade o veículo 2 ultrapassa o veículo 1 antes que o veículo 3 o faça, então o veículo 3 fica obstruído (Figura 15a). Na outra possibilidade o veículo 3 ultrapassa antes, então o veículo 2 fica obstruído (Figura 15b). Nas duas possibilidades, o veículo que ultrapassa primeiro consegue manter sua velocidade constante (acelerando se for necessário) até o final do período e, portanto o cálculo de seu deslocamento é simples. Por outro lado, o cálculo do deslocamento do veículo que ficar obstruído dependerá do momento em que for desobstruído.



(a) o veículo 2 ultrapassa inicialmente o veículo 1 e o veículo 3 fica obstruído



(b) o veículo 3 ultrapassa inicialmente o veículo 1 e o veículo 2 fica obstruído

Figura 15 Exemplos de duas evoluções de tráfego possíveis dependendo da ordem de ultrapassagem dos veículos que estão na fila.

Considerando a primeira possibilidade, onde o veículo 2 ultrapassa primeiro, o veículo 3 deve ficar retido atrás do veículo 2 até o instante em que o veículo 2 retorna à faixa da direita e ao mesmo tempo libera a faixa da esquerda conforme observado na Figura 16a. Nessas manobras são respeitados os espaçamentos mínimos definidos anteriormente. O valor deste instante pode ser obtido com uma equação onde a distância percorrida do veículo 2 adicionado ao valor constante do espaçamento mínimo é igual à distância percorrida do veículo 1. Para este exemplo o valor calculado deste instante é 6,4s. Após a desobstrução, o veículo 3 acelera, mas leva um tempo para aumentar sua velocidade de 18 para 22. O cálculo deste tempo é conseguido pela razão da variação de velocidade desejada, ou seja, $22 - 18 = 4$, pela aceleração máxima do veículo, resultando o tempo de 0,57s.

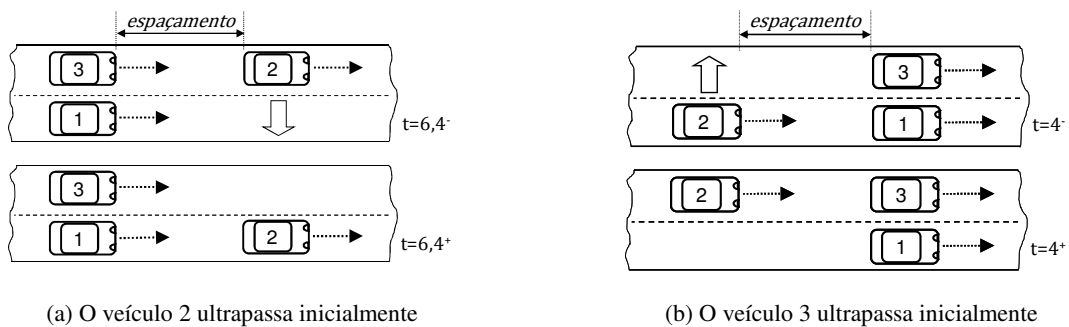


Figura 16 Momento inicial em que todos os veículos do exemplo 1 ficam desobstruídos após ocorrer uma ultrapassagem. Neste exemplo, qualquer ultrapassagem deve causar obstrução visto que todos querem desenvolver as respectivas velocidades desejadas.

Um gráfico com a variação de posição dos veículos em função do tempo pode ser visto na Figura 17a. Neste gráfico pode-se notar que os veículos 1 e 2 podem desenvolver uma velocidade constante durante todo o período conforme representado pelas retas. Entretanto o veículo 3 é obstruído e fica atrás do veículo 2 até o instante $t = 6,4s$ quando então, o veículo 3 tem a faixa liberada e pode acelerar para atingir sua velocidade desejada. Esta velocidade é conseguida no instante $t = 6,9s$.

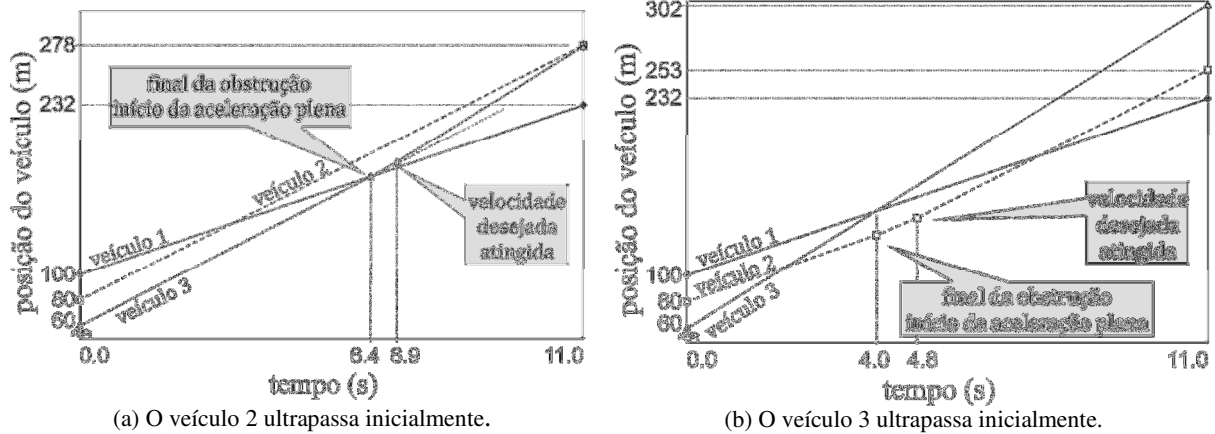


Figura 17 Gráfico das posições dos veículos em função do tempo T referente à evolução do tráfego da situação de tráfego do exemplo 1.

Considerando a possibilidade do veículo 3 ultrapassar primeiro, o veículo 2 deve ficar retido atrás do veículo 1 até um instante em que o veículo 3 ultrapassa o veículo 1 e ao mesmo tempo libera a faixa para o veículo 2. Conforme mostra a Figura 16b. O valor deste instante pode ser obtido com uma equação onde a distância percorrida do veículo 1 é igual à distância percorrida do veículo 3. Para este exemplo o valor calculado deste instante é 4,0s. Após a desobstrução, o veículo 2 leva um tempo para aumentar sua velocidade de 12 para 18, que é calculado da mesma forma que o caso anterior e tem valor de 0,8s. Sua velocidade desejada é atingida somente em $t = 4,8s$. Um gráfico com a variação das posições dos veículos em função do tempo pode ser visto na Figura 17b.

Comparando-se os resultados das duas evoluções observa-se que o valor do somatório dos deslocamentos dos veículos nas duas possibilidades é o mesmo (787,3m). Este valor pode ser considerado como o valor ótimo do problema, pois não existe outra sequência possível de ultrapassagem sem que haja perda de tempo de um ou ambos os veículos e consequentemente menor deslocamento total.

Importante notar que os resultados individuais dos veículos foram diferentes para as duas possibilidades. Isto pode ser melhor observado no gráfico da Figura 18. Cada eixo do gráfico indica a posição final alcançada por um dos dois veículos (2 e 3). Neste gráfico estão plotados, na área demarcada, todos os possíveis resultados do cálculo do deslocamento dos veículos. Em destaque, com as setas, aparecem os dois pontos ótimos possíveis, ou seja, a combinação da soma das duas posições finais que resultam no maior valor (787,3m, adicionando-se o deslocamento de 132m do veículo 1).

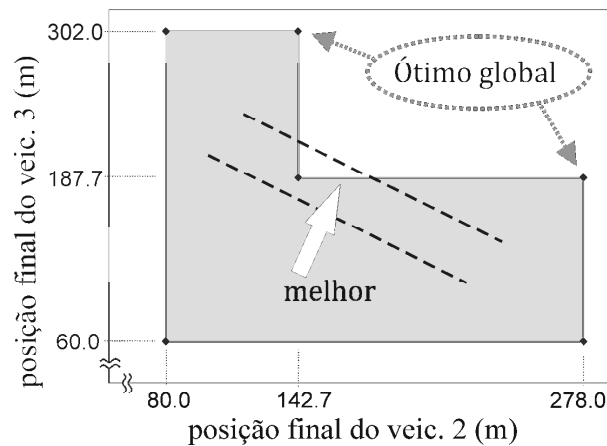


Figura 18 Representação gráfica dos resultados possíveis da evolução de tráfego do exemplo 1. As setas mostram os dois resultados ótimos possíveis. A linha tracejada mostra a função objetivo.

É possível concluir deste exemplo que o problema formulado desta maneira pode ter mais de um ponto de ótimo e que o resultado ótimo depende da ordem de ultrapassagem dos veículos. Também é possível concluir que esta ordem apesar de não fazer diferença para o valor ótimo global, porém pode fazer diferença para cada veículo individualmente.

3.8. Conclusão

Neste capítulo foram apresentados alguns elementos representativos do comportamento dinâmico de um tráfego de veículos e uma proposta de modelar matematicamente o problema. Alguns dos fatores que aumentam a complexidade e demandam um grande número de variáveis são as características de aceleração e frenagem e combinação de ultrapassagens entre os veículos.

A principal solução proposta para reduzir a complexidade do problema é a discretização de algumas variáveis: o tempo é discretizado em intervalos constantes, o deslocamento lateral do veículo é discretizado de maneira a representar somente a faixa em que se encontra o veículo, e a distância longitudinal da pista é discretizada em seções.

Considerando-se que as informações de controle de um sistema automatizado de rodovia são tratadas de maneira hierárquica, também foi proposta uma aproximação na representação do deslocamento lateral dos veículos. A ideia é representar apenas o instante em que o veículo troca de faixa. Os detalhes desta manobra podem ser considerados em um nível mais baixo da hierarquia de controle, pois não necessitam de informações globais. Com isto o problema se concentra em descobrir a melhor entre as possíveis combinações de ultrapassagens entre os veículos em uma rodovia.

Considerando a discretização do tempo, os deslocamentos dos veículos são definidos pelas sucessões de posições ao longo da pista conforme os intervalos de tempo. Considerando como objetivo do problema o menor tempo de viagem dos motoristas, o objetivo passa a ser: encontrar o maior deslocamento possível dos veículos ao final de um período considerado.

Conforme demonstrado em um exemplo numérico, o ótimo global do problema pode admitir mais de uma configuração na ordem de ultrapassagem entre os veículos. Desta forma nem sempre o ótimo global resulta em ótimo para todos os veículos, pois alguns podem ter seu tempo comprometido para se atingir um melhor desempenho global. Adotou-se como premissa para este trabalho que nenhum veículo deve se sacrificar em prol de um melhor tráfego global. Esta lógica deve favorecer a decisão voluntária de um motorista em participar de um futuro sistema de coordenação central de tráfego.

No próximo capítulo será apresentado o modelo matemático para o cálculo centralizado de trajetórias dos IVs em uma rodovia, considerando as premissas estabelecidas neste capítulo.

4. MODELO MILP

Neste capítulo é apresentado um modelo matemático baseado em formulação MILP para se determinar as trajetórias otimizadas de IVs em um segmento de rodovia com qualquer configuração de faixa (REGHELIN e ARRUDA, 2014).

As faixas devem ser adjacentes e cada uma deve assumir uma das seguintes configurações possíveis:

- tipo “U”: uso exclusivo no sentido à direita, ou seja, pode ser ocupada somente por veículos seguindo neste sentido,
- tipo “D”: uso exclusivo no sentido à esquerda, ou seja, pode ser ocupada somente por veículos seguindo neste sentido,
- tipo “u”: uso preferencial no sentido à direita, ou seja, pode ser ocupada por veículos em ambos sentidos, porém em caso de conflito na utilização, os veículos no sentido à esquerda devem abandonar a faixa.
- tipo “d”: uso preferencial no sentido à esquerda, ou seja, pode ser ocupada por veículos de ambos sentidos, porém em caso de conflito na utilização, os veículos no sentido à direita devem abandonar a faixa.
- tipo “b”: sem preferência de sentido podendo ser ocupada por veículos em ambos sentidos.

Assim a configuração das faixas de uma rodovia pode ser representada pela sequência de letras correspondente aos tipos citados acima. Por exemplo, a configuração de uma rodovia de pista simples (duas faixas com sentidos contrários) seria denominada como “ud”.

A seguir serão apresentados além do diagrama de módulos do sistema desenvolvido, a nomenclatura, a função objetivo e as restrições utilizadas no modelo matemático em MILP.

4.1. Considerações iniciais

A representação gráfica do sistema proposto pode ser visto na Figura 19. Neste esquemático são consideradas as seguintes entradas:

- Informações dos veículos tais como a posição, sentido e curva de aceleração.
- Parâmetros de segurança, tais como o espaçamento mínimo entre veículos.
- Restrições da rodovia, tais como a topografia e sinalização.

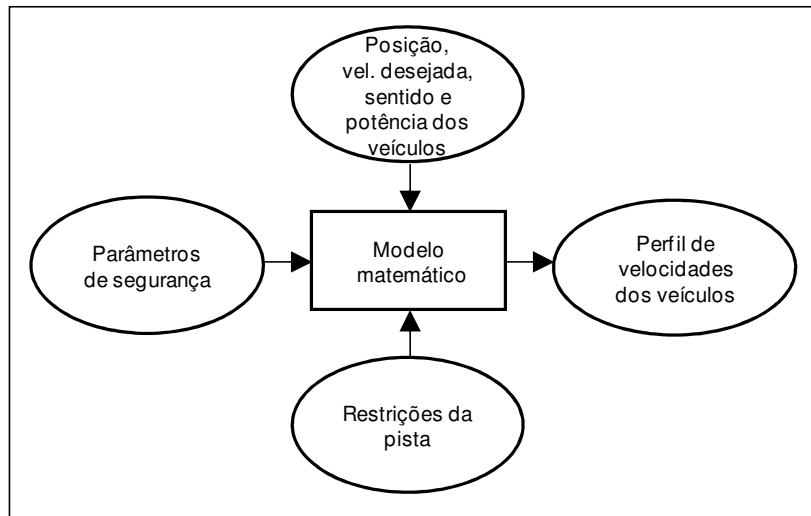


Figura 19 Representação gráfica do sistema proposto – Entradas e Saída.

O modelo matemático proposto utiliza a modelagem de Programação Linear Inteira Mista (MILP) com discretização uniforme no tempo. A abordagem MILP utiliza variáveis contínuas, inteiras e binárias e é utilizada na modelagem de problemas de natureza combinatória de difícil resolução. As variáveis binárias representam as decisões a serem tomadas, sendo uma das principais vantagens desta formulação. Por exemplo, a informação relativa ao posicionamento e à ocupação compartilhada da pista é representada no modelo proposto por variáveis binárias. A principal desvantagem está relacionada ao tamanho do intervalo discreto de tempo. Se o intervalo for muito grande pode-se não representar corretamente a realidade do problema, devido à diferença entre o tempo real e o tempo discreto utilizado. Por outro lado, se o intervalo for muito pequeno, gera-se uma grande quantidade de variáveis, conseqüentemente aumentando a complexidade do modelo e o tempo computacional.

A quantidade de variáveis envolvidas na modelagem MILP torna a complexidade computacional um fator relevante (GAREY e JOHNSON, 1979) em aplicações reais. Portanto, ao desenvolver um modelo MILP para o problema de cálculo da movimentação de IVs, se espera encontrar resultados otimizados, isto é, trajetórias ótimas, apesar de para isso seja necessário um alto tempo computacional. Por outro lado, esse resultado ótimo servirá de base de comparação na análise de resultados gerados por modelos simplificados, em geral heurísticos, que possuem tempo computacional aplicável em tempo real.

A aplicação do modelo descrita neste capítulo é restrita a apenas um segmento de rodovia. Este segmento é dividido em trechos discretos com comprimento variável que são

chamados de *seções*, como pode ser observado na Figura 20. A finalidade das seções foi discutida anteriormente na seção 3.4.2.

4.2. Nomenclatura utilizada no modelo

A nomenclatura utilizada é detalhada a seguir mostrando os índices, parâmetros e variáveis (ver também Figura 20). Vale observar o uso de índices subscritos, para representar, dentre outros, a identificação dos veículos, segmentos de pista e os intervalos de tempo envolvidos.

