

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO E
TRANSPORTES

Felipe Caleffi

PROPOSIÇÃO DE UM MÉTODO DE HARMONIZAÇÃO DA VELOCIDADE
BASEADO EM MODELO DE PREVISÃO DE CONFLITOS VEICULARES

Porto Alegre

2018

Felipe Caleffi

**PROPOSIÇÃO DE UM MÉTODO DE HARMONIZAÇÃO DA VELOCIDADE
BASEADO EM MODELO DE PREVISÃO DE CONFLITOS VEICULARES**

Tese de Doutorado submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como requisito à obtenção do título de Doutor em Engenharia, área de concentração: Sistemas de Transportes.

Orientadora: Prof^a Helena Beatriz Bettella Cybis, Ph.D.

Porto Alegre

2018

Esta tese foi julgada adequada para a obtenção do título de DOUTOR EM ENGENHARIA e aprovada em sua forma final pelo Orientador e pela Banca Examinadora designada pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção.

Professora Helena Beatriz Bettella Cybis, Ph.D.
Orientadora

Banca Examinadora:

Professor Flávio José Craveiro Cunto, Ph.D.

DET/UFC

Professora Christine Tessele Nodari, Dra.

PPGEP/UFRGS

Professor Fernando Dutra Michel, Dr.

UFRGS

Porto Alegre

2018

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Estrutura geral da pesquisa	Erro! Indicador não definido.	5
Figura 2: Algoritmo de controle de harmonização da velocidade.....		20
Figura 3: Trecho em estudo.....		35
Figura 4: Imagem da Câmera 2		36
Figura 5: Relação fluxo-velocidade por faixa – km 96.		37
Figura 6: Perfis de acurácia, sensibilidade e especificidade, à medida que as variáveis são removidas, usando o índice vjB		46
Figura 7: Perfis de acurácia, sensibilidade e especificidade, à medida que as variáveis são removidas, usando o índice vjP		48
Figura 8: Relação fluxo-velocidade no km 96, para o mês de maio de 2013, com os quadrantes avaliados.....		58
Figura 9: Correlação dos limiares de TCC entre os conflitos simulados e os observados em campo....		65
Figura 10: Relações fluxo-velocidade do modelo calibrado e das observações de campo, para o km 96.....		67
Figura 11: Relação entre os conflitos simulados e observados em campo, para o km 94.....		70
Figura 12: Relação entre os conflitos simulados e observados em campo, para o km 92.....		71
Figura 13: Posicionamento dos pórticos e detectores no trecho modelado.....		74
Figura 14: Fluxograma do algoritmo de controle proposto.....		76
Figura 15: Perfis de volume modelados para o km 96, e Pórticos 1 e 2.		78
Figura 16: Regiões de Análise no software SSAM.....		79
Figura 17: Comparação dos perfis de velocidade média e do modelo CPM – Pórtico 1.		81
Figura 18: Perfil dos conflitos indicativos de colisão traseira ao longo do período de simulação, para o Pórtico 1.		84
Figura 19: Perfil dos conflitos indicativos de colisão por mudança de faixa ao longo do período de simulação, para o Pórtico 1.		85
Figura 20: Perfil do total de conflitos ao longo do período de simulação, para o Pórtico 1.		85
Figura 21: Relação entre o número de conflitos e o TTC para o Pórtico 1.....		86
Figura 22: Perfil da diferença de velocidade entre veículos para o tempo de colisão (TTC) mínimo, para o Pórtico 1.		87
Figura 23: Perfil da máxima desaceleração do veículo seguidor envolvido em um conflito, para o Pórtico 1.		88
Figura 24: Comparação dos perfis de velocidade média e do modelo CPM – Pórtico 3.		89
Figura 25: Relação entre o número de conflitos e o TTC para o Pórtico 3.....		91
Figura 26: Comprimento de fila máximo e total de paradas (Rampa km 94).....		92
Figura 27: Comprimento de fila máximo e total de paradas (Rampa km 92).....		92

Figura 28: Comparação das velocidades médias e do Modelo CPM entre os diferentes cenários de taxas de adesão.....	93
Figura 29: Comparação entre os cenários com diferentes taxas de adesão dos condutores.....	94

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Importância da variável, de acordo com a distância Bhattacharyya.....	45
Tabela 2: Desempenho médio da classificação usando o índice vjB no conjunto de teste, para números diferentes de variáveis retidas.	47
Tabela 3: Importância da variável, de acordo com o PCA.....	48
Tabela 4: Desempenho médio de classificação do LDA-PCA para a proporção de 80-20%.	49
Tabela 5: Desempenho de classificação no conjunto de teste para ambos os índices, quando 5 variáveis são mantidas.	49
Tabela 6. Análise de sensibilidade – ANOVA.....	62
Tabela 7. Parâmetros selecionados na análise de sensibilidade e seus valores empregados.....	63
Tabela 8. Valores de dos parâmetros default x calibrado.....	64
Tabela 9. Valores MAPE para os parâmetros default x calibrados.....	64
Tabela 10. Valores MAPE para as velocidades médias e fluxo total.....	66
Tabela 11. Valores de $MAPE_{Conflicts}$ para conflitos traseiros, conflitos de mudança de faixa e total de conflitos no km 94.....	69
Tabela 12: Desempenho dos cenários quanto ao modelo de conflitos, para o Pórtico 1.....	82
Tabela 13: Médias de velocidade no Pórtico 1, para o período em que o L.V.V. estava ativado.	83
Tabela 14: Síntese do número de conflitos registrados com o SSAM	84
Tabela 15: Desempenho dos cenários quanto ao modelo de conflitos, para o Pórtico 3.....	90
Tabela 16: Médias de velocidade no Pórtico 3, para o período em que o L.V.V. estava ativado.	90
Tabela 17: Síntese do número de conflitos registrados com o SSAM	91

SUMÁRIO

1. Introdução	11
1.1 Tema, objetivos e hipótese.....	13
1.1.1 Objetivo principal	13
1.1.2 Objetivos específicos	13
1.1.3 Hipótese	13
1.2 Justificativa e relevância	14
1.3 Estrutura de desenvolvimento da pesquisa	14
1.3.1 Etapas	15
2. Referencial teórico	17
2.1 Revisão conceitual sobre harmonização da velocidade	17
2.1.1 Algoritmos de controle e seus benefícios práticos.....	19
2.2 Limites de velocidade variável empregados para melhorar a segurança.....	22
2.3 Discussão	23
2.3.1 Como o L.V.V. é empregado para melhorar a segurança nas rodovias?..	25
2.3.2 Quais são os impactos de segurança do L.V.V. em rodovias?	29
2.4 Revisão de estudos sobre modelagem matemática de conflitos	32
3. Trecho em estudo e construção dos bancos de dados	35
3.1.1 Descrição da formação do banco de dados de conflitos	37
4. Modelagem matemática de conflitos	40
4.1 Processamento do banco de dados.....	40
4.2 Método para seleção de variáveis	41
4.3 Resultados e discussão.....	44
4.3.1 Seleção de variáveis usando a Distância Bhattacharyya.....	44
4.3.2 Seleção de variáveis usando PCA.....	47
4.4 Modelo de previsão de conflitos	50
5. Seleção e calibração do simulador de tráfego	52
5.1 Seleção do simulador	52
5.2 Revisão da literatura sobre calibração de conflitos em rodovias.....	53
5.3 Método proposto de calibração do VISSIM	56
5.4 Procedimentos de calibração do vissim	60
5.4.1 Análise de sensibilidade.....	61
5.4.2 Processos de calibração.....	63

5.4.3	Resultados da calibração.....	63
5.4.4	Transferibilidade dos modelos simulados.....	70
6.	Algoritmo de controle dos limites de velocidade variável proposto.....	73
7.	Resultados de simulação	78
7.1	Cenários modelados	79
7.2	Resultados para o pórtico 1 – km 94.....	80
7.2.1	Resultados oriundos do software SSAM	83
7.3	Resultados para o pórtico 3 – km 92.....	88
7.3.1	Resultados oriundos do software SSAM	90
7.4	Comprimento de fila e paradas nas rampas de acesso	92
7.5	Cenários com diferentes taxas de Adesão dos condutores.....	93
8.	Conclusão e recomendações	95
8.1	Conclusões a cerca da calibração.....	95
8.2	Conclusões a cerca do modelo de previsão de conflitos proposto.....	97
8.3	Conclusões a cerca das simulações.....	98
8.4	Recomendações para trabalhos futuros.....	98
	referencias bibliográficas.....	100
1.	Anexo I - Revisão sistemática de limites de velocidade variável empregados para melhorar a segurança.....	111

RESUMO

Técnicas como a harmonização da velocidade procuram gerir e controlar o tráfego com base nas condições de tráfego das rodovias em tempo real. A harmonização da velocidade utiliza limites de velocidade variáveis (L.V.V.) para fornecer aos condutores uma velocidade de operação mais apropriada, normalmente inferior ao limite de velocidade estático indicado, em resposta as condições dinâmicas das vias. O L.V.V. tem demonstrado capacidade de melhorar a mobilidade e a segurança nas rodovias. Com isso, modelos de avaliação de risco de colisão em tempo real são frequentemente adotados para quantificar os riscos de ocorrência de colisões em estudos de implantação do L.V.V. Na maioria dos estudos sobre L.V.V., modelos de probabilidade de colisão são adotados apenas para mensurar o desempenho do sistema. Estes algoritmos de controle de L.V.V. não levam em conta o risco de colisões em períodos futuros, e assim não usam impactos do L.V.V. para escolher o plano de controle com relação à segurança. No Brasil, estratégias de harmonização da velocidade não são empregadas. Como as condições de tráfego nas rodovias brasileiras não são homogêneas, e cada faixa de tráfego normalmente possui médias de velocidades, intensidades de fluxo e composições de tráfego diferentes, técnicas como o L.V.V. podem oferecer benefícios ao harmonizar as velocidades entre as faixas e assim retardar o aparecimento de congestionamentos, reduzir o número de ultrapassagens e o risco de colisões. Dessa forma, este trabalho busca avaliar a relação entre as características do tráfego e a probabilidade de ocorrer conflitos entre veículos, para assim desenvolver um modelo matemático capaz de expressar tal relação – usando como estudo de caso um trecho da rodovia BR-290/RS, situada na região metropolitana da cidade de Porto Alegre. Este modelo matemático alimenta um algoritmo L.V.V., empregado em um micro simulador de tráfego, para controlar o tráfego com o objetivo de aumentar a segurança. Resultados indicam que o modelo proposto classificou corretamente 87% dos conflitos efetivamente ocorridos em campo. Os resultados de simulação indicam que o emprego do sistema L.V.V. contribuiu significativamente para a redução da probabilidade de conflitos. Ainda, o L.V.V. aumentou as velocidades médias nos períodos de fluxo elevado, e também reduziu o desvio padrão das velocidades – oferecendo um tráfego mais homogêneo – que contribui para a redução do número de trocas de faixa e, conseqüentemente, para um aumento da segurança.

Palavras-chave: Limites de velocidade variável. Conflitos de tráfego. Segurança. VISSIM.

ABSTRACT

Techniques such as speed harmonization seek to manage and control traffic based on road traffic conditions in real time. Speed harmonization uses variable speed limits (VSL) to provide drivers with a more appropriate speed, usually below the stated static speed limit, in response to dynamic road conditions. The VSL has demonstrated its ability to improve mobility and road safety. Thus, real-time collision risk assessment models are often adopted to quantify the risk of collisions occurring in VSL implantation studies. In most VSL studies, collision probability models are utilized only to measure the system performance. These VSL control algorithms do not take into account the risk of collisions in future periods, and thus do not use the VSL impacts to choose the control plan concerning safety. In Brazil, Speed harmonization strategies are not employed yet. As the traffic conditions on Brazilian highways are not homogeneous, and each traffic range usually has different average speeds, flow intensities, and traffic compositions, VSL techniques can offer benefits by harmonizing speeds between lanes, slowing down congestion, reducing the number of overtaking and the risk of collisions. Thus, this work seeks to evaluate the relationship between traffic characteristics and the probability of conflicts between vehicles, in order to develop a mathematical model capable of expressing such a relation - using as a case the BR-290/RS freeway, located in the Porto Alegre metropolitan area. This mathematical model will then feed a VSL algorithm, employed in a micro traffic simulator, to control traffic and increase safety. Results indicate that the proposed model correctly classified 87% of the conflicts actually occurred in the field. The simulation results indicate that the VSL contributed significantly to reducing the conflicts likelihood. Even more, the VSL increased the average speeds for high flow periods, and also reduced the standard deviation of speeds - offering a more homogeneous traffic - which contributes for reduction in the number of lane changes and, consequently, to an increase in safety.