Índices:

i - representa o número do veículo: $i = 1, 2, \dots, I$

r - representa o sentido do veículo na pista: $r = 1, 2$

t - representa o número do intervalo de tempo e é denominado de instante: $t = 1, 2, \dots, T$

s - representa o número da seção da pista: $s = 1, 2, \dots, S$

k - representa a faixa de velocidade conforme discretização da curva de aceleração máxima de um veículo (Figura 20b): $k = 1, 2, \dots, K$

l - representa o número da faixa de uma pista: $l = 1, 2, \dots, L$

m_r - representa o número da sequência de pares do conjunto H_r no respectivo sentido r :

$$m_r = 1, 2, \dots, M_r$$

n_r - representa o número da sequência de pares do conjunto Q_r no respectivo sentido r :

$$n_r = 1, 2, \dots, N_r$$

Conjuntos:

H_r - conjunto de M_r possíveis pares de veículos onde no par (a, b) , o veículo b pode ultrapassar o veículo a no sentido r . Considerando um determinado par m_r contendo (a, b) então $H_r(m_r, 1) = a$ e $H_r(m_r, 2) = b$,

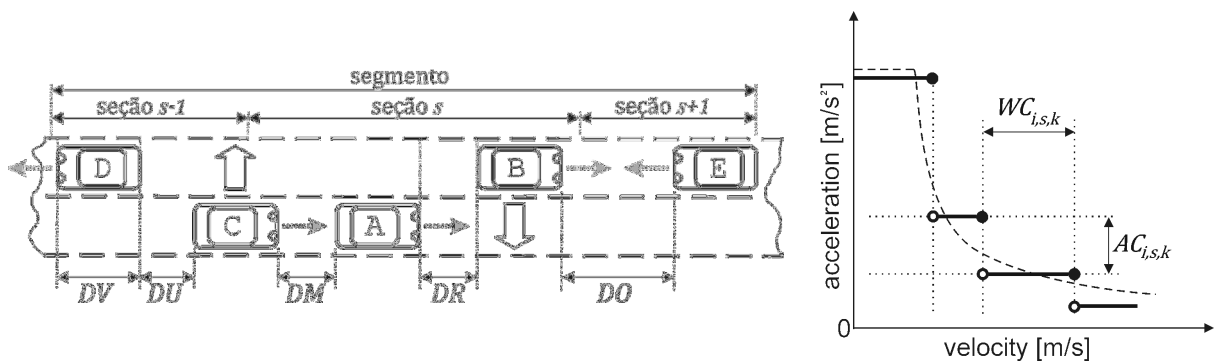
Q_r - conjunto de N_r pares possíveis de veículos onde no par (a, b) o veículo a , no sentido r , pode entrar na mesma faixa do veículo b e colidir frontalmente. Considerando um determinado par n_r contendo (a, b) então $Q_r(n_r, 1) = a$ e $Q_r(n_r, 2) = b$.

Parâmetros:

$AC_{i,s,k}$ - capacidade de aceleração (m/s^2) correspondente à faixa de velocidade k da curva de aceleração referente ao veículo i na seção s .

$AR_{i,s}$ - máxima desaceleração (m/s^2) admitida ao veículo i na seção s .

- AS_s - aceleração (m/s^2) do veículo imposta pela topografia da pista na seção s .
- DL_s - distância (m) do início da pista até o final da seção s .
- DM - espaçamento (m) mínimo admitido entre dois veículos no mesmo sentido e na mesma faixa.
- DO - espaçamento (m) mínimo admitido entre dois veículos em sentidos opostos em uma mesma faixa.
- DR - quando um veículo entra em uma faixa à frente de outro veículo que já estava nesta mesma faixa, é o espaçamento (m) mínimo admitido em relação a esse outro veículo.
- DU - espaçamento (m) mínimo admitido entre dois veículos em uma mesma faixa após se cruzarem em sentidos opostos.
- DV_i - comprimento (m) do veículo i .
- E - valor constante adimensional referente ao método “Big M” usado em Programação Linear Inteira Mista e incorporado no modelo. Deve ser escolhido como um valor maior que o máximo valor possível da variável ao qual for aplicado (nesta tese referente ao comprimento do segmento).
- $U_{l_1, l_2, s}$ - constante binária que indica permissão (caso =1) ou não (caso =0) para um veículo passar da faixa l_1 para l_2 na seção s . Depende da sinalização da pista.
- $WC_{i,s,k}$ - velocidade (m/s) correspondente à faixa k da curva de aceleração do veículo i na seção s .
- $WD_{i,s}$ - máxima velocidade (m/s) desejada para o veículo i na seção s .
- $WP_{i,s}$ - máxima velocidade (m/s) admitida para o veículo i na seção s .
- Y - intervalo de tempo (s) decorrido entre duas posições calculadas dos veículos.



(a) Exemplo de situação de tráfego mostrando os principais parâmetros usados no modelo. No caso de uma configuração “ud” se teria: $H_1 = [(A, B), (A, C), (B, C)]$, $Q_1 = [(B, E), (C, E)]$, $H_2 = [(D, E)]$, $Q_2 = [(E, B), (E, A), (E, C)]$. $H_1(3,1) = B$. $H_1(3,2) = C$.

(b) Representação da discretização da curva de aceleração máxima do veículo para uma seção s .

Figura 20 Exemplo de parâmetros usados no modelo: (a) espaçamento e (b) curva de aceleração.

Variáveis binárias:

$$BP_{i,t,s} = \begin{cases} 1, & \text{se o veículo } i \text{ estiver na seção } s \text{ no tempo } t \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases}$$

$$BA_{i,s,k} = \begin{cases} 1, & \text{se o veículo } i \text{ estiver na seção } s \text{ e na faixa de velocidade } k \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases}$$

$$BB_{i,l,t} = \begin{cases} 1, & \text{se o veículo } i \text{ estiver na faixa } l \text{ e no tempo } t \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases}$$

$$BI_{l,m_r,t} = \begin{cases} 0, & \text{se o veículo } b \text{ do par } (a, b) \text{ correspondente à sequência } m_r \text{ do conjunto } H_r \\ & \text{iniciou a ultrapassagem sobre o veículo } a \text{ no tempo } t \\ 1, & \text{caso contrário} \end{cases}$$

$$BF_{l,m_r,t} = \begin{cases} 0, & \text{se o veículo } b \text{ do par } (a, b) \text{ correspondente à sequência } m_r \text{ do conjunto } H_r \\ & \text{concluiu a ultrapassagem sobre o veículo } a \text{ no tempo } t \\ 1, & \text{caso contrário} \end{cases}$$

$$BU_{l,m_r,t} = \begin{cases} 0, & \text{se o veículo } b \text{ do par } (a, b) \text{ correspondente à sequência } m_r \text{ do conjunto } H_r \\ & \text{estiver ultrapassando sobre o veículo } a \text{ no tempo } t \\ 1, & \text{caso contrário} \end{cases}$$

$$BO_{l,n_r,t} = \begin{cases} 0, & \text{se a distância entre os veículos do par correspondente à sequência } n_r \\ & \text{do conjunto } Q_r, \text{ antes de se cruzarem for menor que } DO, \text{ no tempo } t \\ 1, & \text{caso contrário} \end{cases}$$

$$BC_{l,n_r,t} = \begin{cases} 0, & \text{se a distância entre os veículos do par correspondente à sequência } n_r \\ & \text{do conjunto } Q_r, \text{ após se cruzarem for menor que } DU, \text{ no tempo } t \\ 1, & \text{caso contrário} \end{cases}$$

Variáveis Contínuas:

$V_{i,t}$ - velocidade (m/s) do veículo i no intervalo de tempo t .

$P_{i,t}$ - posição (m) do veículo i no instante de tempo t .

4.3. Função Objetivo

Conforme discutido na seção 3.6, foi adotada uma métrica para se avaliar a evolução de um tráfego como sendo o total das distâncias percorridas pelos veículos, representado por Z . Portanto a função objetivo proposta é o somatório das variáveis correspondentes à posição final, ou seja, no tempo T , de todos os veículos. A formulação para se maximizar o total das distâncias percorridas (Z) obtidas no modelo MILP é a seguinte:

$$Z = \max \sum_{i=1}^I |(P_{i,T} - P_{i,0})| \quad (8)$$

Em uma situação ideal, porém hipotética, de uma evolução de tráfego onde cada veículo pudesse se deslocar sem ser obstruído pelos demais, Z assumiria o valor máximo possível. Este valor de Z é definido como Z_1 . Em um cenário real, o valor de Z em (8) será sempre menor ou igual a Z_1 devido às obstruções dos demais veículos. Neste caso o modelo MILP indicará a melhor combinação possível das trajetórias dos veículos. O valor de Z obtido com o modelo MILP é definido como Z_2 e assume-se que este é o resultado ótimo “real”.

4.4. Restrições

Uma ultrapassagem se inicia quando dois veículos estão espaçados a menos de DM e termina quando estes veículos estão separados a mais de DR . Para que uma ultrapassagem tenha duração de pelo menos um instante de tempo, quando ($BU_{l,m_r,t} = 0$), a qual é uma premissa da formulação, deve-se respeitar a seguinte condição na escolha dos parâmetros:

$$\max \{WP_{i,s}\} \times Y \leq DM + DR \quad \forall i = 1, 2, \dots, I; s = 1, 2, \dots, S \quad (9)$$

A máxima velocidade possível de um veículo em um determinado instante é igual a sua velocidade no instante anterior, somada à máxima aceleração possível na seção em que se encontra. Considerando inicialmente uma simplificação que a aceleração do veículo em uma pista plana é constante e igual a AC , então a formulação da restrição da máxima velocidade possível a cada instante é dada por:

$$V_{i,t} \leq V_{i,t-1} + \underbrace{AC \times Y}_{\text{incremento possível da velocidade na seção } s} + \underbrace{E \times (1 - BP_{i,t,s})}_{\text{torna a equação limitada somente se o veículo estiver na seção } s} \quad (10)$$

$$\forall i = 1, 2, \dots, I; t = 2, 3, \dots, T; s = 1, 2, \dots, S$$

Onde o fator $E \times (1 - BP_{i,t,s})$ torna a equação limitada para a velocidade somente se o veículo estiver na seção s , ou seja quando $BP_{i,t,s} = 1$.

Para representar a dinâmica da aceleração mais detalhadamente, considera-se o cálculo da máxima aceleração possível somando-se duas parcelas. Uma parcela é relativa às

características da pista. Ou seja, referente ao efeito da inclinação da pista sobre o veículo. Esta aceleração AS_s assume um valor constante em toda a seção s . A outra parcela da aceleração é função das características do veículo. Por definição, o valor desta aceleração é determinado pela curva de aceleração máxima específica do veículo (Figura 20b) conforme descrita anteriormente na seção 3.4.3. Portanto a inequação (10) deve ser substituída pelas seguintes inequações:

$$V_{i,t} \leq V_{i,t-1} + (1 - BP_{i,t,s}) \times E + \sum_{k=1}^K ((AC_{i,s,k} + AS_s) \times Y \times BA_{i,s,k}) \quad (11)$$

$$\forall i = 1, 2, \dots, I; t = 2, 3, \dots, T; s = 1, 2, \dots, S$$

$$V_{i,t} \leq \sum_{k=1}^K (WC_{i,s,k} \times (1 - BA_{i,s,k})) + (1 - BP_{i,t,s}) \times E \quad (12)$$

$$\forall i = 1, 2, \dots, I; t = 2, 3, \dots, T; s = 1, 2, \dots, S$$

$$BA_{i,s,k-1} \geq BA_{i,s,k} \quad (13)$$

$$\forall i = 1, 2, \dots, I; k = 2, 3, \dots, K; s = 1, 2, \dots, S$$

A velocidade de um veículo em um determinado tempo t deve ser menor que a máxima velocidade admitida para uma seção s . Portanto são necessárias as seguintes restrições:

$$V_{i,t} \leq WP_{i,s} + (1 - BP_{i,t,s}) \times E \quad (14)$$

$$\forall i = 1, 2, \dots, I; t = 1, 2, \dots, T; s = 1, 2, \dots, S$$

A velocidade de um veículo em um determinado tempo t também deve ser menor que a máxima velocidade desejada, ou seja, escolhida pelo motorista, para uma seção s . Portanto são necessárias as seguintes restrições:

$$V_{i,t} \leq WD_{i,s} + (1 - BP_{i,t,s}) \times E \quad (15)$$

$$\forall i = 1, 2, \dots, I; t = 1, 2, \dots, T; s = 1, 2, \dots, S$$

A velocidade de um veículo não pode ser reduzida a menos do que um limite ($AR_{i,s}/Y$), ou seja, não pode haver freadas drásticas. Portanto são necessárias as seguintes restrições:

$$V_{i,t-1} - V_{i,t} \leq AR_{i,s}/Y$$

$$\forall i = 1,2, \dots, I; t = 2,3, \dots, T; s = 1,2, \dots, S \quad (16)$$

Para se determinar ($BP_{i,t,s} = 1$), que indica qual a seção s que o veículo i se encontra no tempo t , são necessárias as seguintes restrições:

$$P_{i,t} \leq DL_{s+1} + (1 - BP_{i,t,s}) \times E$$

$$\forall i = 1,2, \dots, I; t = 1,2, \dots, T; s = 1,2, \dots, S - 1 \quad (17)$$

$$P_{i,t} \geq DL_{s-1} - (1 - BP_{i,t,s}) \times E$$

$$\forall i = 1,2, \dots, I; t = 1,2, \dots, T; s = 2,3, \dots, S \quad (18)$$

$$\sum_{s=1}^S BP_{i,t,s} = 1$$

$$\forall i = 1,2, \dots, I; t = 1,2, \dots, T \quad (19)$$

Considerando os índices ($\hat{r}=1$) quando ($r=1$) e ($\hat{r}=-1$) quando ($r=2$), então as restrições necessárias para se definir ($BI_{l,m_r,t} = 0$) indicando o tempo t quando inicia uma ultrapassagem entre os veículos correspondentes ao par m_r , são:

$$BI_{l,m_r,t} \times E \geq (-DM - DV_{H_r(m_r,1)} - P_{H_r(m_r,1),t} + P_{H_r(m_r,2),t}) \times \hat{r}$$

$$\forall l = 1,2, \dots, L; m_r = 1,2, \dots, M_r; t = 1,2, \dots, T; r = 1,2 \quad (20)$$

$$(1 - BI_{l,m_r,t}) \times E \geq (DM + DV_{H_r(m_r,1)} + P_{H_r(m_r,1),t} - P_{H_r(m_r,2),t}) \times \hat{r}$$

$$\forall l = 1,2, \dots, L; m_r = 1,2, \dots, M_r; t = 1,2, \dots, T; r = 1,2 \quad (21)$$

As restrições necessárias para se definir ($BF = 1$) quando dois veículos correspondentes ao par m_r do conjunto H_r concluem uma ultrapassagem são:

$$BF_{l,m_r,t} \times E \geq (-DR - DV_{H_r(m_r,2)} - P_{H_r(m_r,1),t} + P_{H_r(m_r,2),t}) \times \hat{r}$$

$$\forall l = 1,2 \dots, L; m_r = 1,2, \dots, M_r; t = 1,2, \dots, T; r = 1,2 \quad (22)$$

$$(1 - BF_{l,m_r,t}) \times E \geq (DR + DV_{H_r(m_r,2)} + P_{H_r(m_r,1),t} - P_{H_r(m_r,2),t}) \times \hat{r}$$

$$\forall l = 1,2 \dots, L; m_r = 1,2, \dots, M_r; t = 1,2, \dots, T; r = 1,2 \quad (23)$$

As restrições necessárias à definição ($BU = 1$) quando dois veículos correspondentes ao par m_r do conjunto H_r estão ultrapassando são:

$$BU_{l,m_r,t} = BI_{l,m_r,t} + BF_{l,m_r,t}$$

$$\forall l = 1,2 \dots, L; m_r = 1,2, \dots, M_r; t = 1,2, \dots, T \quad (24)$$

As restrições que definem ($BO = 1$) quando dois veículos correspondentes ao par n_r do conjunto Q_r estiverem mais próximos que a distância DO são:

$$BO_{l,n_r,t} \times E \geq (DO + P_{Q_r(n_r,1),t} - P_{Q_r(n_r,2),t}) \times \hat{r}$$

$$\forall l = 1,2 \dots, L; n_r = 1,2, \dots, N_r; t = 1,2, \dots, T; r = 1,2 \quad (25)$$

$$(1 - BO_{l,n_r,t}) \times E \geq -(DO - P_{Q_r(n_r,1),t} + P_{Q_r(n_r,2),t}) \times \hat{r}$$

$$\forall l = 1,2 \dots, L; n_r = 1,2, \dots, N_r; t = 1,2, \dots, T; r = 1,2 \quad (26)$$

As restrições necessárias para definir ($BC = 1$) quando dois veículos correspondentes ao par n_r do conjunto Q_r se cruzam na rodovia e se afastam a uma distância maior que DU são:

$$BC_{l,n_r,t} \times E \geq (-DU + P_{Q_r(n_r,1),t} - P_{Q_r(n_r,2),t}) \times \hat{r}$$

$$\forall l = 1,2 \dots, L; n_r = 1,2, \dots, N_r; t = 1,2, \dots, T; r = 1,2 \quad (27)$$

$$(1 - BC_{l,n_r,t}) \times E \geq (DU - P_{Q_r(n_r,1),t} + P_{Q_r(n_r,2),t}) \times \hat{r} \quad (28)$$

$$\forall l = 1, 2, \dots, L; n_r = 1, 2, \dots, N_r; t = 1, 2, \dots, T; r = 1, 2$$