Keywords: Variable speed limits. Traffic conflicts. Safety. VISSIM.

1. INTRODUÇÃO

Técnicas de gestão de tráfego apoiadas por dados on-line e sistemas inteligentes têm sido empregadas em vários países para reduzir os impactos negativos do congestionamento nas rodovias. Através de sistemas integrados e respostas coordenadas, técnicas, como a harmonização da velocidade, procuram gerir e controlar o tráfego com base nas condições de tráfego das rodovias em tempo real. A harmonização da velocidade utiliza limites de velocidade variáveis (L.V.V.) para fornecer aos condutores uma velocidade de operação mais apropriada – inferior ao limite de velocidade estático indicado – em resposta a condições dinâmicas das vias. Os limites de velocidade podem ser reduzidos quando as condições da rodovia são inadequadas para viajar em altas velocidades, como em caso de mau tempo, ou quando há um incidente ou congestionamento em segmentos específicos (ABDEL-ATY; DILMORE; DHINDSA, 2006).

Os sistemas que empregam L.V.V. são projetados para reduzir as diferenças de velocidade entre os veículos. Esta redução acarreta *headways* mais regulares, e pode proporcionar tempos de viagem mais confiáveis e um aumento da capacidade. O emprego de L.V.V. pode suavizar a transição entre o fluxo a montante e a jusante, prevenir ondas de choque (*shockwaves*) ou adiar a ocorrência de congestionamentos. Implantações em campo e estudos de simulação computacional indicam que a homogeneidade das velocidades aumenta a segurança do tráfego, diminuindo o número de trocas de faixa e a taxa de colisão traseira (CHANG; PARK; PE, 2011; YANG; LU, 2014).

A segurança nas rodovias é um tema muito estudado na engenharia de transportes. Como as colisões são uma medida direta da segurança do tráfego, muitos estudos focalizam em encontrar uma relação entre características operacionais da rodovia e o risco de colisão. Modelos de previsão de colisões em tempo real são frequentemente usados para avaliar o risco de colisão com base em dados agregados de tráfego coletados a partir de detectores instalados no pavimento ou de câmeras de vigilância (LI *et al.*, 2014).

Frequentemente, estudos de simulação são empregados para avaliar impactos de uma futura implantação de L.V.V. Modelos de microsimulação de tráfego não são capazes de reproduzir acidentes ou colisões reais de veículos, e uma medida de segurança de tráfego substituta precisa ser proposta para avaliar as melhorias de segurança trazidas por sistemas L.V.V. em simulações computacionais. Por esse motivo, modelos de avaliação de risco de

colisões/conflitos, ou de probabilidade de colisão/conflito, são geralmente desenvolvidos para quantificar estas ocorrências (ABDEL-ATY *et al.*, 2008; ABDEL-ATY; DILMORE; DHINDSA, 2006; ALLABY; HELLINGA; BULLOCK, 2007; ISLAM *et al.*, 2013). Um conflito de tráfego é definido como um evento envolvendo a interseção de dois ou mais usuários da rodovia, onde um ou ambos os motoristas fazem manobras evasivas para evitar uma colisão (WILLIAMS, 1981).

Na maioria dos estudos sobre L.V.V., modelos de probabilidade de colisão são adotados apenas para mensurar o desempenho do sistema. Estes algoritmos de controle de L.V.V. não levam em conta o risco de colisões em períodos futuros. Portanto, tais algoritmos não usam impactos do L.V.V. para escolher o plano de controle com relação à segurança – planos de controle são normalmente empregados com o objetivo de reduzir o congestionamento. Apenas recentemente, foram propostos estudos com o objetivo de usar o L.V.V. com base em avaliações de segurança. Estes estudos visam aumentar a segurança nas rodovias de acordo com as informações relativas à segurança do tráfego em tempo real (FANG *et al.*, 2014).

No Brasil, estratégias de harmonização da velocidade não são empregadas. Particularidades do tráfego nas rodovias brasileiras fazem do país um bom candidato a receber estas estratégias. As condições de tráfego nas rodovias não são homogêneas, e cada faixa de tráfego normalmente possui médias de velocidades, intensidades de fluxo e composições de tráfego diferentes. Portanto, técnicas como o L.V.V. podem oferecer benefícios ao harmonizar as velocidades entre as faixas e assim retardar o aparecimento de congestionamentos e reduzir o número de ultrapassagens e o risco de colisões.

Com os altos níveis de congestionamento e heterogeneidade do tráfego entre faixas nas rodovias brasileiras, as ultrapassagens são frequentes e, nestas condições, muito perigosas. Portanto, o desenvolvimento de modelos destinados a prever a ocorrência de colisões tem potencial para ajudar a identificar condições de tráfego adversas, e a propor estratégias para aumentar a segurança.

Assim, se estabelece o campo para esta pesquisa: desenvolver um algoritmo de controle de L.V.V., alimentado por um modelo matemático capaz de prever a probabilidade da ocorrência de conflitos entre veículos, para controlar o tráfego com o objetivo de aumentar a segurança – usando como estudo de caso um trecho da rodovia BR-290/RS, situada na região metropolitana da cidade de Porto Alegre.

1.1 TEMA, OBJETIVOS E HIPÓTESE

O tema desta tese é a interface entre técnicas de gerenciamento de tráfego em tempo real – harmonização da velocidade – e modelos de previsão de conflitos entre veículos, analisando quantitativamente os potenciais benefícios que um sistema de L.V.V., alimentado com um modelo de previsão de conflitos, pode oferecer.

1.1.1 Objetivo principal

Propor um método de harmonização da velocidade – alimentado por um modelo matemático de probabilidade de conflitos – para melhorar a segurança de uma rodovia brasileira.

1.1.2 Objetivos específicos

Para atingir o objetivo principal desta tese, os seguintes objetivos específicos foram traçados:

- Avaliar a relação entre as características do tráfego e a probabilidade de ocorrer conflitos na rodovia em estudo, e desenvolver um modelo capaz de expressar tal relação;
- Avaliar a adequabilidade de um microssimulador para simular conflitos veiculares para as condições de tráfego do trecho em estudo
 - Propor um algoritmo de controle de L.V.V., alimentado pelo modelo de previsão de conflitos, para ser empregado no simulador de tráfego, para então realizar simulações com este algoritmo, a fim de avaliar os impactos desta técnica no trecho em estudo.

1.1.3 Hipótese

Os conflitos de tráfego podem ser utilizados para avaliar o potencial de ocorrer acidentes (colisões) entre veículos.