As restrições necessárias para evitar que durante uma ultrapassagem, um veículo fique a uma distância mínima DO em relação a outro veículo que está em sentido contrário na mesma faixa, são:

$$BU_{l,m_r,t} \geq BO_{l,n_r,t} - BC_{l,n_r,t}$$

$$\forall H_r(m_r, 2) = Q_r(n_r, 1); m_r = 1, 2, \dots, M_r; n_r = 1, 2, \dots, N_r; l = 1, 2, \dots, L; \quad (29)$$

$$t = 1, 2, \dots, T$$

São necessárias restrições para forçar que caso dois veículos estejam ultrapassado ($BU_{l,m_r,t}=0$) outros veículos ocupem a mesma faixa para isto, então ambos veículos devem manter um afastamento entre eles de no mínimo DM . Para isso são necessárias as seguintes restrições:

$$P_{H_r(\dot{m}_r,2),t} \times \hat{r} + BU_{l,m_r,t} \times E + BU_{l,\dot{m}_r,t} \times E \geq P_{H_r(\dot{m}_r,1),t} \times \hat{r} + DM$$

$$\forall H_r(m_r, 2) = H_r(\dot{m}_r, 1); \dot{m}_r = 1, 2, \dots, M_r; m_r = 1, 2, \dots, M_r; l = 1, 2, \dots, L; \quad (30)$$

$$t = 1, 2, \dots, T; r = 1, 2$$

As restrições necessárias para forçar que um veículo i permaneça em uma e somente uma faixa no tempo t , são:

$$\sum_{l=1}^L BB_{i,l,t} = 1 \quad (31)$$

$$\forall i = 1, 2, \dots, I; t = 1, 2, \dots, T$$

As restrições necessárias para forçar que uma troca de faixa de um veículo i no tempo t , ocorram somente entre faixas adjacentes, são:

$$BB_{i,l,t-1} + \sum_{\tilde{l}=l+2}^L (BB_{i,\tilde{l},t}) \leq 1 \quad (32)$$

$$\forall i = 1, 2, \dots, I; l = 1, 2; t = 2, 3, \dots, T$$

$$BB_{i,L,t-1} + \sum_{\tilde{l}=1}^{L-2} (BB_{i,\tilde{l},t}) \leq 1 \quad (33)$$

$$\forall i = 1, 2, \dots, I; l = L - 1, L; t = 2, 3, \dots, T$$

$$BB_{i,l,t-1} + \sum_{\tilde{l}=1}^{l-2} (BB_{i,\tilde{l},t}) + \sum_{\tilde{l}=l+2}^L (BB_{i,\tilde{l},t}) \leq 1 \quad (34)$$

$$\forall i = 1, 2, \dots, I; l = 3, 4, \dots, L - 2; t = 2, 3, \dots, T$$

São necessárias restrições para evitar uma situação irreal onde dois veículos seguindo lado a lado em faixas diferentes e adjacentes possam trocar de faixas em um mesmo intervalo de tempo. Na verdade deve-se indicar que apenas um deles troque de faixa em um primeiro intervalo e, somente então, quando surgir novamente um espaço livre entre as faixas, o outro veículo o faça. Para isso são necessárias as seguintes restrições:

$$BB_{H_r(m_r,1),l,t-1} + BB_{H_r(m_r,2),l+1,t-1} + BB_{H_r(m_r,1),l+1,t} + BB_{H_r(m_r,2),l,t} \leq 4 + BU_{l,m_r,t} \quad (35)$$

$$\forall i = 1, 2, \dots, I; m_r = 1, 2, \dots, M_r; l = 1, 2, \dots, L - 1; t = 2, 3, \dots, T$$

São necessárias restrições para evitar uma situação irreal de manobra drástica onde um veículo ultrapassa outro em apenas dois intervalos consecutivos de tempo. Os intervalos considerados são tipicamente menores que 1 segundo. Portanto, em uma situação onde um veículo *A* está atrás do veículo *B* e na mesma faixa, seria irreal supor que o veículo *A* trocasse de faixa em um intervalo e no intervalo imediatamente seguinte retorne a faixa original a frente do veículo *B*. As restrições são:

$$BB_{i,l,t-2} + BB_{i,l+1,t-1} + BB_{i,l,t} \leq 2 \quad (36)$$

$$\forall i = 1, 2, \dots, I; l = 1, 2, \dots, L - 1; t = 3, 4, \dots, T$$

$$BB_{i,l,t-2} + BB_{i,l-1,t-1} + BB_{i,l,t} \leq 2 \quad (37)$$

$$\forall i = 1, 2, \dots, I; l = 2, 3, \dots, L; t = 3, 4, \dots, T$$

São necessárias restrições para forçar que se dois veículos do par m_r estiverem realizando uma ultrapassagem ($BU_{l,m_r,t}=0$) então estes necessariamente devem estar em faixas diferentes. Para isso são necessárias as seguintes restrições:

$$BB_{H_r(m_r,1),l,t} + BB_{H_r(m_r,2),l,t} \leq 1 + BU_{l,m_r,t} \quad (38)$$

$$\forall i = 1, 2, \dots, I; m_r = 1, 2, \dots, M_r; l = 1, 2, \dots, L; t = 2, 3, \dots, T$$

As restrições necessárias que evitam ultrapassagens da faixa l_1 para a faixa l_2 , na seção s , quando existir proibição ($U_{l_1,l_2,s} = 0$), são:

$$BB_{i,l,t} + BB_{i,l+1,t} \leq U_{l,l+1,s} + 1 \quad (39)$$

$$\forall i = 1, 2, \dots, I; l = 1, 2, \dots, L - 1; t = 1, 2, \dots, T$$

$$BB_{i,l,t} + BB_{i,l-1,t} \leq U_{l,l-1,s} + 1 \quad (40)$$

$$\forall i = 1, 2, \dots, I; l = 2, 3, \dots, L; t = 1, 2, \dots, T$$

A equação para se calcular a posição do veículo i no tempo t é:

$$P_{i,t} = P_{i,t-1} + Y \times (V_{i,t-1} + V_{i,t})/2 \quad (41)$$

$$\forall i = 1, 2, \dots, I; t = 2, 3, \dots, T$$

4.5. Conclusão

Neste capítulo foi descrito a formulação MILP do modelo proposto o qual é composto pela função objetivo (8) e pelas restrições (9) a (41). Considerando as principais variáveis dinâmicas dos veículos, ou seja, posição velocidade e aceleração, apenas a posição e velocidade são representadas de forma contínua e linear. Devido ao comportamento não linear da aceleração, esta foi discretizada de acordo com uma curva de aceleração para cada veículo. O modelo proposto possui muitas variáveis binárias que representam indiretamente as inúmeras possibilidades de trajetórias dos veículos. Estas possibilidades são geradas pela ordem de ultrapassagem dos veículos, a qual gera um quadro complexo de tomada de decisão. Para isso, na modelagem foi também utilizada a formulação *Big-M* para representar principalmente as decisões de troca de faixa, que dão origem as ultrapassagens. Este modelo cresce exponencialmente com o número de veículos e com a quantidade de intervalos de tempo considerada e pode não ser resolvido em tempo computacional, sendo por isto não recomendado para aplicações em tempo real. Conforme é comumente proposto nestes casos, será apresentado na próxima seção um algoritmo heurístico capaz de obter uma solução factível para o problema que seja próximo da solução ótima, segundo alguma métrica, mas obtida em tempo computacional menor.

Este modelo apresenta a vantagem de ser genérico o bastante para modelar o tráfego em qualquer configuração de faixa e foi publicado em (REGHELIN e ARRUDA, 2013). De fato, este modelo genérico é uma evolução iniciada com modelos menores propostos para configurações específicas de estradas ao qual se foi adicionando características específicas. Cronologicamente foram construídos modelos para rodovia de pista simples (REGHELIN e ARRUDA, 2012), pista dupla (REGHELIN e ARRUDA, 2012d), pista simples dotada de faixa suicida (REGHELIN e ARRUDA, 2012c), e pista múltipla (REGHELIN e ARRUDA, 2012b).

5. SOLUÇÃO USANDO ALGORITMO HEURÍSTICO

Como solução do problema para o tempo computacional não adequado a uma aplicação real, é proposto um algoritmo baseado em heurísticas do comportamento do tráfego de veículos.

Semelhantemente ao modelo MILP, o algoritmo tenta reproduzir a dinâmica do tráfego considerando as características dos veículos e da pista. Partindo-se de uma situação inicial de tráfego, o algoritmo calcula as trajetórias para um dado período de tempo.

Pode-se considerar que o algoritmo a ser proposto foi inspirado em simuladores de tráfego do tipo *veículo seguidor* (GIPPS, 1981). Entretanto, o algoritmo considera todos os motoristas como tendo um comportamento agressivo. Isso significa que cada motorista sempre deve tentar atingir a velocidade desejada e ultrapassar sempre que possível. Contrariamente aos simuladores de tráfego tipo *veículo seguidor*, o algoritmo proposto não reproduz o comportamento do motorista humano que ao se aproximar de outro veículo começa a reduzir gradativamente a velocidade (KOTUSEVSKI e HAWICK, 2009), (BARCELÓ, 2010).

A seguir será apresentado o algoritmo proposto e discutido seu comportamento.

5.1. O algoritmo CTIH

O algoritmo CTIH (*Coordinated Trajectories of IVs in Highways*) é proposto para se calcular o GCTP referente à evolução do tráfego de uma de pista com qualquer configuração de faixas.

A ideia geral do algoritmo é tentar reproduzir o comportamento de um motorista cujo objetivo é sempre manter uma velocidade fixa. Para isto ele deverá tentar mudar de faixa caso fique obstruído por um veículo mais lento. A decisão de mudar de faixa dependerá de espaço livre nas pistas adjacentes.

Os parâmetros utilizados para o algoritmo são os mesmos apresentados anteriormente para o modelo MILP, e apresentados na seção 4.2, nomenclatura, porém acrescentando-se um novo parâmetro denominado *DD*. Este parâmetro representa a distância livre estimada, em uma faixa adjacente, considerada mínima o suficiente para que um veículo decida iniciar uma ultrapassagem. Esta distância mínima estimada prevê que durante a ultrapassagem, eventualmente apareça um veículo em sentido contrário. Portanto, quanto

maior o valor de DD , menos arriscado será a ultrapassagem, pois menor será o risco de aparecer um veículo no sentido contrário. Em compensação, também maior será o tempo de viagem, visto que um valor grande para DD inviabiliza a realização de possíveis ultrapassagens.

O valor de DD pode ser considerado fixo ou ainda ser dinamicamente calculado, dependendo da relação de velocidades entre o veículo líder e o seguidor. O valor de DD pode ser calculado dinamicamente de acordo com a equação (42):

$$DD_i = \frac{DM + DV_f + DR}{WD_{i,s} - WD_{f,s}} \times WD_{i,s} \quad \forall i = 1, 2, \dots, I \quad (42)$$

Onde o índice i se refere ao veículo seguidor e o índice f ao veículo líder. Outras definições são possíveis para DD refletindo o caráter mais ou menos arriscado das ultrapassagens.

Considera-se colisão frontal quando o espaçamento de dois veículos na mesma faixa e com sentidos opostos for menor que DO . Assim como no mundo real, algumas vezes, durante uma ultrapassagem pode ser detectada uma possível colisão frontal, como mostra o exemplo da Figura 21a. Nesta situação pode-se concluir que o valor de DD considerado para decidir o início da ultrapassagem acabou não sendo suficiente. Este tipo de contingência é tipicamente resolvido com o motorista forçando o retorno à faixa original. Outra situação semelhante acontece quando, por qualquer motivo, o tempo de ultrapassagem se estende e os veículos invadem uma seção de ultrapassagem proibida, como o exemplo da Figura 21b.

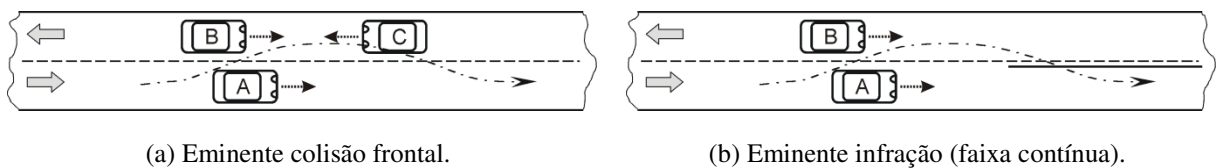


Figura 21 Exemplos de ultrapassagens que por previsão errada de espaço livre necessário deve ser abortada.

Em ambos os casos, o motorista que está ultrapassando poderia compensar esta contingência aumentando a velocidade, mesmo excedendo o valor de velocidade desejada. Também, alternativamente, poderia reduzir a velocidade e aguardar uma oportunidade para voltar à faixa original, mas neste caso assumindo o risco de parar completamente. Ambas as opções não são desejadas, pois podem provocar outras manobras deste tipo em efeito cascata ao longo do tráfego. Além disso, a velocidade desejada não deve ser excedida já que é uma premissa do modelo.

O algoritmo CTIH resolve este problema, recalculando todas as trajetórias a partir do momento em que os dois veículos entraram em rota de colisão na mesma faixa. A ideia é que um dos veículos não deveria ter entrado na faixa onde ocorreu a colisão. O algoritmo considera que o último a entrar é o que deve ser obrigado a não fazê-lo quando a trajetória for recalculada. Para isto introduz-se a variável binária $FC_{l,i,t}$ que previne que esta mesma colisão não se repita. O status da variável $FC_{l,i,t}$ será uma condição adicional quando um veículo i tentar mudar para uma determinada faixa l no tempo t .

Esta estratégia pode demandar mais tempo computacional, mas por outro lado, a colisão é uma situação que pode ser considerada rara se for ajustado corretamente o valor de DD . Uma estratégia segura para se evitar o excesso de colisões e garantir baixo tempo computacional é iniciar com um valor alto de DD , o que garante uma resposta em tempo reduzido, embora pouco eficiente. Em uma segunda etapa, conforme o tempo disponível pode-se recalculer usando-se valores menores de DD . Outra estratégia é monitorar a quantidade acumulada de colisões e caso atingir um determinado limite, o valor de DD é aumentado. Outra possibilidade para diminuir a possibilidade de colisão frontal é a eventual restrição da ultrapassagem entre dois veículos com velocidades desejadas muito semelhantes e que exigem ultrapassagens muito longas.

Durante o cálculo de CTIH, caso seja detectada uma situação em que dois veículos em sentido contrário, estejam na mesma faixa e espaçados de um valor menor que DD , significa, por definição, uma colisão prevista. Neste caso é necessário que aconteça uma manobra de evasão, isto é, um dos dois veículos deve mudar de faixa. Esta mudança de faixa deve ocorrer nos instantes seguintes e antes que o espaçamento fique menor do que DO , caracterizando a colisão frontal. Às vezes, entretanto, um veículo não consegue mudar de faixa e evitar a colisão porque o espaço livre necessário em pistas adjacentes fica ocupado durante os próximos intervalos. Isto pode inclusive acarretar situações de impasse ou bloqueio, também chamado *deadlock*, conforme pode ser visto no exemplo da Figura 22.

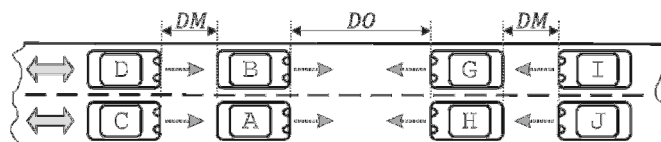


Figura 22 Exemplo de situação de *deadlock* em uma rodovia de pista simples causado por ultrapassagens simultâneas em direções opostas.

Situações de *deadlocks* não serão avaliadas neste trabalho e podem ser resolvidas da mesma forma que as colisões.

Semelhante à invasão de uma seção com proibição de ultrapassagem, um veículo ao entrar em uma seção com limitação de velocidade pode se deparar com a exigência de uma frenagem impossível. Entende-se que a mesma estratégia de recalculas as trajetórias pode ser usada, embora não esteja detalhado no algoritmo que será apresentado.

O algoritmo CTIH considera a ordem de prioridade das ultrapassagens dada pelo valor decrescente da distância longitudinal do veículo até o final do seu respectivo trajeto. Nesta ordem estão os veículos de ambas as faixas. Um exemplo pode ser visto na Figura 23.

5.2. Procedimento

O algoritmo proposto para o cálculo do GCTP é mostrado a seguir:

Algoritmo 1.0 CTIH

no tempo inicial $t=1$, determinar os valores para $P_{i,1}$ e $V_{i,1}$; assumir $FC_{l,i,t}=0$

WHILE $t \leq T$ **DO**

ordenar todos veículos i de acordo com a distância de $P_{i,t}$ até o final do segmento

FOR $i = 1$ **TO** I

FOR $i_2 = 1$ **TO** I : $i_2 \neq i$

IF (i e i_2 estão na mesma faixa, com sentidos opostos, e com espaçamento $< DO$) **THEN**

****colisão prevista****

determina i_0 que é último veículo, i ou i_2 , que entrou na faixa l que ocorre a colisão

determina t_0 que é o tempo $t-1$ quando o veículo i_0 entrou na faixa l que ocorre a colisão

determina l_0 que é a faixa que veículo i_0 se encontra no tempo t_0

$FC_{l_0,i_0,t_0} = 1$ (para evitar esta situação no futuro),

LOOP: zera todas as variáveis para $t > t_0$; reinicia para $t = t_0$

IF ($FC_{l+1,i_2,t+1} = 1$) **THEN** não pode seguir à direita

IF ($FC_{l-1,i_2,t+1} = 1$) **THEN** não pode seguir à esquerda

CASE i em pista preferencial **AND** tem espaço livre a frente **THEN** segue em frente

CASE i em pista não preferencial **AND** livre na faixa à direita **THEN** vai para a faixa à direita

CASE i em pista não preferencial **AND** livre na faixa à esquerda **THEN** vai para a faixa à esquerda

CASE i livre na faixa à direita **THEN** vai para a faixa à direita

CASE i livre na faixa à esquerda **THEN** vai para a faixa à esquerda

**** caso chegar a estas condições significa que o veículo necessariamente ficará obstruído ****

CASE i pode seguir em frente ou à direita **AND** ambas as faixas preferenciais

THEN vai para a faixa com maior espaço livre

CASE i pode seguir em frente ou à esquerda **AND** ambas as faixas preferenciais

THEN vai para a faixa com maior espaço livre

CASE i pode seguir em frente ou à direita **THEN** vai para a faixa com maior espaço livre

CASE i pode seguir em frente ou à esquerda **THEN** vai para a faixa com maior espaço livre

CASE i pode seguir em frente **THEN** segue em frente

CASE i pode seguir à direita **THEN** vai para a faixa à direita

CASE i pode seguir à esquerda **THEN** vai para a faixa à esquerda

ELSE i permanece na posição

$t = t + 1$

ENDWHILE

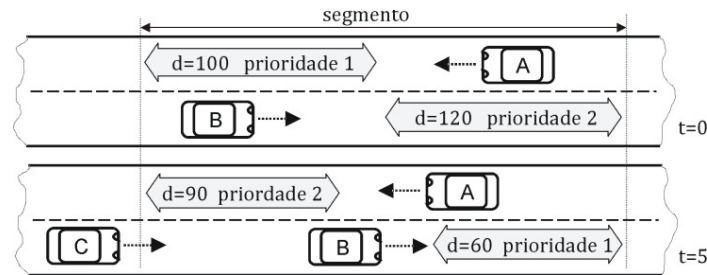


Figura 23 Exemplo de definição de prioridade dos veículos para eventuais ultrapassagens. O veículo A deixa de ter a maior prioridade em $t=5$, pois neste momento sua distância até o final do trecho é maior que a distância do veículo B.

Apesar de não detalhado neste procedimento entende-se que o veículo tenta desenvolver a sua velocidade desejada, porém limitada pelas equações (14), (15) e (16), especificadas no modelo MILP. Este cálculo depende da velocidade anterior e da capacidade de aceleração calculados pela inequação (11). A condição de seguir em frente está relacionada ao espaço livre mínimo estimado DD considerado tanto à frente na faixa que se encontra o veículo quanto à frente nas faixas adjacentes.

Assim como no modelo MILP, o tempo e deslocamento necessário entre faixas são desprezados por terem valores muito menores em comparação com o deslocamento longitudinal.

5.3. Conclusão

Neste capítulo foi proposto um algoritmo como alternativa de resposta mais rápida ao modelo MILP. Naturalmente, como o algoritmo é heurístico, o valor obtido de Z será menor ou igual ao ótimo real calculado pelo modelo MILP, como será visto no capítulo de testes.

O algoritmo adota a maioria dos parâmetros usados no modelo MILP. Foi necessário incluir um novo parâmetro referente ao tamanho do espaço livre necessário para um veículo decidir iniciar uma ultrapassagem. Este parâmetro é necessário, pois o algoritmo considera o cálculo simultâneo de todas as trajetórias e, portanto podem ocorrer situações de colisões frontais que devem ser evitadas. Caso ocorra uma colisão, o algoritmo deve recalculá-las de maneira que um dos veículos envolvidos decida por um trajeto diferente do anterior.

O algoritmo CTIH apresenta a vantagem de ser genérico para qualquer configuração de faixa (REGHELIN e ARRUDA, 2013). Pode-se dizer que é o resultado da evolução iniciada com modelos menores propostos para configurações específicas. Cronologicamente

foram construídos modelos: SPVP (*Single Predictive Velocity Profile*) para pista simples (REGHELIN e ARRUDA, 2012), DPVP (*Double predictive velocity profile*) para pista dupla (REGHELIN e ARRUDA, 2012d), SUPVP (*Suicide predictive velocity profile*) para pista simples dotada de faixa suicida (REGHELIN e ARRUDA, 2012c), e o algoritmo MPVP (*Multilane Predictive Velocity Profile*) para pista múltipla (REGHELIN e ARRUDA, 2012b).

6. AVALIAÇÃO MICROSCÓPICA DA EVOLUÇÃO DO TRÁFEGO

Neste capítulo serão propostos critérios (métricas) para avaliação, do ponto de vista microscópico, do desempenho de uma determinada evolução de tráfego. Porém inicialmente será discutido o problema de se ponderar entre objetivo de se ter um maior fluxo na pista e os objetivos individuais dos motoristas de reduzir o próprio tempo de viagem. Estes dois objetivos são muitas vezes conflitantes e devem ser considerados no cálculo de evolução de um tráfego.

6.1. Cenário realista otimizado

O modelo MILP proposto apresenta um problema na sua formulação por que os veículos com menor restrição de tráfego e/ou com maior velocidade desejada são privilegiados. Assim, dependendo do plano calculado, alguns veículos podem ter seu tempo de viagem sacrificado em prol de um maior fluxo na pista. Este comportamento não representa um cenário realista visto que nenhum motorista humano sabe como ajudar o fluxo. E mesmo que soubesse provavelmente não se sacrificaria voluntariamente por esta causa. Este problema deve ser relevante na implementação de um sistema de gerenciamento cooperativo, pois a não consideração da prioridade individual provavelmente não seria bem aceito pelos motoristas como um sistema "justo".

Como forma de resolver este impasse, este trabalho propõe o conceito denominado tempo de viagem mínimo teórico ou TVMT. O TVMT é calculado de forma dinâmica pela central de controle de tráfego, a cada intervalo de tempo, e atribuído individualmente ao veículo. A finalidade é determinar um valor de tempo de viagem individual que represente um senso de justiça aceitável para o motorista. O princípio de justiça pensado é que cada motorista devesse se contentar com o valor de seu TVMT, pois teoricamente não seria possível reduzi-lo, mesmo que abandonasse o GCTP e tentasse uma trajetória independente. O cálculo do TVMT é complexo, pois tenta avaliar o impacto do tempo de viagem de um veículo no tempo de viagem dos demais, considerando que todos os veículos tem o mesmo objetivo individual, que é o de buscar o menor tempo de viagem. O TVMT tem um valor de referência importante na otimização da evolução de tráfego. Significa que a evolução de um tráfego será melhorada sempre que pelo menos um veículo obtiver um tempo de viagem calculado menor que o seu respectivo TVMT. Nesta situação considera-se que haverá um ganho real não somente para o veículo, mas para o tráfego como um todo, visto que não

comprometerá o tempo de viagem dos demais. É importante lembrar que cada tempo de viagem é limitado por todas as velocidades desejadas individuais.

O TVMT pode ser considerado de uma forma equivalente. Por definição, denomina-se *distância mínima teórica* (TMD) a distância percorrida durante um TVMT. Estes TMDs podem ser considerados referências para o problema. Eles podem ser incorporados ao modelo MILP como novas restrições que garantem que a solução respeite o tempo de viagem individual mínimo teórico de cada veículo.

O problema de comprometimento de tempo de viagem calculado pelo modelo MILP não acontece quando calculado pelo algoritmo CTIH. O motivo é que o objetivo do algoritmo é buscar o máximo deslocamento de um veículo a cada instante, independentemente do impacto a ser causado no tráfego. Esta lógica é semelhante ao que aconteceria em um tráfego de motoristas humanos onde cada um tenta reduzir o tempo de viagem de forma não cooperativa. Portanto, do ponto de vista de cada motorista, o tempo de viagem individual calculado pelo algoritmo pode ser considerado mais justo do que o calculado pelo modelo MILP. Assim, como primeira abordagem para se calcular o TMD admite-se que este seja definido pelo algoritmo CTIH.

Pode-se propor então um novo cenário onde se busca maximizar Z , porém sem comprometimentos nos tempos de viagens individuais. Este cenário será denominado de *cenário realista otimizado*. O cálculo seguirá o mesmo do modelo MILP descrito na seção 4, porém incluindo-se as seguintes restrições:

$$P_{i,\hat{T}} \geq P_{i,1} + TMD_i \quad \forall i = 1, 2, \dots, I \quad (43)$$

Onde \hat{T} correspondem ao último intervalo de tempo t para quando TMD foi calculado. E TMD_i se refere à posição, calculada pelo algoritmo CTIH, correspondente ao veículo i . Esta restrição força que a posição final de um veículo seja no mínimo a mesma encontrada pelo algoritmo, independentemente de uma eventual nova trajetória.

As restrições (43) permanecem com valores fixos de TMD_i para o cálculo do GCTP até o tempo \hat{T} ou até que aconteça uma contingência no tráfego onde seja necessário recalcular as trajetórias.

Para este cenário a função objetivo permanece a mesma obtida pela equação (8). O resultado de Z calculado neste cenário realista otimizado será denominado Z_4 . A ideia do Z_4 é semelhante ao Z_2 , ou seja, encontrar a evolução ótima, porém neste caso respeitando os TVMT.

6.2. Fatores de avaliação microscópica do tráfego

Nesta seção são propostos três fatores para caracterizar uma evolução de um tráfego do ponto de vista microscópico, ou seja, considerando os veículos individualmente.

A eficiência do tráfego sob o ponto de vista macroscópico em uma rodovia é medida normalmente em veículos/hora. Entretanto não é aplicável para uma avaliação microscópica da evolução de tráfego onde é necessário considerar os veículos individualmente. Conforme proposto no capítulo 3, a eficiência de uma evolução considerando um determinado cenário é medida por Z . A ideia então é que os fatores a serem propostos representem relações dos Z calculados em diferentes cenários.

O primeiro fator proposto é denominado *Obstrução Microscópica do Tráfego* $OMT(T)$ e é dado pela seguinte equação:

$$OMT(T) = 1 - \frac{Z_2}{Z_1} \quad (44)$$

Onde Z_1 e Z_2 foram definidos na seção 4.3 e são os valores de Z calculados em cenários respectivamente: para um tráfego ideal (cada veículo considerado sozinho na pista) e para um tráfego com evolução ótima. O valor mínimo ($OMT(T) = 0$) ocorre quando, ao longo do período T , nenhuma obstrução acontece com os veículos do tráfego. O valor da complexidade aumenta à medida que os veículos ficam obstruídos uns pelos outros e assim não conseguem viajar tão longe quanto se estivessem sozinhos na rodovia.

Outro fator é denominado *Erro do Congestionamento Real* $RCE(T)$ e é dado pela seguinte equação:

$$RCE(T) = 1 - \frac{Z_g}{Z_2} \quad (45)$$

Onde Z_g é o valor de Z calculado pelo modelo proposto g a ser avaliado. O valor de $RCE(T)$ representa o quanto um determinado tráfego está congestionado em comparação com o tráfego ótimo calculado pelo modelo MILP (Z_2). Também pode representar a quantidade de tráfego que é perdido devido à falta de critérios para as ultrapassagens quando considerado por um modelo g .

O modelo MILP leva muito tempo para avaliar a evolução de tráfego com muitos veículos ou com muitos intervalos de tempo. Portanto nestes casos, onde Z_2 não está disponível, é proposto um novo fator denominado *Perda de tráfego Microscópico* $MTL(T)$. O valor de $MTL(T)$ é dado pela seguinte equação:

$$MTL(T) = 1 - \frac{Z_g}{Z_1} \quad (46)$$

Este fator representa a quantidade de tráfego que é perdido devido à falta de critérios para as ultrapassagens quando considerado por um modelo g e caso comparado à evolução de tráfego ideal.

6.3. Conclusão

Neste capítulo abordou-se a questão da inclusão do comportamento social dos motoristas na implantação de um sistema de gerenciamento totalmente automatizado. Baseando-se no fato de que no tráfego com motoristas humanos, cada um se preocupa apenas com o seu próprio tempo de viagem e não aceita facilmente se sacrificar em prol de um melhor fluxo, foi proposto o conceito de tempo de viagem mínimo teórico para cada motorista. O cálculo deste valor é baseado no conceito de Distância Teórica Mínima usada pelo algoritmo CTIH e ausente no modelo MILP. Foi proposta a inclusão no modelo MILP de uma nova restrição que modele esse comportamento a partir de valores de TMDs obtidos com o CTIH. Assim é possível calcular o que se define como tempo de viagem mínimo teórico, porém não se pode garantir que este tempo (limiar) represente um valor justo do ponto de vista do motorista. Este é um aspecto que merece ser estudado mais detalhadamente em trabalhos futuros.

Também foram propostos fatores que caracterizam uma evolução microscópica de tráfego. Estes fatores são úteis para se comparar diferentes evoluções para uma mesma situação de tráfego. Portanto, podem ser usados como métrica para se avaliar o desempenho de novos algoritmos a serem propostos. Novos algoritmos são necessários para se buscar resultados mais próximos ao do modelo MILP (REGHELIN e ARRUDA, 2013c).

No próximo capítulo, os fatores apresentados neste capítulo serão usados para avaliar as evoluções de tráfegos para várias configurações de faixas.

7. TESTES E ANÁLISE DE RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados os resultados de testes realizados em diversas situações de tráfego com a finalidade de verificar o desempenho do modelo, do algoritmo e dos fatores propostos. A metodologia usada será comparar o GCTP resultante do cálculo em quatro cenários conforme a seguir:

- Cenário Z_1 : evolução de tráfego ideal calculada pelo modelo MILP, ou seja, considerando um cenário hipotético onde cada veículo está sozinho na pista.
- Cenário Z_2 : evolução de tráfego calculada pelo modelo MILP.
- Cenário Z_3 : evolução de tráfego calculada pelo algoritmo CTIH.
- Cenário Z_4 : evolução de tráfego calculada pelo modelo MILP respeitando a distância percorrida mínima teórica (TMD).

Importante notar que o desempenho do GCTP não pode ser comparado com evoluções calculadas por simuladores de tráfego disponíveis no mercado pelos seguintes motivos:

- Os simuladores não tem o objetivo de otimizar o tempo de viagem, mas somente de reproduzir o comportamento típico dos motoristas.
- Os simuladores incluem aspectos subjetivos dos motoristas, como por exemplo, o desejo de reduzir a velocidade para apreciar a paisagem. Com isso, o desempenho do tráfego será sempre prejudicado.

O modelo MILP foi resolvido usando-se o software LINGO 11.0. As simulações do algoritmo CTIH foram implementadas usando-se o software MATLAB R2010B. Ambos foram executadas em um notebook Intel Core i3 2310M 2.1 GHz de frequência de *clock* e memória RAM de 4 GB.

Os testes foram separados em duas partes: comparações absolutas e comparações relativas.

7.1. Escolha de parâmetros

Os valores dos parâmetros usados nas simulações foram escolhidos baseados em valores reais do tráfego. A velocidade máxima dos veículos foi determinada em 32m/s (108km/h). A capacidade de aceleração de todos os veículos foi considerada igual. Esta foi considerada constante em relação à velocidade do veículo ($k = 1$). Foi adotado o valor de

5m/s² baseado na curva de aceleração da Figura 7. A máxima desaceleração permitida (AR) foi escolhida por tentativas em 30m/s² para se obter uma trajetória percebida como suave. A topografia do segmento de rodovia escolhido é uma reta plana com uma seção ($s = 1$) e sem restrição de ultrapassagem em toda a sua extensão ($U_{l_1, l_2, s} = 1$). Portanto foi desconsiderada a aceleração adicional ($AS_s = 0$) imposta ao veículo pela inclinação da pista. As dimensões de todos os veículos foram consideradas iguais e sem prejuízo para a solução do problema. Esta dimensão é considerada zero (semelhantemente ao exemplo da seção 3.7). Os espaçamentos entre os veículos foram considerados: $DM = 10\text{m}$; $DO = 50\text{m}$; $DR = 20\text{m}$; $DU = 30\text{m}$. A distância livre mínima estimada para uma ultrapassagem, usada pelo algoritmo, foi definida em 100m ($DD = 100\text{m}$), nos casos onde não foi variada. Também considerado $E = 6000$.

7.2. Testes com comparação absoluta

Na primeira parte dos testes foram comparados os resultados do algoritmo CTIH com os resultados ótimos fornecidos pelo modelo MILP. Este processo foi denominado de testes com comparação absoluta.

Os testes foram aplicados em uma pista de 600m ($DL_s = 600\text{m}$) com duas configurações de faixa: “dbu” (pista simples dotada de faixa suicida) e “du” pista simples. Para cada configuração foram geradas 3000 situações iniciais de tráfego e calculadas as evoluções nos quatro cenários: Z_1 , Z_2 , Z_3 e Z_4 .

Para se limitar o tempo computacional na execução dos testes foram considerados apenas 11 intervalos de tempo ($T = 11\text{s}$) com duração de 1 segundo ($Y = 1\text{s}$) cada. Cada situação de tráfego inicial possui 6 veículos, 3 em cada sentido da pista.