1.2 JUSTIFICATIVA E RELEVÂNCIA

A relevância desta tese tem origem nas particularidades do estudo de caso. Este estudo foca em um segmento que representa o comportamento de tráfego típico de uma rodovia brasileira de múltiplas faixas com rampas de acessos com elevado fluxo. O tráfego nestas rodovias apresenta um comportamento altamente heterogêneo devido a vários fatores: (i) diversidade da frota de veículos, (ii) limites de velocidade diferentes para classes de veículos leves e pesados, e (iii) agressividade dos condutores, que leva a um elevado número de trocas de faixa e ultrapassagens. Esses fatores geram diferentes desempenhos de tráfego entre as diversas vias da rodovia.

Outro fator relevante é o fato de não haver no Brasil estudos de microssimulação da técnica de L.V.V. aliada a um modelo de previsão de conflitos. Esta tese busca agregar questões de segurança (conflitos) em um algoritmo de controle L.V.V., e para tanto é necessário compreender melhor as ocorrências destes conflitos no contexto brasileiro, bem como investigar maneiras de incorporar nos modelos de controle os indicadores que representem o potencial de ocorrer conflitos de forma objetiva.

1.3 ESTRUTURA DE DESENVOLVIMENTO DA PESQUISA

O desenvolvimento do trabalho, a fim de atingir os objetivos propostos, está organizado em cinco etapas. A estrutura geral de desenvolvimento da pesquisa está resumida na Figura 1:

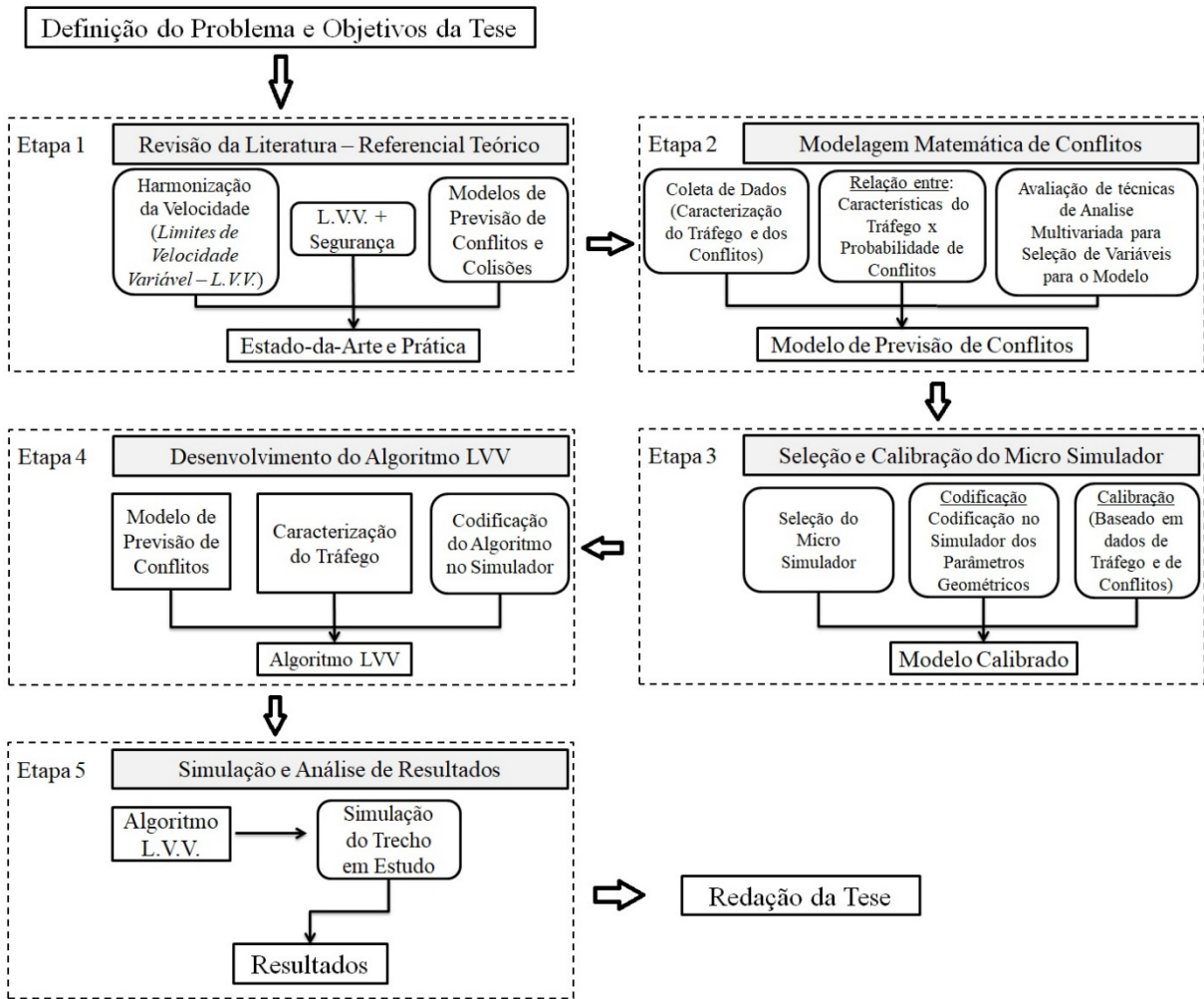


Figura 1: Estrutura geral da pesquisa.

1.3.1 Etapas

Etapa 1. Referencial Teórico – Revisão da Literatura

Esta etapa compreendeu a construção do referencial teórico acerca da técnica de harmonização da velocidade – apresentada no Capítulo 2. Também foi realizada nesta etapa uma revisão quanto aos modelos de previsão de conflitos e colisões entre veículos empregados na literatura com o objetivo de mensurar os benefícios relacionados à segurança de sistemas L.V.V. Nesta etapa, uma revisão sistemática de estudos que aplicam L.V.V. com o objetivo de melhorar a segurança foi realizada. Esta revisão sistemática é apresentada no Anexo I desta tese.

Etapa 2. Modelagem Matemática de Conflitos

A segunda etapa consistiu no desenvolvimento de um modelo de previsão de conflitos para o trecho em estudo. Para tanto, foram coletados dados para caracterizar o tráfego da rodovia – através de laços indutivos; bem como foram coletados dados de conflitos entre veículos – coletados através de câmeras de monitoramento. Técnicas de análise multivariada foram empregadas para seleção das variáveis que melhor explicam as ocorrências de conflito. O detalhamento desta metodologia está descrito no Capítulo 5 desta tese.