As posições e velocidades iniciais destes veículos foram geradas aleatoriamente e de forma a provocar situações de obstrução, o que exige decisão de ultrapassagem. A ideia foi posicionar inicialmente os veículos de forma que, em cada faixa, ficassem ordenados por velocidade. Os mais velozes ficaram atrás. Portanto ao longo do período estes necessariamente ficarão obstruídos pelos mais lentos. Outra medida foi separar inicialmente os dois grupos de veículos de cada faixa, ou seja, os primeiros veículos de cada fila sempre devem se cruzar durante a evolução. Considerando variáveis aleatórias A_n , variando entre zero e um, com distribuição normal, os valores da posição $P_{i,t}$, em metros, e velocidade $V_{i,t}$, em m/s, no tempo inicial $t = 1$, foram calculados conforme equações mostradas na Tabela 2.

Tabela 2 Equações geradoras das situações de tráfego iniciais para testes absolutos

$P_{3,1} = A_1 \times 80$	$V_{3,1} = A_7 \times 3 + 10$
$P_{2,1} = A_2 \times 80 + P_{3,1} + 15$	$V_{2,1} = A_8 \times 10 + V_{3,1} + 6$
$P_{1,1} = A_3 \times 80 + P_{2,1} + 15$	$V_{1,1} = A_9 \times 5 + V_{2,1} + 4$
$P_{4,1} = A_4 \times 80 + 260$	$V_{4,1} = A_{10} \times 3 + 10$
$P_{5,1} = A_5 \times 80 + P_{4,1} + 15$	$V_{5,1} = A_{11} \times 10 + V_{4,1} + 6$
$P_{6,1} = A_6 \times 80 + P_{5,1} + 15$	$V_{6,1} = A_{12} \times 5 + V_{5,1} + 4$

As velocidades desejadas para cada veículo foram consideradas constantes em todo o período e iguais às velocidades iniciais, ou seja, $WD_{i,t} = V_{i,1}$.

Os três veículos com sentido $r = 1$ foram alocados inicialmente na faixa mais à direita da pista e os outros três veículos, com sentido $r = 2$, na faixa mais à esquerda.

Esta disposição garante que haverá pelo menos uma trajetória factível, o que é necessário para a solução em caso de colisões previstas ou *deadlocks*. Como solução nestes casos, o algoritmo CTIH recalcula o GCTP regredindo no tempo até uma situação onde o tráfego possa evoluir de maneira menos eficiente, porém livre das colisões ou *deadlocks* previstas a priori. Nesta situação inicial, com duas filas em cada sentido, a pior evolução possível, mas factível, seria cada fila seguir até o final do seu respectivo trajeto, não ocorrendo nenhuma ultrapassagem.

Conforme mostrado no Lingo, o modelo demandou 1590 variáveis, sendo 648 binárias, e 2244 restrições para a configuração “du”. Para a configuração “dbu” foram 1590 variáveis, sendo 648 binárias, e 2178 restrições.

Resultados.

Os valores resultantes de todas as evoluções calculadas expressaram sempre a proporção esperada: $Z_1 \geq Z_2 \geq Z_3 \geq Z_4$. Também conforme esperado, além do cenário ideal Z_1 , em cada evolução calculada o melhor resultado veio de Z_2 (modelo MILP original). No entanto, muitas vezes, pelo menos um veículo teve seu tempo de viagem comprometido, o que não era desejado pela premissa do trabalho.

Um exemplo de evoluções de tráfego, referente aos cenários Z_2 , Z_3 e Z_4 , e calculados a partir de uma mesma situação inicial, pode ser visto na Figura 24. Na Figura 24a, a trajetória do veículo A deveria ser uma linha reta, porque não haveria razão para o veículo perder tempo. No entanto, a trajetória mostra uma evolução não desejada. O sacrifício do veículo A foi calculado pelo modelo MILP para permitir a ultrapassagem primeiro pelos veículos B e C e assim resultar em maior valor da distância total percorrida ($Z_2 = 1197\text{m}$). A evolução da Figura 24b calculada pelo algoritmo CTIH mostra um cenário possível onde todos tentam manter as respectivas velocidades desejadas, porém apresenta o pior resultado

global ($Z_4 = 1018\text{m}$). Por outro lado, a Figura 24c mostra uma melhor evolução ($Z_3 = 1106\text{m}$) e que mesmo assim assegura para cada veículo, pelo menos, o desempenho calculado pelo algoritmo CTIH na Figura 24b. É possível ver na Figura 24c que o resultado do cálculo faz o veículo F acelerar mais tarde, em comparação com os cálculos anteriores (Figura 24a e Figura 24b), de modo a otimizar as velocidades no momento da ultrapassagem. Importante notar que este atraso na aceleração inicial não compromete o tempo de viagem, pelo contrário. Como pode ser visto na Figura 24c, a inclusão de referências calculadas pelo algoritmo CTIH provou ser útil resultando em trajetórias mais realistas para todos os veículos, ou seja, nenhum veículo teve o tempo comprometido.

A inclusão das referências também causou a redução do tempo computacional. O tempo médio computacional do cenário Z_2 foi de 20,5s, para o cenário Z_3 foi de 1s para o cenário Z_4 foi de menos de um segundo.

Os testes também foram aplicados a configuração de faixa "du" que tiveram resultados equivalentes. Um exemplo de evolução pode ser visto na Figura 25, onde a mesma situação da Figura 24 foi calculada para uma configuração "du". A configuração "du" resultou uma média RCE(T) de 17,02% (Figura 26a) e a configuração "dbu" resultou em uma média RCE(T) de 8,0% (Figura 26b).

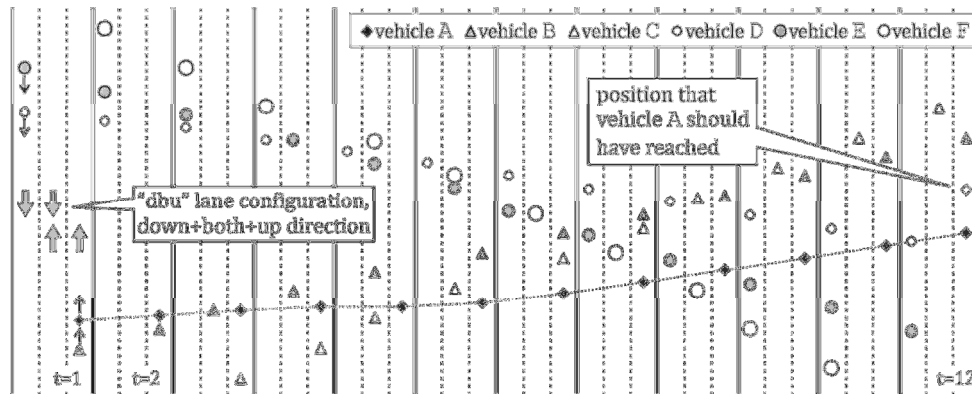
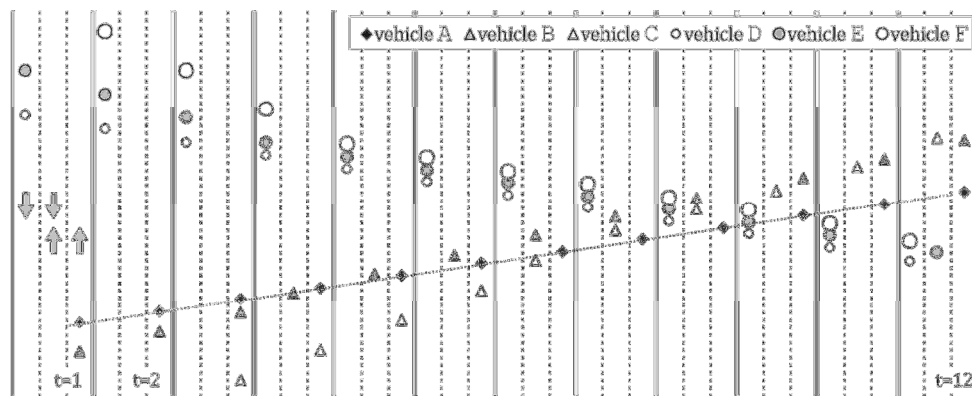
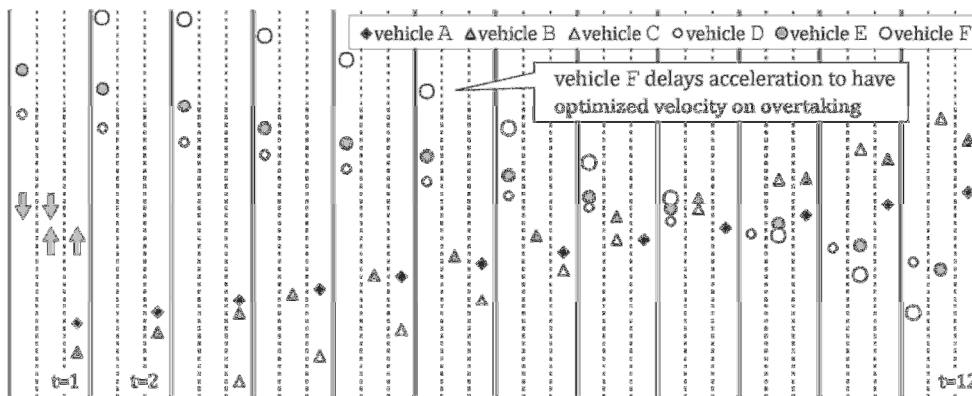
(a) Evolução de tráfego calculado pelo modelo MILP ($Z_2=1197m$).(b) Evolução de tráfego calculado pelo algoritmo CTIH ($Z_4=1018m$).(c) Evolução de tráfego calculado pelo modelo MILP usando referência s ($Z_3=1106m$).

Figura 24 Exemplos de evolução de tráfego calculados a partir da mesma situação inicial. Evolução ideal teria $Z_1=1254m$. $OMT(12)=4,5\%$. $RCE(12) = 15,0\%$

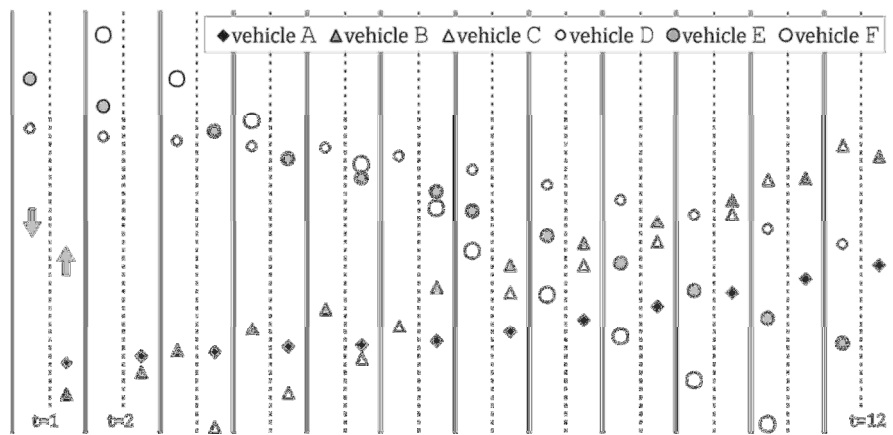
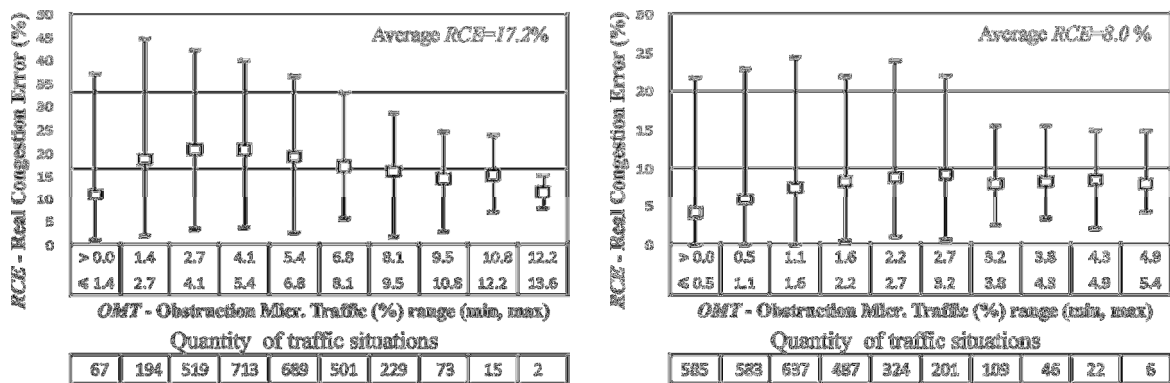


Figura 25 Exemplo da mesma situação de tráfego da Figura 24, mas considerando uma evolução calculado pelo modelo MILP para uma pista "du" ($Z_2 = 1141m$). OMT (12) = 9,0%. RCE (12) = 21,7%.

O desempenho de CTIH pode ser visto na Figura 26. Os 3.000 cenários ideais calculados foram classificados em faixas de acordo com o valor OMT (T). Considerando os valores médios em *boxplots*, é possível ver que os valores de RCE(T) começam a partir de um determinado valor e aumentam à medida que os valores de OMT(T) aumentam.



(a) Usando configuração de faixa “du”.

(b) Usando configuração de faixa “dbu”.

Figura 26 Desempenho do algoritmo CTIH após 3000 situações de tráfego aplicadas a duas configurações de faixa: (a) “du” e (b) “dbu”.

Depois de atingir um valor de limiar, a RCE(T) começa a diminuir até estabilizar em um determinado valor. O formato da curva pode ser explicado pela diminuição do número de possibilidades de melhoria nos valores mais altos e mais baixos de OMT(T). Valores mais baixos representam resultados de cálculos mais perto do melhor cálculo possível. O cálculo não pode ser muito melhor se as oportunidades de ultrapassagem são limitadas. No caso de valores de OMT(T) menores, há poucas oportunidades para ultrapassagem porque os veículos estão mais afastados uns dos outros. O fato dos veículos estarem mais afastados causa pouca obstrução e conseqüentemente menor OMT(T). No caso de valores de OMT(T) maiores, as oportunidades de ultrapassagem diminuem porque os veículos estão muito próximos entre si.

Comparando as duas performances da Figura 26, é possível concluir que o algoritmo CTIH é mais eficiente para calcular a evolução do tráfego em uma pista de três faixas “dbu”, do que para uma pista de duas faixas “du”. Ou seja, em média, uma evolução calculada para a pista de 3 faixas se aproxima mais de uma evolução ótima do que quando calculada para a de 2 faixas. Portanto pode-se dizer que quando o algoritmo CTIH calculou uma configuração “du” ele foi em média 53% (1-8,0/17,2) menos eficiente do que quando calculou uma configuração “dbu”.

Embora se busque um algoritmo mais eficiente possível, este trabalho se limitará a apenas apresentar o algoritmo CTIH como uma primeira proposta. Entretanto, para se avaliar a evolução do desenvolvimento, o algoritmo CTIH será comparado com outros algoritmos propostos anteriormente no início deste estudo, como pode ser visto na Tabela 3.

Tabela 3 Evolução dos algoritmos para cálculo de Z. O resultado corresponde ao valor médio de Z (em %) para as mesmas 3000 situações de tráfego aplicado em diferentes configurações de faixas. O algoritmo CTIH é menos eficiente quando comparado com os algoritmos SPVP e SUPVP. Os algoritmos para pistas com sentido único ilustram possíveis melhores desempenhos obtidos para este tipo de configuração.

Algoritmo	Finalidade	proposto em:	pista com dois sentidos		pista com sentido único	
			"du"	"dbu"	2 faixas	3 faixas
SPVP	exclusivo para pista simples	(REGHELIN e ARRUDA, 2012)	16,0			
DPVP	exclusivo para duas faixas no mesmo sentido	(REGHELIN e ARRUDA, 2012d)			6,9	
MPVP	pista com sentido único	(REGHELIN e ARRUDA, 2012b)			8,0	2,3
SUPVP	exclusivo para pista simples dotada de faixa suicida	(REGHELIN e ARRUDA, 2012c)	16,4	7,6		
CTIH	pista com qualquer configuração de faixa	(REGHELIN e ARRUDA, 2013)	17,2	8,0		

Conforme pode ser visto na Tabela 3, o algoritmo CTIH é menos eficiente quando comparado com os algoritmos SPVP (ver anexo A) (REGHELIN e ARRUDA, 2012), para pista simples, e SUPVP (REGHELIN e ARRUDA, 2012c), para pista simples dotada de pista suicida, ou seja, as trajetórias calculadas por ele se afastaram ainda mais do ótimo em relação aos demais algoritmos. Embora estes algoritmos não estejam apresentados nesta Tese, é possível consulta-los e concluir que o motivo é o uso de conjuntos diferentes de regras para movimentação individual do veículo. Por exemplo, nos algoritmos SPVP e SUPVP uma colisão é detectada somente por um veículo que está na faixa não preferencial. No caso do algoritmo CTIH, uma colisão é detectada por qualquer veículo em qualquer faixa. Com estas

diferenças de regras, algumas ultrapassagens serão concluídas em um caso mas não no outro, e portanto devem gerar trajetórias diferentes.

Também pode ser visto na tabela os algoritmos para pistas com sentido único: DPVP (ver anexo A) (REGHELIN e ARRUDA, 2012d) e MPVP (REGHELIN e ARRUDA, 2012b), apenas para ilustrar a provável maior eficiência ao se calcular um tráfego em um sentido único, visto que a complexidade do problema diminui. Com menor complexidade, existem menos combinações de trajetórias possíveis, ou seja, menor espaço de busca. Assim o resultado do modelo MILP não tem como ser tão superior ao do algoritmo heurístico.