Etapa 3. Seleção e Calibração do Micro Simulador

Nesta etapa foi selecionado o micro simulador a ser utilizado para simulação. Após, o simulador foi codificado para receber os parâmetros geométricos e demais características do trecho em estudo. Com isso, o simulador pôde ser calibrado. A calibração foi validada com os dados coletados na Etapa 2. Detalhes do processo de calibração são apresentados no Capítulo 5 desta tese.

Etapa 4. Desenvolvimento do Algoritmo L.V.V.

Nesta etapa, o algoritmo responsável por controlar o sistema L.V.V. no simulador foi desenvolvido. Este algoritmo emprega dados da caracterização do tráfego, juntamente com o modelo de previsão de conflitos para determinar o limite de velocidade a ser empregado na rodovia em tempo real. Detalhes do desenvolvimento deste algoritmo de controle são apresentados no Capítulo 6 desta tese.

Etapa 5. Simulação e Análise de Resultados

Nesta etapa, foi realizada a simulação da estratégia de controle L.V.V. proposta, a fim de avaliar os impactos desta técnica no trecho em estudo. O Capítulo 7 apresenta os resultados de simulação, e o Capítulo 8 traz as conclusões acerca do trabalho e recomendações para trabalhos futuros.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

Este capítulo traz revisões conceituais sobre os temas abordados nesta tese. São eles: harmonização da velocidade; limites de velocidade variável empregados para melhorar a segurança; estudos sobre modelagem de conflitos.

2.1 REVISÃO CONCEITUAL SOBRE HARMONIZAÇÃO DA VELOCIDADE

A harmonização da velocidade é uma ferramenta de ITS (*intelligent transportation systems*) emergente, que busca reduzir congestionamentos e melhorar a eficiência das rodovias. Essa estratégia envolve reduzir gradualmente as velocidades antes de uma área fortemente congestionada, a fim de reduzir os impactos negativos causados por *breakdowns* e constantes trocas de faixas (MIRSHAHI *et al.*, 2007).

A harmonização da velocidade tem o potencial de suavizar o tráfego ao reduzir a variação das velocidades dos veículos, aumentar o número de veículos que uma rodovia pode suportar e melhorar a segurança, tornando mais fácil para os motoristas realizarem trocas de faixa quando necessário. Este sistema também tem o potencial de reduzir o número de colisões traseiras, causadas por motoristas que não freiam suficientemente cedo quando encontram veículos lentos ou parados a sua frente (LU; SHLADOVER, 2014).

Os sistemas de harmonização da velocidade usam limites de velocidade variável (L.V.V.) sobre cada faixa da rodovia para regular as velocidades continuamente, com base nas condições de tráfego existentes. Os limites de velocidade podem ser reduzidos quando as condições da rodovia são inadequadas para trafegar em altas velocidades, tais como durante mau tempo, quando há incidente ou congestionamento em segmentos específicos, a fim de reduzir a probabilidade de acidentes e facilitar uma maior fluidez do tráfego. A implementação do L.V.V. incentiva um comportamento de condução uniforme, resultando numa melhor distribuição do tráfego na rede e numa melhor utilização da infraestrutura rodoviária (SISIOPIKU; SULLIVAN; FADEL, 2009).

Um sistema de harmonização da velocidade consiste tipicamente de: um conjunto de sensores de tráfego para coletar dados sobre fluxos e velocidades da via, necessários para determinar as condições de tráfego; painéis de mensagem variável e; uma unidade central de processamento para executar ações de controle. Painéis de mensagem variável são usados para

informar os condutores das condições de tráfego e para mostrar os limites de velocidade impostos (LIN; KANG; CHANG, 2004).

Limites de velocidade variável devem ser implantados de tal forma que os motoristas possam ter o tempo adequado para ajustar a sua velocidade. Segundo estudo de Lee e Abdel-Aty (2008), realizado através de um simulador de condução, verificou-se que os motoristas não seguem os limites de velocidade variável e os painéis de mensagem variável quando estes recebem orientações com mudanças abruptas no limite de velocidade. No entanto, quando o limite de velocidade é alterado gradualmente, os motoristas são propensos a seguir as orientações dos painéis de mensagem e os limites de velocidade.

Os sistemas L.V.V. podem ser implementados de forma “obrigatória” ou “recomendada”. Sistemas L.V.V. recomendados apenas indicam aos usuários os novos limites de velocidade na rodovia. Já nos sistemas L.V.V. obrigatórios, os usuários são obrigados a manter a velocidade exibida nos painéis de mensagem variável, com infrações podendo ser passíveis de multa. Em ambos os casos, a eficácia do L.V.V. depende do nível de adesão dos condutores com o limite de velocidade imposto (NISSAN; KOUTSOPOULOS, 2011).

O estudo de Hellinga e Mandelzys (2011) avaliou os impactos que os níveis de adesão dos condutores com o limite de velocidade indicado têm nas condições operacionais e de segurança de sistemas L.V.V., através de modelos de simulação. Os resultados indicaram que os impactos do L.V.V. são muito sensíveis ao nível de adesão dos motoristas. A segurança mostrou-se correlacionada positivamente com o nível de adesão e o tempo de viagem mostrou-se negativamente correlacionado. Contudo, os autores apontam que a magnitude do impacto é fortemente influenciada pela estratégia de controle do L.V.V.

Os estudos de Hadiuzzaman *et al.* (2014) e Habtmichael e Santos (2013) também apontam que os benefícios do L.V.V. relacionados à mobilidade e segurança estão positivamente correlacionados com o aumento do nível de adesão dos condutores. Portanto, sistemas L.V.V. devem ser concebidos com mecanismos adequados de execução e fiscalização para se atingir o melhor rendimento do sistema.

O desenvolvimento e avaliação de algoritmos através da simulação – antes de testes de campo ser realizados – é sempre uma boa prática, porque testes de campo podem ser onerosos e produzir resultados inesperados e negativos para o tráfego. Diversos estudos apresentam e

analisam algoritmos de L.V.V. baseados em simulação. Estes estudos diferem quanto aos objetivos e a metodologia aplicada, porém, a grande maioria busca avaliar os impactos do L.V.V. na mobilidade e na segurança do tráfego (TALEBPOUR; MAHMASSANI; HAMDAR, 2013).

Como apontado por Lu e Shladover (2014), na última década, alguns algoritmos de controle de L.V.V. foram desenvolvidos para implantação prática com o objetivo de melhorar a segurança e a mobilidade. Na Europa, destacam-se países como o Reino Unido, Alemanha, França, Holanda e Suécia, onde sistemas L.V.V. são amplamente praticados. Diversos outros países europeus também fazem uso de L.V.V., como: Grécia, Dinamarca, Áustria, Finlândia, Itália, Croácia, Espanha e Bélgica. Entre os objetivos de implantação do sistema, está a redução dos congestionamentos, o aumento da segurança e da capacidade, redução de emissões, e melhorar a confiabilidade das viagens. Nos Estados Unidos, diversos estados já fazem uso desta estratégia, com os estados de Washington e Minnesota sendo os precursores. O objetivo principal do L.V.V. nos Estados Unidos é o de aumentar a segurança e maximizar a eficiência do tráfego.

2.1.1 Algoritmos de controle e seus benefícios práticos

As estratégias de controle usadas para determinar os limites de velocidade na operação da harmonização da velocidade são fundamentais para o sucesso do funcionamento do sistema. Estas estratégias são aplicadas através de um algoritmo que determina indicadores e limiares que acionam a harmonização da velocidade. Estes limiares podem ser baseados no fluxo, no nível de ocupação, na velocidade média ou na combinação destes três parâmetros. Através das informações provenientes de detectores é possível fazer o controle destas estratégias em tempo real, otimizando o processo. A ocupação é determinada pelo percentual de tempo que o contador de tráfego está ocupado. Maiores volumes de veículos e baixas velocidades contribuem para elevar a ocupação. O desempenho de sistemas L.V.V. é altamente dependente da lógica de controle empregada, juntamente com a localização destes detectores (LEE; HELLINGA; SACCOMANNO, 2004; NEZAMUDDIN *et al.*, 2011).

A literatura apresenta algoritmos que utilizam desde simples estratégias de fácil implantação, até algoritmos avançados com inúmeras regras. A Figura 2 apresenta um pequeno, mas representativo algoritmo que ilustra o uso das estratégias de controle frequentemente empregadas. Este algoritmo de controle é usado por Allaby, Hellinga e Bullock (2007) para um

estudo de caso de uma autoestrada próxima à cidade de Toronto, no Canadá. Este algoritmo usa limites de velocidade com decrementos de 20 km/h.

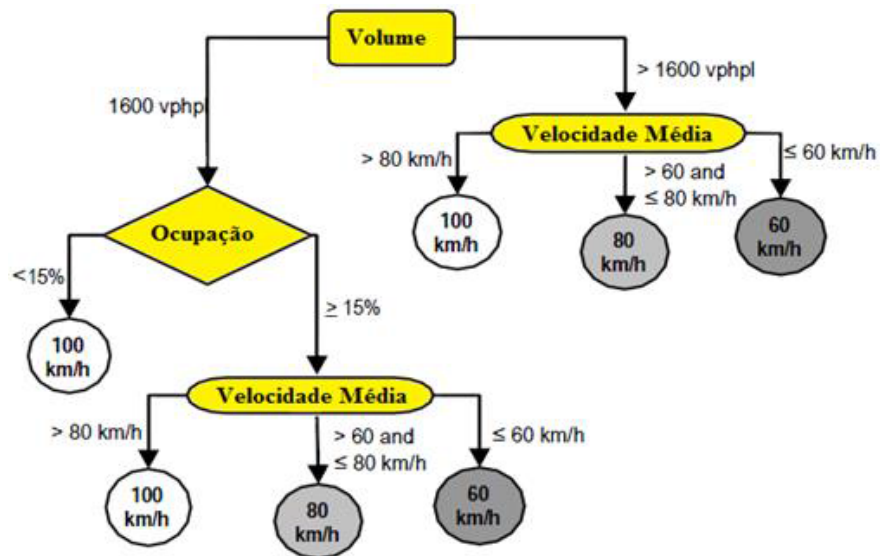


Figura 2: Algoritmo de controle de harmonização da velocidade (Allaby, Hellinga e Bullock, 2007)

Neste algoritmo, o limite de velocidade da via é de 100 km/h. Quando o algoritmo de controle detecta – através de dados realimentados em tempo real pelos detectores – um volume maior do que 1600 veículos por hora por faixa, ele passa a monitorar a velocidade média dos veículos e caso estas velocidades estejam menores do que 80 km/h, a harmonização da velocidade passa a ser empregada. Da mesma forma, se o volume for menor que 1600 veículos por hora por faixa, porém a ocupação da faixa for maior que 15%, o algoritmo de controle passa a monitor a velocidade média a fim de definir se é necessário o uso da harmonização da velocidade.

O uso de L.V.V. nas rodovias M25 e M4 na Inglaterra é amplamente conhecida e documentada (AGENCY, 2012; KIRK, 2007; MCCABE; RILEY, 2006). O sistema L.V.V. é ativado, modificado e desativado quando medidas de fluxo ou velocidade atingem limiares predeterminados. Ao detectar um volume de 1650 veículos por hora por faixa, os limites de velocidade reduzem para 60 mi/h, quando o limite da via é de 70 mi/h. Quando o volume atinge 2050 veículos por hora por faixa, os limites de velocidade reduzem para 50 mi/h. Avaliações da implantação do sistema apontam resultados positivos, como: (i) redução de incidentes; (ii) redução de trocas de faixa; (iii) redução do tempo de *breakdown*; (iv) aumento da fluidez do tráfego; (v) redução de acidentes com lesão em cerca de 10%; (vi) redução de acidentes com

apenas danos materiais em cerca de 30%; (vii) redução de emissões entre 2% a 8%; (viii) melhor uso das faixas e melhor distribuição de *headways*; e (ix) redução do stress dos motoristas. Houve também um aumento na aceitação dos usuários quanto ao sistema – 2/3 dos usuários gostariam que o L.V.V. fosse estendido para outras rodovias (AGENCY, 2012; KIRK, 2007; MCCABE; RILEY, 2006).