7.3. Testes com comparação relativas

Considerando situações de tráfego com mais veículos e mais intervalos, o modelo MILP não pode ser utilizado e, conseqüentemente, não existe um valor ótimo para ser usado como referência absoluta. Por conseguinte, nesta parte de testes compara-se o desempenho de pistas com diferentes configurações de faixas, porém umas com as outras. Por este motivo esta segunda parte dos testes foi chamada de comparações relativas.

Foram geradas 400 situações de trânsito iniciais e calculadas as respectivas evoluções para uma pista reta e plana. Cada evolução teve a duração de 50 intervalos de tempo ($T = 50$) com duração de 1 segundo ($Y = 1s$) cada. Cada situação de tráfego inicial possui 40 veículos, 20 em cada sentido da pista. Outros parâmetros foram considerados iguais aos utilizados na primeira parte dos testes. Assim como na primeira parte dos testes, as posições e velocidades iniciais dos veículos foram geradas aleatoriamente e de forma a provocar situações de obstrução. Novamente a estratégia foi ordenar a fila de veículos em cada faixa conforme as velocidades e colocando os mais lentos à frente. Considerando n variáveis aleatórias A_n , variando entre zero e um, com distribuição normal, os valores da posição $P_{i,t}$, em metros, e velocidade $V_{i,t}$, em m/s, no tempo inicial $t = 1$, foram calculados conforme equações mostradas Tabela 4.

Tabela 4 Equações geradoras das situações de tráfego iniciais para testes relativos

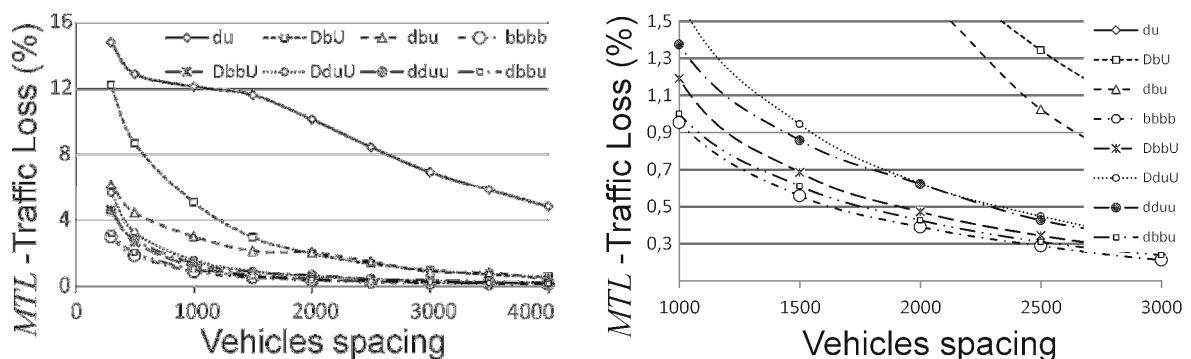
$P_{i,1} = A_i \times DL_S$	$V_{i,1} = A_{i+40} \times 22 + 9$
-----------------------------	------------------------------------

Considera-se que a seção de pista (DL_S) onde os veículos estão inicialmente posicionados está centralizada em um segmento de pista com comprimento de 6000m. Para testar o efeito do espaçamento dos veículos, todas as 400 situações foram repetidas para

diferentes comprimentos de seção (DL_s), variando entre 300 e 4000m. As velocidades desejadas para cada veículo foram consideradas constantes em todo o período e iguais às velocidades iniciais, ou seja, $WD_{i,t} = V_{i,1}$. Os 20 veículos com sentido $r = 1$ foram alocados inicialmente na faixa mais à direita da pista e os outros 20 veículos, com sentido $r = 2$, na faixa mais à esquerda. Esta disposição seguiu a estratégia da primeira parte que garante que não haverá *deadlocks* visto que o cálculo pode regressir até esta situação inicial.

Resultados.

Para todas as configurações, o algoritmo CTIH calculou o resultado em menos de 1s. Conforme esperado, as configurações que possuem mais faixas tiveram valores menores para o MTL. Os gráficos na Figura 27 apresentam a relação entre o espaçamento inicial entre os veículos e MTL. Para se gerar este gráfico, o comprimento do segmento da pista DL_1 foi variado para representar diferentes espaçamentos entre os veículos. De acordo com a Figura 27a, o MTL diminui para todas as configurações conforme aumenta o espaçamento entre os veículos. Isto é porque os veículos estão menos obstruídos e com mais espaço disponível. Consequentemente, eles podem viajar mais e ter mais oportunidades de ultrapassagem.



(a) Valor do MTL em função do espaçamento inicial dos veículos. (b) Detalhe da Figura 27a.

Figura 27 Relação entre espaçamento inicial de veículos e MTL para diferentes configurações de faixas.

Entre a configuração utilizando quatro faixas, o melhor desempenho de MTL foi da configuração "bbbb" (ver Figura 27b). Isso era esperado, visto que existem mais oportunidades de mudança de faixa que os outros. O pior desempenho foi da configuração menos flexível "DduU", que tem apenas duas faixas para ultrapassagem.

Em outro teste foi estudado a relação entre o espaçamento entre os veículos e a quantidade de colisões. Neste sentido foi gerado um gráfico, considerando várias configurações de faixa para um mesmo $DD=50$, como pode ser visto na Figura 28. Para cada configuração, o número de colisões aumenta conforme aumenta o espaçamento até atingir um

valor máximo, quando começar a diminuir. A configuração do "du" foi o único que atingiu valores acima de 100 colisões. Foi definida a estratégia para aumentar DD a 900 toda vez que o número de colisões atingisse o limite de 1000. Este número foi escolhido empiricamente. Três configurações exigiram este aumento: "du", com um valor máximo de 1065 colisões para $DD = 200$ e zero colisões para $DD = 900$, "dbu" com um valor máximo de 1.049 colisões para $DD = 200$ e 8 colisões para $DD = 900$, e "dduu" com um valor máximo de 1.015 colisões para $DD = 200$ e 10 colisões para $DD = 900$.

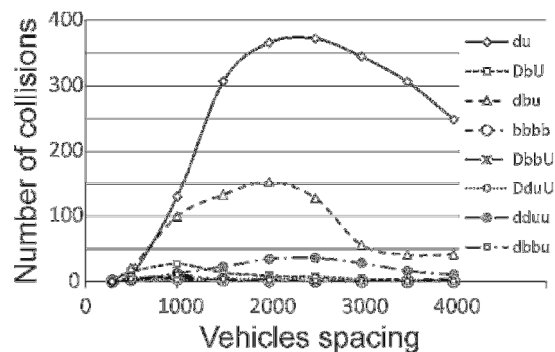
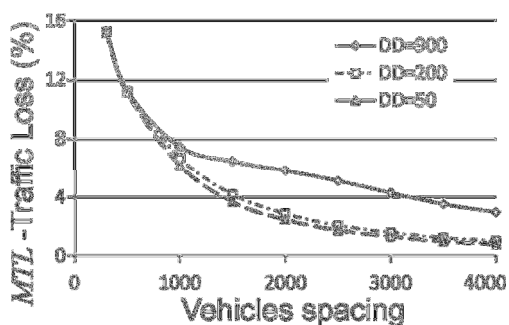
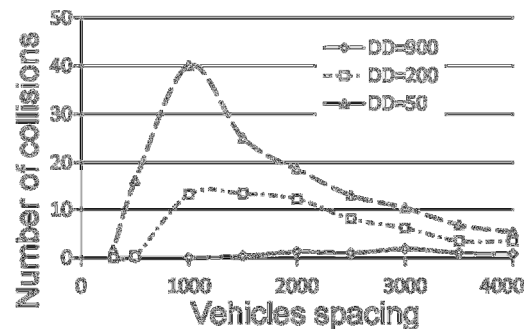


Figura 28 Relação entre quantidade de colisões e espaçamento de veículos considerando $DD=50$.

Em outro teste foi estudado a relação entre MTL e os espaçamentos entre os veículos. Neste sentido foi gerado um gráfico, considerando diferentes valores DD para uma mesma configuração de faixa "DbU", como pode ser visto na Figura 29. Considerando-se o mesmo valor para o espaçamento de veículos, é possível ver na Figura 29a que o valor de MTL diminui à medida que diminui o valor DD . Isso era esperado, pois com os valores mais baixos para o DD significa que os veículos tentam ultrapassar em mais oportunidades e, conseqüentemente, tem mais oportunidades de sucesso. Entretanto, este aumento de tentativas também acarreta maior quantidade de colisões como pode ser visto na Figura 29b.



(a) MTL em função do espaçamento.



(b) Qtd de colisões em função do espaçamento

Figura 29 Comparação entre MTL e quantidade de colisões em função de DD para uma pista com configuração "DbU".

7.4. Conclusão

Nesta seção foram apresentados alguns testes através de simulações para se avaliar o modelo MILP e o algoritmo CTIH. Os testes foram agrupados em duas partes. Na primeira parte foram calculadas evoluções de tráfego considerando um cenário reduzido, com 6 veículos em 11 intervalos. Assim foi possível executar o modelo MILP, obter resultados ótimos e fazer uma comparação absoluta dos resultados. Na segunda parte os cenários foram maiores, com 20 veículos e 50 intervalos. Como o modelo MILP leva muito tempo para fornecer resposta neste caso, não se obteve referências absolutas como foram obtidas na primeira parte dos testes. A análise de resultados focou então na comparação relativa entre as diversas configurações de faixa possíveis.

Os testes utilizaram valores de parâmetros baseados na realidade do tráfego. Entretanto, considerou-se uma simplificação significativa relacionada à aceleração individual dos veículos. Todas as capacidades de aceleração foram consideradas de forma constante, o que se afasta da realidade. Entretanto considerando que a mesma simplificação foi usada tanto no modelo quanto no algoritmo entende-se como válido uma comparação relativa dos resultados. É importante ressaltar que tanto o modelo como o algoritmo foram desenhados para reproduzir o efeito da curva de aceleração individual do veículo. Naturalmente, o comportamento da aceleração será melhor reproduzido quando mais níveis de discretos forem considerados. Esta estratégia pode ser usada no algoritmo CTIH sem grande impacto no tempo computacional. No caso do modelo MILP, a quantidades de níveis aumentam significativamente a complexidade e o tempo de resposta.

Os resultados do CTIH foram piores quando comparados com os algoritmos desenhados exclusivamente para pistas com 2 e 3 faixas. A média dos valores Z calculados pelo CTIH foi 5% maior para uma pista "dbu" e 6,95% maior para uma pista "du". Embora não estudado em detalhes, esta piora foi atribuída ao fato de se usar conjuntos diferentes de regras heurísticas para a movimentação individual do veículo, como por exemplo, se detectar o momento da colisão. Nos algoritmos SPVP e SUPVP uma colisão é detectada somente por um veículo que está na faixa não preferencial. No caso do algoritmo CTIH, uma colisão é detectada por qualquer veículo em qualquer faixa. O fato do CTIH ser menos eficiente que os algoritmos anteriores não é significativo, visto que pode ser adaptado com as mesmas regras anteriores. Entretanto não é foco do trabalho buscar o melhor desempenho do algoritmo heurístico, mas sim saber avaliar seu desempenho.

Foram apresentados testes relativos a configurações de faixa inéditas e não aplicadas aos motoristas humanas, como por exemplo, a configuração "bbbb". Esta configuração de faixa pode ser usada em qualquer sentido e sem preferência definida. Portanto pode-se imaginar que os motoristas humanos teriam dificuldade de usá-la por falta de regras. Apesar do risco aparente de ter que se lidar com um número grande de rotas de colisão, esta configuração resultou em uma eficiência muito boa conforme mostrado no gráfico da ver Figura 27b. Portanto conclui-se que para um futuro tráfego exclusivo de IVs existe potencial para se usar configurações de faixa diferentes das atuais usadas com motoristas humanos.

8. CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS FUTURAS

Este trabalho apresenta contribuições para área de ITS focada no gerenciamento centralizado microscópico de IVs. Também é relevante na área de planejamento de trajetória de multirrobo (REGHELIN e ARRUDA, 2014b).

A principal contribuição é a proposta de um modelo MILP que calcula uma solução otimizada para trajetórias de veículos inteligentes em rodovias com qualquer configuração de faixas. O cálculo dessas trajetórias pode ser usado para um novo tipo de gerenciamento de tráfego a ser usado em um tráfego exclusivo de IVs. Diferentemente do gerenciamento passivo aplicado em motoristas humanos, o gerenciamento proposto é ativo, pois orienta a movimentação individual de cada IV. Embora o sistema de gerenciamento proposto seja do tipo centralizado, considera-se uma hierarquia de controle de informações que possibilita ao IV responder de forma autônoma a uma contingência súbita.

Para a modelagem, foi necessário criar muitas variáveis inteiras para representar as diversas decisões alternativas de ultrapassagens. Por outro lado, foi necessária reduzir a complexidade através da discretização de algumas variáveis. As principais foram em relação ao tempo, deslocamento lateral do veículo e da capacidade de aceleração. Foi proposta uma métrica de avaliação da eficiência de evolução do tráfego, denominada distância total percorrida (Z). Após a realização de testes de simulação, a metodologia de modelagem mostrou-se promissora para a representação da dinâmica do tráfego e das características essenciais, tanto dos veículos como das pistas.

O tempo computacional médio do modelo MILP para um cenário com 6 veículos e 11 intervalos de tempo foi de 60s, o que naturalmente é excessivo para uma aplicação em tempo real. Como solução matemática para se obter respostas mais rápidas, este trabalho propôs um algoritmo heurístico específico para o problema. Os resultados obtidos em testes de simulação neste trabalho mostram que a formalização das heurísticas de operação de um sistema ativo de gerenciamento pode ser uma resposta inicial aceitável em termos de tempos computacionais. O algoritmo CTIH proposto consegue calcular em menos de 1s um GCTP com duração de 50s relativo a 40 veículos. Este tempo computacional do algoritmo é aceitável conforme o objetivo inicial do trabalho. Espera-se que o CCS leve aproximadamente 1s para receber os dados, calcular o GCPT e enviá-lo aos veículos.

A utilização do modelo MILP é restrita a cenários com poucos veículos e poucos intervalos de tempo, conforme valores citados acima. Entretanto sua aplicação tem utilidade na geração de soluções otimizadas que podem ser usadas como referência para avaliar a

eficiência de outras soluções, como as geradas por algoritmos heurísticos. Neste sentido, foram propostos três fatores para a avaliação microscópica da evolução de um tráfego.

Um conceito proposto é que o nível congestionamento é relativo pois depende da complexidade do tráfego. A ideia é que o tráfego não pode ser considerado congestionado caso não exista alternativa de evolução possível. Por outro lado, o tráfego seria considerado congestionado se deixasse de evoluir conforme a evolução otimizada calculada pelo modelo. Portanto, o primeiro fator proposto, denominado fator de Obstrução, representa o quanto o tráfego está congestionado. O segundo fator proposto, denominado Erro do Congestionamento Real, representa a eficiência relativa do tráfego em relação ao valor máximo possível. O terceiro fator, denominado Perda de tráfego, é semelhante ao último citado, porém é usado quando não é possível se obter uma referência com valor ótimo. Sua utilização é para comparar relativamente duas evoluções.

Com base nos fatores de avaliação propostos neste trabalho, foi testada a eficiência média das evoluções calculadas pelo CTIH. Considerando a escolha dos parâmetros, o resultado foi um valor Z de 17,2% para uma pista simples e 8% para uma pista simples dotada de uma terceira faixa (3 faixas).

Também foi discutido o problema de como balancear entre dois objetivos conflitantes: priorizar o aumentando de fluxo da pista e assim aumentar o somatório dos tempos de viagem individuais, ou priorizar os direitos individuais e assim respeitar o tempo dos veículos mais lentos como acontece no tráfego de motoristas humanos. Neste sentido foi proposto um novo conceito denominado TVMT que é um valor de referência atribuído dinamicamente pelo CCS a cada veículo. Quando um veículo entra na rodovia, o CCS calcula qual será seu tempo de viagem previsto, baseado na situação de tráfego naquele instante. Este valor é considerado como referência para o trajeto e garante que o seu tempo original previsto de viagem não será excedido, independentemente das futuras alterações das trajetórias feitas para se otimizar o fluxo. Ou seja, esta referência garante que cada veículo tenha seu respectivo tempo de viagem mínimo garantido independentemente de um ótimo global. Esta garantia acontece somente quando o GCTP é calculado pelo modelo MILP. Com este conceito pode-se dizer que uma evolução de tráfego será melhorada sempre que pelo menos um veículo tenha seu tempo de viagem calculado a menor que o seu respectivo TVMT. Como primeira abordagem para se calcular o TVMT foi proposto considerar o resultado do GCTP calculado pelo algoritmo CTIH.