Na Alemanha e na Holanda, sistemas L.V.V. alteram os limites de velocidade baseados em relações pré-definidas de velocidade, fluxo e densidade. Os limites de velocidade variam de 120 a 60 km/h, usualmente com decréscimos de 20 km/h (PAPAGEORGIOU; KOSMATOPOULOS; PAPAMICHAIL, 2008). Avaliação realizada por Geistefeldt (2013) aponta que o uso da harmonização da velocidade nas rodovias da Alemanha leva a uma menor variação na capacidade da via e um menor risco de colapso no fluxo. Na Holanda, os principais benefícios reportados são: redução de 8% nas ondas de choque (*shockwaves*); aumento da qualidade do ar; aumento da mobilidade em 4%; redução de 7% a 18% na duração dos tempos de fila; redução observada quanto à emissões; e a segurança do tráfego aumentou significativamente com a redução de trocas de faixa e uma maior harmonização das velocidades (HOOGENDOORN *et al.*, 2013; STOELHORST; SCHREUDER; POLDERDIJK, 2011).

Na França, os limites de velocidade dos sistemas L.V.V. reduzem a partir do limite superior de 110 km/h. O controle é acionado quando o fluxo total da rodovia atinge 3.000 veículos por hora em rodovias de duas faixas. O acesso de caminhões e veículos pesados é proibido em algumas áreas durante as horas-pico. Resultados incluem aumento da segurança e um impacto positivo na distribuição do fluxo entre as faixas. Uma avaliação na rodovia A13 aponta os seguintes resultados: (i) aumento da velocidade média entre 4% e 10%; (ii) redução no número de gargalos ativos em 50%; (iii) redução do tempo de viagem; (iv) capacidade da rodovia ficou inalterada; (v) nível de serviço foi melhorado; e (vi) redução de 17% no número de colisões (EASYWAY, 2012).

Na Suécia, resultados de simulação indicam que os efeitos do sistema L.V.V. aumentam à medida que a taxa de adesão dos condutores (*compliance rate*) aumenta. As velocidades médias aumentam com o uso de L.V.V., e com uma taxa de cumprimento de 25% ou menor, L.V.V. não oferece nenhum efeito no tráfego (NISSAN, 2013). Outros benefícios do L.V.V. na Suécia incluem a redução do número de acidentes com morte (20%) e redução de acidentes com lesões (40%) (EWTC II, 2012).

Na Bélgica, o L.V.V. é empregado principalmente para aumentar a segurança e para harmonizar o fluxo de tráfego. Dados de velocidade e ocupação são usados para alimentar o algoritmo de controle L.V.V. Altas ocupações, juntamente com baixas velocidades médias, ativam o sistema. Os limites de velocidade podem variar de 120 a 50 km/h, com incrementos de 50 km/h. resultados indicam uma redução de 18% nos acidentes com lesões, e redução de 20% nas colisões traseiras (PAUW *et al.*, 2015). Na região da Catalunha, na Espanha, L.V.V. foi empregado com o objetivo de reduzir o impacto das emissões veiculares. L.V.V. demonstrou potencial para reduzir a poluição causada pelos veículos (BEL; ROSELL, 2013).

Nos Estados Unidos, destacam-se os impactos registrados no estado de Washington. Com a harmonização da velocidade, houve redução de 16% nas colisões e 30% nos ferimentos em colisões; além da redução do congestionamento e aumento da capacidade (BRINCKERHOFF; FARRADYNE, 2010). Na Interestadual 270, no estado do Missouri, os limites de velocidade variam entre 40 a 60 mi/h com incrementos de 5 mi/h. O efeito do L.V.V. sobre o desempenho do tráfego foi investigado em oito locais fortemente congestionados. Os resultados das análises indicaram que as mudanças no diagrama de fluxo-ocupação foram estatisticamente significativas em sete dos oito locais. Verificaram-se mudanças na ocupação crítica após a implantação do L.V.V. Ainda, a média de duração dos congestionamentos reduziram em 5 dos 8 locais (KIANFAR; EDARA; SUN, 2013). No estado de Minnesota, resultados da implantação do L.V.V. apontam para uma redução de 25% a 35% na variação das velocidades médias no pico da manhã, e um aumento de 7% no rendimento total para o pico da tarde (KWON *et al.*, 2007).

2.2 LIMITES DE VELOCIDADE VARIÁVEL EMPREGADOS PARA MELHORAR A SEGURANÇA

Na maioria dos estudos com L.V.V., modelos de probabilidade de colisão são adotados apenas como uma medida de desempenho do sistema. O algoritmo de controle L.V.V. não leva em conta o risco de colisões em períodos futuros. Portanto, esses algoritmos não usam os impactos dos sistemas L.V.V. para escolher o plano de controle baseado em parâmetros ligados à segurança. Usualmente, estes sistemas buscam apenas melhorar o fluxo do tráfego, e fazem uso de modelos de probabilidade de colisão somente como uma forma de avaliação posterior da estratégia (ABDEL-ATY; DILMORE; DHINDSA, 2006; FANG *et al.*, 2014).

Recentemente, estudos foram propostos com o objetivo de usar o L.V.V. com base em avaliações de segurança, como (FANG et al., 2014). Estes estudos visam aumentar a segurança nas rodovias de acordo com as informações relativas à segurança do tráfego em tempo real. Através destes estudos é possível determinar o estado da arte e prática sobre como o L.V.V. é implantado para melhorar a segurança e quais são os impactos desses sistemas.

Dessa forma, foi realizada uma revisão sistemática com o objetivo de mapear e descrever estudos que empregaram L.V.V. para aumentar a segurança em rodovias. Essa revisão permitiu elencar e caracterizar as variáveis de tráfego que melhor descrevem os eventos relacionados às questões de segurança em uma rodovia.

Os resultados da Revisão Sistemática são apresentados nesta seção, e a versão completa é apresentada no Anexo I desta tese.

2.3 DISCUSSÃO

Esta seção analisa e discute os conteúdos e características dos 22 estudos selecionados nesta revisão sistemática.

A revisão mostrou tanto os estudos que aplicam modelos de previsão de colisões como entrada para sistemas L.V.V., e estudos que empregaram apenas os impactos de segurança como uma ferramenta para avaliar a eficácia dos sistemas L.V.V. após a sua implementação. A análise evidenciou que o L.V.V. traz resultados positivos quanto à segurança em ambos os casos. Através dos modelos e sistemas discutidos, os resultados sempre apontam para o L.V.V. harmonizando o fluxo de tráfego e reduzindo conflitos e acidentes, aumentando assim a segurança.