Abaixo são apontados alguns pontos a serem desenvolvidos com a continuidade da pesquisa:

- O algoritmo CTIH tem o foco no comportamento dos motoristas e praticamente considera somente informações locais, exceto as previsões de colisão. Portanto existe a possibilidade de desenvolver um algoritmo que considere mais informações do sistema e assim traga melhor resultado. Uma ideia para este algoritmo é calcular a evolução de tráfego e então identificar o veículo que fica atrás de um pelotão e a respectiva quantidade de tempo perdida por este. Este tempo perdido equivale ao tempo máximo que ele pode ser retardado nos instantes anteriores sem comprometimento do tempo de viagem. Este retardamento pode beneficiar os veículos que estão aguardando para ultrapassá-lo.
- O critério de menor tempo de viagem deveria ser comparado com outros critérios para se concluir sobre o melhor desempenho do gerenciamento do tráfego. Pretende-se obter resultados de simulações usando o critério de economia de combustível (REGHELIN e ARRUDA, 2013b). Baseado nestes resultados pretende-se comparar com os resultados já obtidos e propor eventuais ajustes na função objetivo.
- Considerando uma seção do segmento de pista como sendo a mesma seção de outro segmento de pista, pode-se modelar um cruzamento de rodovias no mesmo nível, mas sem o auxílio de semáforos.
- Pretende-se também modelar e testar a necessidade de prioridade na passagem de veículos especiais. O nível de prioridade a ser destinado a estes veículos vai depender da regra de tráfego estipulado pelo gerenciamento e está interligado com o próximo item a seguir (REGHELIN e ARRUDA, 2013d), (REGHELIN e ARRUDA, 2014c).
- Pretende-se detalhar as formas possíveis de funcionamento de um sistema de gerenciamento de tráfego exclusivo de IVs. Algumas definições necessárias dependendo do tipo de participação, como (REGHELIN e ARRUDA, 2013e):
 - participação voluntária – necessário definição das vantagens individuais,
 - participação obrigatória – necessário definição das penalidades para os IVs que não seguirem o GCTP sugerido,
 - participação por regra de mercado de créditos – necessário definição do valor equivalente dos diferentes créditos gerados para cada decisão do tráfego.
- A arquitetura de gerenciamento de informação de controle sugerida inicialmente é a PATH. Porém pretende-se realizar um estudo comparativo das arquiteturas existentes a fim de melhor considerar a integração dos subsistemas. Cada subsistema é relativo a um segmento de rodovia.

Podem ser vislumbradas algumas extensões desde trabalho conforme listadas a seguir:

- O subsistema estudado se refere apenas ao deslocamento em um segmento de rodovia. Entretanto poderiam ser propostos novos subsistemas como, por exemplo, estacionamentos e cruzamentos com e sem semáforos. Estes subsistemas seriam conectados formando todo um sistema de tráfego e poderia se propor um sistema completo de gerenciamento de tráfego.
- No algoritmo proposto, existe a possibilidade de redução brusca de velocidade quando um veículo entra em uma seção de baixa velocidade ou encontra um veículo mais lento. Esta redução brusca não representa a realidade e caberia um estudo. Este problema não ocorre no modelo MILP, pois existe uma restrição específica na formulação.
- Algumas ultrapassagens são calculadas para iniciar antes do final do período T , porém não tem a conclusão garantida, pois os cálculos dos deslocamentos são interrompidos no tempo T . Isto acontece tanto para o modelo quanto para o SPVP. Este problema é uma falha na modelagem e merece atenção. Uma abordagem poderia simplesmente descartar estas ultrapassagens em detrimento do desempenho do tráfego.
- Seria interessante estudar os efeitos de escolha de diferentes parâmetros em relação ao desempenho do tráfego. Nesta linha poderia se experimentar a escolha de valores dinâmicos para o espaçamento entre os veículos.
- Poderiam ser estudado novos critérios de otimização (e a combinação destes) tais como: conforto dos passageiros (diminuindo picos de aceleração e frenagem), economia de combustível (e conseqüente redução de emissão de CO₂).
- No planejamento de uma rodovia destinada a um gerenciamento exclusivo de IVs, é possível dispor de várias configurações de pistas visto a flexibilidade dos IVs. Poderia ser proposto uma metodologia para definição destas configurações. A decisão principal deve residir na quantidade de pistas já que o sentido da pista pode ser dinamicamente alterado.

REFERÊNCIAS

- ALAMI, R. et al. Multi-robot cooperation in the MARTHA project. **IEEE Robotics and Automation Magazine**, v. 5, n. 1, p. 36-47, 1998.
- ALTHOFF, M. **Reachability Analysis and its Application to the Safety Assessment of Autonomous Cars**. Technische Universität München. Tese. 2010.
- ANDERSON, J. M. et al. **Autonomous Vehicle Technology - A Guide for Policymakers**. RAND - Transportation, Space, and Technology Program. Santa Monica, CA. 2014.
- ANDREWS, S. et al. **Integrated Active Transportation System Operational Vision and Implementation Research Plan, Final Report Task 2-3**. University of California, Berkeley, Transportation Sustainability Research Center, Institute of Transportation Studies and Cogenia Partners LLC. Berkeley, CA, p. 91. 2012.
- ASAMA, H.; OZAKI, K.; ITAKURA, H. **Collision avoidance among multiple mobile robots based on rules and communication**. Intelligent Robots and Systems '91. 'Intelligence for Mechanical Systems, Proceedings IROS '91. IEEE/RSJ International Workshop on. Osaka: . 1991. p. 1215-1220.
- BARCELÓ, J. Models, Traffic Models, Simulation, and Traffic Simulation. In: _____ **Fundamentals of Traffic Simulation**. New York: Springer, v. 145, 2010. p. 1-62.
- BASKAR, L. D. et al. Traffic control and intelligent vehicle highway systems: A survey. **IET Intelligent Transport Systems**, v. 5, p. 38-52, 2011.
- BELLINGHAM, J.; RICHARDS, A.; HOW, J. P. **Receding horizon control of autonomous aerial vehicles**. In Proceedings of the American Controls Conference. : . 2002. p. 3741-3746.
- BEMPORAD, A.; MORARI, M. Control of systems integrating logic, dynamics, and constraints. **Automatica**, v. 35, p. 407-427, 1999.
- BENDER, J. G. An overview of systems studies of automated highway systems. **Vehicular Technology, IEEE Transactions on**, v. 40, p. 82-99, 1991.
- BISHOP, R. A survey of intelligent vehicle applications worldwide. **Proceedings of the IEEE Intelligent Vehicles Symposium 2000 Cat No00TH8511**, p. 25-30, 2000.
- BTR. **Highway Capacity Manual 2000**. Transportation Research Board. . 2000.
- CANNY, J. F. **The Complexity of Robot Motion Planning**. [S.l.]: MIT Press, 1988.
- CARVALHO, C. H. R. **Emissões relativas de poluentes do transporte motorizado de passageiros nos grandes centros urbanos brasileiros**. Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada - IPEA. . 2011.
- CHEON, S. **An overview of automated highway systems and the social institutional challenges they face**. Technical Report UCTC No. 624, University of California, Berkeley, California. , p. . 2002. ().

- COLOMBO, A.; DEL VECCHIO, D. **Efficient Algorithms for Collision Avoidance at Intersections**. Proc. 15th ACM Int. Conf. on Hybrid Sys.: Computation and Control. New York: ACM. 2012. p. 145-154.
- CONGRESS, N. The Automated Highway System - An Idea Whose Time Has Come. **Public Roads**, v. 58-1, p. 1-7, 1994.
- CONSORTIUM, N. A. H. S. **Automated Highway System (AHS) System Objectives and Characteristics**. Troy: National Automated Highway System Consortium, 1995.
- CULLIGAN, K. F. **Online trajectory planning for UAVs using mixed integer linear programming**. Massachusetts Institute of Technology. Cambridge, p. 100. 2006.
- DESNOUAILLES, C.; COHEN, S. **Managed Lanes: A French project to Reduce Congestion on Motorway**. i2TERN conference in Aalborg Denmark. Aalborg Denmark: [s.n.]. 2007.
- DMV. www.dmvnv.com. **STATE OF Nevada - Department of Motor Vehicles**, 23 abr. 2012. Disponível em: <<http://www.dmvnv.com/autonomous.htm>>.
- FAGNANT, D. J.; KOCKELMAN, K. M. The travel and environmental implications of shared autonomous vehicles, using agent-based model scenarios. **Transportation Research Part C**, v. 40, p. 1-13, 2014.
- FAJARDO, D. et al. **Automated Intersection Control Performance of a Future Innovation Versus Current Traffic Signal Control**. Proceedings of the 90th Annual Meeting of the Transportation Research Board. Austin: [s.n.]. 2011.
- FEHON, K.; KLIM, T. Modeling Active Traffic Management with Paramics. **IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine**, 2010.
- FENTON, R. E. IVHS/AHS: Driving into the future. **IEEE Control Systems Magazine**, v. 14(6), p. 13-20, 1994.
- FERREIRA, M. et al. **Self-Organized Traffic Control**. Proceedings of the Seventh ACM International Workshop on VehiculAr InterNETworking. Chicago, IL: ACM. 2010. p. 85-90.
- FIERRO, R.; BRANCA, C.; SPLETZER, J. **On-line Optimization-based Coordination of multiple unmanned vehicles**. IEEE International Conference On Networking, Sensing and Control. Tucson, AZ: [s.n.]. 2005.
- GAREY, M. R.; JOHNSON, D. S. **Computers and Intractability: A Guide to the Theory of NP-Completeness**. : W. H. Freeman & Co., v. , 1979.
- GIPPS, P. G. A behavioral car following model for computer simulation. **Transportation Research**, v. B 15, p. 105-111, 1981.
- GOERZEN, C.; KONG, Z.; METTLER, B. A Survey of Motion Planning Algorithms from the Perspective of Autonomous UAV Guidance. **Journal of Intelligent & Robotic Systems**, v. 57, p. 65-100, 2010.
- GOLDBARG, M. C.; LUNA, H. P. L. **Otimização combinatória e programação linear: modelos e algoritmos**. . ed. : Campus, v. , 2000.
- GROSSMAN, D. D. Traffic control of multiple robot vehicles. **IEEE Transactions on Robotics and Automation**, v. 5, p. 491-497, 1988.

- HAFNER, M. R. et al. Cooperative Collision Avoidance at Intersections: Algorithms and Experiments. **Intelligent Transportation Systems, IEEE Transaction on**, v. 14, p. 1162 - 1175, 2013.
- HALLÉ, L. J.; CHAIB-DRAA, B. A decentralized approach to collaborative driving coordination. **In Proceedings of the 7th IEEE International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC'2004)**, 2004.
- HE, Q.; HEAD, K. L. Heuristic Algorithm for Priority Traffic Signal Control. **Journal of the Transportation Research Board**, Washington,DC, p. 1-7, 2011.
- HERNANDEZ, J. Z.; OSSOWSKI, S.; GARCIA-SERRANO, A. Multiagent architectures for intelligent traffic management systems. **Transportation Research Part C: Emerging Technologies**, v. 10, p. 473–506, 2002.
- JEONG, B. H.; RANDHAWA, S. U. A multi-attribute dispatching rule for automated guided vehicle systems. **International Journal of Production Research**, v. 39, n. 13, p. 2817-2832, 2001.
- JIN, Q. et al. **Advanced Intersection Management for Connected Vehicles Using a Multi-Agent Systems Approach**. 2012 Intelligent Vehicles Symposium. Alcalá de Henares: IEEE. 2012. p. 932 - 937.
- JURGEN, R. K.. Smart cars and highways go global. **IEEE Spectrum**, v. 28(5), p. 26-36, 1991.
- KALA, R. Multi-robot path planning using co-evolutionary genetic programming. **Expert Systems with Applications**, v. 39, n. 3, p. 3817-3831, 2012. ISSN 0957-4174.
- KAMAL, M. A. S. et al. Ecological Vehicle Control on Roads With Up-Down Slopes. **IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems**, v. 12, n. 3, p. 783-794, 2011.
- KATO, S.; NISHIYAMA, S.; TAKENO, J. **Coordinating mobile robots by applying traffic rules**. In Proceedings of the 1992 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Raleigh, NC: . 1992. p. 1535-1541.
- KIRSCHFINK, H. **Collective traffic control in motorways**. 11th EURO-mini Conference on Artificial Intelligence in Transportation Systems and Science and 7th EURO Working Group Meeting on Transportation. Tutorial on Intelligent Traffic Management Models. Helsinki: [s.n.]. 1999.
- KOCKELMAN, K.; FAGNANT, D. J. **Preparing a nation for autonomous vehicles opportunities, barriers and policy recommendations for capitalizing on self-driven vehicles**. 93rd Annual Meeting of the Transportation Research Board. Washington DC: [s.n.]. 2014.
- KOTUSEVSKI, G.; HAWICK, K. A. A Review of Traffic Simulation Software. **Computer**, p. 1-19, 2009.
- KOWSHIK, H.; CAVENEY, D.; KUMAR, P. R. Provable Systemwide Safety in Intelligent Intersections. **Vehicular Technology, IEEE Transactions on**, v. 60, p. 804-818, 2011.
- LATOMBE, J.-C. **Robot Motion Planning**. Norwell, MA, USA: Kluwer Academic Publishers, 1991.

- LAVALLE, S. M. **Planning Algorithms**. Cambridge, U.K.: Cambridge University Press, 2006.
- LE-ANH, T.; DE KOSTER, M. B. M. A review of design and control of automated guided vehicle systems. **European Journal of Operational Research**, v. 171, n. 1, p. 1-23, 2006.
- LEE, J.; PARK, B. Development and Evaluation of a Cooperative Vehicle Intersection Control Algorithm Under the Connected Vehicles. **Intelligent Transportation Systems, IEEE Transactions on**, v. 13, p. 81-90, 2012.
- LEVINSON, J. et al. **Towards Fully Autonomous Driving: Systems and Algorithms**. 2011 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV). : . 2011. p. 163-168.
- LITMAN, T. **Autonomous Vehicle Implementation Predictions - Implications for Transport Planning**. Victoria Transport Policy Institute. Victoria, BC. 2014.
- LOU, Y.; YIN, Y.; A., J. Optimal dynamic pricing strategies for high-occupancy/toll lanes. **Transportation Research Part C: Emerging Technologies**, v. 19, p. 64-74, 2011.
- LUMELSKY, V. J.; HARINARAYAN, K. R. Decentralized motion planning for multiple mobile robots: The cocktail party model. **Autonomous Robots**, v. 4, n. 1, p. 121-135, 1997.
- MARKOFF, J. New York Times, 9 out. 2010. Disponível em: <<http://www.nytimes.com/2010/10/10/science/10google.html>>. Acesso em: 30 maio 2012.
- NAGEL, K.; SCHRECKENBERG, M. A cellular automaton model for freeway traffic. **Journal de Physique**, p. 2221-2229, 1992.
- NEMHAUSER, G. L.; WOLSEY, L. A. **Integer and Combinatorial Optimization**. : Wiley, 1988.
- NHTSA. **Traffic Safety Facts**. U.S. Department of Transportation. Washington, DC, p. 6. 2012. (DOT HS 811 552).
- PAPAGEORGIOU, M.; KOTSIALOS, A. Freeway Ramp Metering: An Overview. **Intelligent Transportation Systems, IEEE Transactions on**, v. C, p. 271-281, 2002. ISSN 4.
- PARK, H. et al. **Integrated Traffic/Communication Simulation Evaluation Environment for IntelliDrive Applications Using SAE J2735**. 90th Annual Meeting of the Transportation Research Board. Washington, D.C: TRB. 2011.
- PARKER, L. E. Chapter 40. Multiple Mobile Robot Systems. **Springer Handbook of Robotics**, p. 921-941, 2008.
- PATZ, B. J. et al. A practical approach to robotic design for the DARPA Urban Challenge. **Journal of Field Robotics**, v. 25, p. 528-566, 2008.
- REGHELIN, R.; ARRUDA, L. V. R. **An optimization model for microscopic centralized traffic management of intelligent vehicles in a segment of a single lane**. In Proceedings of IEEE Intelligent Vehicles Symposium. Alcalá de Henares, Spain: IEEE. 2012. p. 908 - 913.
- REGHELIN, R.; ARRUDA, L. V. R. **A centralized traffic controller for intelligent vehicles in a segment of a multilane highway**. In Proceedings of IEEE Intelligent Vehicles Symposium. Alcalá de Henares: IEEE. 2012b. p. 135-140.

REGHELIN, R.; ARRUDA, L. V. R. **Using a centralized controller to optimize the traffic of intelligent vehicles in a single lane highway provided with a suicide lane.** In Proceedings of 15th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems - ITSC. Anchorage, Alaska, USA: [s.n.]. 2012c.

REGHELIN, R.; ARRUDA, L. V. R. **An optimization model for microscopic centralized traffic management of intelligent vehicles in a segment of a double lane highway.** In Proceedings of 19th ITS World Congress. Vienna, Austria: [s.n.]. 2012d.

REGHELIN, R.; ARRUDA, L. V. R. **An algorithm to calculate optimized coordinated trajectories of intelligent vehicles in a segment of road for any lane configuration.** Intelligent Vehicles Symposium (IV), 2013 IEEE. Gold Coast, QLD: IEEE. 2013. p. 250 - 255.

REGHELIN, R.; ARRUDA, L. V. R. **Optimized fuel consumption trajectories of intelligent vehicles in a segment of road for any lane configuration.** Intelligent Vehicles Symposium (IV), 2013 IEEE. Gold Coast, QLD: IEEE. 2013b. p. 876 - 881.

REGHELIN, R.; ARRUDA, L. V. R. **Evaluating algorithms to calculate trajectories of intelligent vehicles considering individual priority in single lane roads.** Intelligent Computer Communication and Processing (ICCP), 2013 IEEE International Conference on. Cluj-Napoca: IEEE. 2013c. p. 107 - 110.

REGHELIN, R.; ARRUDA, L. V. R. **An algorithm to calculate coordinated trajectories of intelligent vehicles in roads considering individual priority.** Intelligent Transportation Systems - (ITSC), 2013 16th International IEEE Conference on. The Hague: IEEE. 2013d. p. 1725 - 1730.

REGHELIN, R.; ARRUDA, L. V. R. **Concepts of traffic management system and participation policy for intelligent vehicles.** 20th ITS World Congress Tokyo 2013. Tokyo: [s.n.]. 2013e.

REGHELIN, R.; ARRUDA, L. V. R. **Optimizing travel time of intelligent vehicles in any highway configuration.** *Advances in Transportation Studies an International Journal*, v. 32A, p. 5-22, 2014. ISSN 1824-5463.

REGHELIN, R.; ARRUDA, L. V. R. **Optimizing coordinated motion planning for multiple car-like robots in a segment of highway.** *Robotica, (Cambridge. Print)*, Aceito, 2014b.

REGHELIN, R.; ARRUDA, L. V. R. **A methodology to deal with priority for intelligent vehicles in a segment of a single lane highway.** 21st World Congress on Intelligent Transport System. Detroit, MI: [s.n.]. 2014c. Aceito.

REIF, J.; SHARIR, M. **Motion planning in the presence of moving obstacles.** *Journal of the ACM*, v. 41, n. 4, p. 764-790, 1994.

RICHARDS, A.; HOW, J. P. **Model predictive control of vehicle maneuvers with guaranteed completion time and robust feasibility.** *Proceedings of the 2003 American Control Conference*, v. 5, p. 4034-4040, 2003.

RONZONI, D. et al. **AGV Global Localization Using Indistinguishable Artificial Landmarks.** Proceedings - IEEE International Conference on Robotics and Automation. Shanghai: IEEE. 2011. p. 287-292.

SCHOUWENAARS, T. et al. **Mixed integer programming for multi-vehicle path planning**. In European Control Conference. : . 2001. p. 2603-2608.

SPARMANN, J. M. **Active Traffic Management Experience made in Hessen**. Forum Proceedings on Reducing Traffic Congestion. [S.l.]: [s.n.]. 2007.

SRIVASTAVA, S. C. et al. Development of an intelligent agent-based AGV controller for a flexible manufacturing system. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 36, p. 780-797, 2008.

TC. **The Cost of Urban Congestion in Canada**. Transport Canada - Environmental Affairs. , p. 21. 2006.

TONGUZ, O. K. Biologically inspired solutions to fundamental transportation problems. **IEEE Communications Magazine**, v. 49, p. 106-115, 2011.

TSUGAWA, S. Automated Driving Systems: Common Ground of Automobiles and Robots. **I. J. Humanoid Robotics**, v. 8, p. 1-12, 2011.

URMSON, C. et al. Autonomous Driving in Traffic: Boss and the Urban Challenge. **AI Magazine**, v. 30, p. 17-29, 2009.

VARAIYA, P. Smart cars on smart roads: Problems of control. **IEEE Transactions on Automatic Control**, v. 38, p. 195-207, 1993.

VELENIS, E.; TSIOTRAS, P. **Optimal Velocity Profile Generation for Given Acceleration Limits- Theoretical Analysis**. Proceedings of the 2005 American Control Conference. : . 2005. p. 1478-1483 vol.2.

VIS, I. F. A. Survey of research in the design and control of automated guided vehicle systems. **European Journal of Operational Research**, 170, 2008. 677-709.

WANG, J. **Fully distributed traffic control strategies for many-AGV systems**. In Proceedings of the IEEE International Workshop on Intelligent Robots and Systems. Osaka: . 1991. p. 1199-1204.

YILMAZ, N. K.; EVANGELINOS, C.; LERMUSIAUX. Path Planning of Autonomous Underwater Vehicles for Adaptive Sampling. **IEEE Journal of Oceanic Engineering**, v. 33, p. 522-537, 2008.

YUTA, S.; PREMVUTI, S. **Coordinating Autonomous And Centralized Decision Making To Achieve Cooperative Behaviors Between Multiple Mobile Robots**. In Proceedings of the 1992 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent robots and systems. Raleigh, NC: . 1992. p. 1566-1574.

ZOHDY, I. H.; KAMALANATHSHARMA, R. K.; RAKHA, H. **Intersection management for autonomous vehicles using iCACC**. Proceedings IEEE Intelligent Transportation Systems (ITSC). Anchorage, Alaska, USA: IEEE. 2012. p. 1109 - 1114.

ANEXO A

Algoritmos SPVP e MPVP

O algoritmo SPVP (*Single Predictive Velocity Profile*) é proposto para se calcular o GCTP referente à evolução do tráfego em rodovias de pista simples (REGHELIN e ARRUDA, 2012) e pista simples dotada de pista suicida (REGHELIN e ARRUDA, 2012c). Para facilitar a explicação a seguir do algoritmo foram definidas a variável FSC e FSS conforme pode ser visto na Figura 30. O FSC para um veículo é o espaçamento na pista oposta medido da frente deste até o primeiro veículo vindo em sentido contrário. O FSS para um veículo é o espaçamento na pista oposta medido da frente deste até o primeiro veículo indo no mesmo sentido.

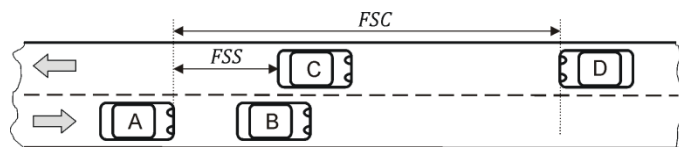


Figura 30 Representação das variáveis FSC e FSS (em relação ao veículo A) utilizadas pelo algoritmo SPVP.

O algoritmo proposto para o cálculo de GCPT é mostrado a seguir:

Algoritmo 2 – SPVP

Parâmetros:

$$l = 1,2$$

Variáveis:

$F(i, t)$ define se o veículo i efetuou uma ultrapassagem no tempo t , caso positivo o valor é um

WHILE $t \geq T$ **DO**

classifica veículos I de acordo com a posição $P(i, t)$

FOR $i = 1$ **TO** I

$s : DL_{l,s} \geq P(i, t - 1) < DL_{l,s+1}$ (determina a seção atual de i)

$V(i, t) = \min[WD_{l,i,s}; WP_{l,i,s}; V(i, t - 1) + AC_{l,i,s,k} + AS_{l,s}]$ (máx. velocidade possível)

$d = Y \times (V(i, t - 1) + V(i, t))/2$ (máximo deslocamento possível)

calcula DF (equação (58)), FSC e FSS

IF veículo i está na pista oposta **THEN** (veículo está ultrapassando)

IF $FSC \leq DO$ **OR**

veículo entrou em uma seção com ultrapassagem proibida ($UL_s = 0$) **THEN**

$t_0 = t_{init}(i)$; $F(i, t_0) = 1$; limpar todas as matrizes com índices $t > t_0$

LOOP (reinicia o loop principal a partir de t_0)

ELSE

IF veículo c pode retornar para a própria pista ($\geq DR$) **THEN**

$P(i, t) = P(i, t - 1) + d$; veículo i retorna para a pista original

ELSE

IF veículo i é obstruído pelo veículo i_2 ao longo de d **THEN** (fica atrás)

$P(i, t) = P(i_2, t) - DM$; $V(i, t) = \min[V(i_2, t); V(i, t - 1)]$

ELSE (continua ultrapassando)

$P(i, t) = P(i, t - 1) + d$

ELSE (veículo está na pista correta)

```

IF veículo  $i$  está obstruído pelo veículo  $i_3$  ao longo de  $d$  THEN
  IF  $FSC \geq DF$  AND  $FSS \geq DM$  AND
    ultrapassagem é permitida ao longo de  $(P(i, t) + DF)$  AND
    (distância para o último veículo que cruzou com  $i$ )  $\geq DU$  AND
     $F(i, t) = 0$  (nenhuma colisão anterior,...) THEN (ultrapassa)
      IF  $FSC \geq DF$  THEN
         $P(i, t) = P(i, t - 1) + d$ 
      ELSE
         $P(i, t) = P(i, t - 1) + \min[ d ; FSS ]$ 
        veículo  $i$  muda para a pista oposta ;  $t_{init}(i) = t$ 
      ELSE (fica atrás)
         $P(i, t) = P(i_3, t) - DM ; V(i, t) = \min[ V(i_3, t) ; V(i, t - 1) ]$ 
    ELSE
       $P(i, t) = P(i, t - 1) + d$  (continua ultrapassando)

```

O algoritmo MPVP (*Multilane Predictive Velocity Profile*) é proposto para se calcular o GCTP referente à evolução do tráfego em rodovias de pista múltipla (REGHELIN e ARRUDA, 2012b) com todos os veículos no mesmo sentido.

Os parâmetros são semelhantes ao algoritmo SPVP, exceto que o parâmetro DF é substituído pelo parâmetro DH e as variáveis FSC e FSS são substituídas pelas variáveis SAP , SAL , SAR , SBL e SBR . O parâmetro DH representa a distância à frente de cada veículo, ao longo da qual são considerados os obstáculos. Um obstáculo é definido como um veículo com velocidade zero, ou seja, nunca varia sua posição. Quando um obstáculo é detectado, o algoritmo interpreta como colisão iminente e recalcula a partir do momento que o veículo entrou na pista do obstáculo, porém desta vez evitando a troca para esta pista. As variáveis SAP , SAL e SAR determinam o espaçamento livre a frente, medido até o veículo imediatamente a frente. Estas determinam as três alternativas possíveis para o veículo: avançar a frente, trocar para pista superior ou trocar para a pista inferior. Um exemplo pode ser observado na Figura 31. As variáveis SBL e SBR determinam o espaçamento livre nas pistas adjacentes medido da frente do veículo até a frente do veículo que se aproxima nesta pista.

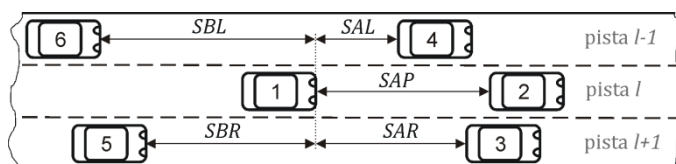


Figura 31 Representação das variáveis utilizadas pelo algoritmo MPVP.

O MPVP não tem problema de colisão frontal, mas da mesma forma que o SPVP, pode ocorrer a invasão de uma seção onde a ultrapassagem é proibida. O MPVP segue a

mesma estratégia do SPVP de recalcular os deslocamentos a partir do instante que a ultrapassagem iniciou. Quanto maior o valor de DH adotado, mais cedo o obstáculo é detectado e menor necessidade de se recalcular. A ordem de prioridade para uma ultrapassagem é determinado do mesmo modo que no algoritmo SPVP. Ou seja, a prioridade é maior quanto mais à frente o veículo estiver em relação ao final do segmento de rodovia considerado para o cálculo.

O algoritmo proposto para o cálculo do GCPT é mostrado a seguir:

Algoritmo 3 – MPVP

Variáveis:

$L(i, t)$ define a pista que o veículo i se encontra no tempo t

$F(i, l, t)$ define se o veículo i mudou para a pista l , no tempo t , o valor é um caso afirmativo

WHILE $t \geq T$ **DO**

classifica veículos I (de acordo com a posição $P(i, t)$)

FOR $i = 1$ **TO** I

$l = L(c, t - 1)$; $L(c, t) = l$ (determina pista atual de i)

$s : DL_{l,s} \geq P(i, t - 1) < DL_{l,s+1}$ (determina seção atual de i)

$k : WC_{l,i,s,k} \geq V(i, t - 1) < WC_{l,i,s,k+1}$ (determina faixa atual de i)

$V(i, t) = \min[WD_{l,i,s} ; WP_{l,i,s} ; V(i, t - 1) + AC_{l,i,s,k} + AS_{l,s}]$ (máx. velocidade possível)

$d = Y \times (V(i, t - 1) + V(i, t))/2$ (máximo deslocamento possível)

calcula SAP , SAL e SAR (descontando o espaçamento DM ou DR) e calcula SBL e SBR

identifica o veículo a frente na mesma pista i_2 , na pista superior i_1 e inferior i_3

$risco = 0$ (risco de colisão/infração)

IF veículo i entrou uma seção de ultrapassagem proibida ($UL_s = 0$) **OR**

($d + DH \leq SAP$ **AND** $V(i_2, t - 1) = 0$) **THEN** $risco = 1$ (detecta colisão/infração)

CASE $d + DH \leq SAR$ **AND** $F(i, l, t) = 0$ **AND** $SBR \geq DR$ **AND** $l > 1$ **AND** $risco = 1$ **THEN**

$P(i, t) = P(i, t - 1) + d$; $L(c, t) = L(c, t - 1) - 1$; $t_{init}(i) = t$ (avança pista sup.)

CASE $d + DH \leq SAL$ **AND** $F(i, l, t) = 0$ **AND** $SBL \geq DR$ **AND** $l < L$ **AND** $risco = 1$ **THEN**

$P(i, t) = P(i, t - 1) + d$; $L(c, t) = L(c, t - 1) + 1$; $t_{init}(i) = t$ (avança pista inferior)

CASE $risco = 1$ **THEN**

$t_0 = t_{init}(i)$; $F(i, l, t_0) = 1$; zera vetores com índice $t > t_0$; **LOOP** (reinicia de t_0)

CASE $d + DH \leq SAP$ **THEN**

$P(i, t) = P(i, t - 1) + d$ (avança na mesma pista)

CASE $d + DH \leq SAR$ **AND** $F(i, l, t)=0$ **AND** $SBR \geq DR$ **AND** $l > 1$ **THEN**

$P(i, t) = P(i, t - 1) + d$; $L(c, t) = L(c, t - 1) - 1$; $t_{init}(i) = t$ (avança pista sup.)

CASE $d + DH \leq SAL$ **AND** $F(i, l, t)=0$ **AND** $SBL \geq DR$ **AND** $l < L$ **THEN**

$P(i, t) = P(i, t - 1) + d$; $L(c, t) = L(c, t - 1) + 1$; $t_{init}(i) = t$ (avança pista inferior)

*** caso não tenha sido selecionado ainda deve reduzir velocidade e ficar atrás de outro veículo ***

CASE $SAP \geq SAR$ **AND** $SAP \geq SAL$ **THEN** (atrás na mesma pista)

$P(i, t) = P(i, t - 1) + SAP$; $V(i, t) = \min[V(i_2, t) ; V(i, t - 1)]$

CASE $SAL \geq SAP$ **AND** $SAL \geq SAR$ **AND** $F(i, l, t)=0$ **AND** $SBL \geq DR$ **AND** $l > 1$ **THEN**

$P(i, t) = P(i, t - 1) + SAL$; $L(c, t) = L(c, t - 1) - 1$

$V(i, t) = \min[V(i_1, t) ; V(i, t - 1)]$; $t_{init}(i) = t$ (atrás na pista superior)

CASE $SAR \geq SAP$ **AND** $SAR \geq SAL$ **AND** $F(i, l, t)=0$ **AND** $SBR \geq DR$ **AND** $l < L$ **THEN**

$P(i, t) = P(i, t - 1) + SAR$; $L(c, t) = L(c, t - 1) + 1$

$V(i, t) = \min[V(i_3, t) ; V(i, t - 1)]$; $t_{init}(i) = t$ (atrás na pista inferior)

CASE $SAP \geq 0$ **THEN** (atrás na mesma pista)

$P(i, t) = P(i, t - 1) + SAP$; $V(i, t) = \min[V(i_2, t) ; V(i, t - 1)]$

CASE $SAL \geq 0$ **AND** $F(i, l, t)=0$ **AND** $SBL \geq DR$ **AND** $l > 1$ **THEN**

$P(i, t) = P(i, t - 1) + SAL$; $L(c, t) = L(c, t - 1) - 1$

```

     $V(i, t) = \min[ V(i_1, t); V(i, t - 1) ]$ ;  $t\_init(i) = t$  (atrás na pista superior)
CASE  $SAR \geq 0$  ND  $F(i, l, t) = 0$  AND  $SBR \geq DR$  AND  $l < L$  THEN
     $P(i, t) = P(i, t - 1) + SAR$ ;  $L(c, t) = L(c, t - 1) + 1$ 
     $V(i, t) = \min[ V(i_3, t); V(i, t - 1) ]$ ;  $t\_init(i) = t$  (atrás na pista inferior)
ELSE
     $P(i, t) = P(i, t - 1)$ ;  $V(i, t) = 0$ 
     $t = t + 1$ 
END WHILE

```