Enquanto alguns estudos apresentam novos modelos matemáticos para abordar a segurança, outros aplicam modelos de segurança apresentados em pesquisas anteriores. Alguns destes trabalhos são baseados no modelo apresentado por Lee, Hellinga e Saccomanno (2003), e servem como precursor de potenciais de colisão. Este modelo aplica características de fluxo de tráfego para explicar os efeitos do desempenho do tráfego na ocorrência de acidentes, refletida por “precursores de colisão”. Precursores de colisão são condições de tráfego existentes antes da ocorrência de colisões. O modelo expressa a frequência de colisão em função de uma variedade de características ambientais e de tráfego, como segue:

$$\text{Crash frequency} = f(\text{crash precursors, external control factors, exposure}) \quad (1)$$

Através desta relação funcional, o modelo de simulação é calibrado usando dados reais de colisão e os efeitos de precursores de colisão no potencial de colisão podem ser examinados. Os precursores usados para representar as condições de fluxo de tráfego antes da ocorrência de colisão são: (i) variação média de velocidade em cada pista (CVS1); (ii) variação média da diferença de velocidade entre pistas adjacentes (CVS2) – para avaliar mudanças de faixa; e (iii) densidade de tráfego (D). A variação das velocidades é medida pelo coeficiente de variação da velocidade (CVS) (= desvio padrão da velocidade / velocidade média) calculado ao longo do tempo de duração da observação. A expressão matemática destes três precursores está descrita em (LEE; SACCOMANNO; HELLINGA, 2002). Se houver uma velocidade significativamente menor a jusante, os motoristas devem reagir prontamente para ajustar sua velocidade. Estas condições são susceptíveis para aumentar o potencial de colisão.

Lee, Hellinga e Saccomanno (2003) também desenvolveram um modelo log-linear agregado para analisar os efeitos de precursores de colisão e fatores externos no potencial de colisão. Este modelo permite investigar a natureza da relação entre os precursores selecionados e a frequência de colisões ajustada pelo nível de exposição adequado. Assim, a taxa de colisão pode ser descrita da seguinte forma:

$$\text{Crash Rate} = \frac{F}{EXP^\beta} = f(\theta \cdot \lambda_{CVS(i)} \cdot \lambda_{D(j)} \cdot \lambda_{Q(k)} \cdot \lambda_{R(l)} \cdot \lambda_{P(m)}) \quad (2)$$

Onde: F é o número esperado de colisões durante o período de análise; EXP é a exposição em veículos-quilômetro de viagem; β é o parâmetro de exposição; θ é uma constante; $\lambda_{CVS(i)}$ é o efeito da variável precursora de colisão CVS (variação média da velocidade) com i níveis; $\lambda_{D(j)}$ é o efeito da variável precursora D com j níveis; $\lambda_{Q(k)}$ é o efeito da variável precursora de colisão Q com k níveis; $\lambda_{R(l)}$ é o efeito da geometria da rodovia com l níveis; $\lambda_{P(m)}$ é o efeito da hora do dia com m níveis.

As seções seguintes (4.3.1 e 4.3.2) apresentam os resultados da revisão sistemática quanto às duas questões de pesquisa, visando avaliar com o L.V.V. é empregado para melhorar a segurança. Os sistemas L.V.V. propostos nos trabalhos analisados são apresentados e as características dos modelos empregados para avaliar os impactos de segurança são descritos. Destaca-se que dos 22 estudos a serem discutidos, apenas o estudo de Saha e Young (2014) não emprega simulação.

2.3.1 Como o L.V.V. é empregado para melhorar a segurança nas rodovias?

Para todos os trabalhos, a rede em estudo é segmentada em diferentes seções, geralmente delimitadas pela posição dos contadores de tráfego (laços indutivos). Os pódicos e os sinais de mensagem utilizados para exibir os limites de velocidade são geralmente posicionados no mesmo lugar que os contadores. A ativação do sistema L.V.V. é controlada por dados de tráfego em tempo real e o período de tempo de uso da estratégia é fixo (Abdel-Aty, Dilmore e Dhindsa (2006), Abdel-Aty, Cunningham, Gayah e Hsia (2008), Jiang, Liu, Li e Wan (2011), Lee, Hellinga e Saccomanno (2004), Lee, Hellinga e Saccomanno (2006), Li, Liu e Wang (2014), Pham e Dumont (2011) e Yu e Abdel-Aty (2014)) ou variável (Fang, Hadiuzzaman, Karim, Luo e Qiu (2014)); A duração da intervenção (ou período de utilização) representa o período em que a intervenção está em vigor, bem como a frequência do período de decisão.

O sistema L.V.V. pode ser implantado no “espaço” (Abdel-Aty, Dilmore e Dhindsa (2006), Abdel-Aty, Cunningham, Gayah e Hsia (2008), Fang, Hadiuzzaman, Karim, Luo e Qiu (2014), Jiang, Liu, Li e Wan (2011), Lee, Hellinga e Saccomanno (2004), Lee, Hellinga e Saccomanno (2006), Li, Liu e Wang (2014), Pham e Dumont (2011) e Yu e Abdel-Aty (2014)) ou no “tempo” (Fang, Hadiuzzaman, Karim, Luo e Qiu (2014) e Li, Liu e Wang (2014)) em torno da área de um gargalo; “Tempo” de implantação corresponde a reduzir gradualmente os limites de velocidade até que a velocidade alvo seja alcançada de modo a evitar a queda abrupta da velocidade; A distribuição no “espacial” corresponde a reduzir gradualmente as velocidades ao longo das seções, até atingir a velocidade alvo na seção onde há um gargalo.

Os valores de limite de velocidade apresentados pelo sistema L.V.V. dependem inteiramente das características da rede. Os valores podem ser: atribuídos dinamicamente (Fang, Hadiuzzaman, Karim, Luo e Qiu (2014), Jiang, Liu, Li e Wan (2011), Lee, Hellinga e Saccomanno (2004), Lee, Hellinga e Saccomanno (2006), Pham e Dumont (2011) e Yu e Abdel-Aty (2014)), onde os valores são calculados através do modelo de controle para produzir um limite de velocidade ótimo para a seção seguinte; ou arbitrariamente determinados (Abdel-Aty, Dilmore e Dhindsa (2006), Abdel-Aty, Cunningham, Gayah e Hsia (2008), Fang, Hadiuzzaman, Karim, Luo e Qiu (2014), Jiang, Liu, Li e Wan (2011), Lee, Hellinga e Saccomanno (2006) e Li, Liu e Wang (2014)), onde um valor é predeterminado para ser implementado no caso de ativação do sistema, ou a taxa de redução do limite atual é predeterminada em cada passo de tempo (*time step*).

(Abdel-Aty, Dilmore e Dhindsa (2006), Abdel-Aty, Cunningham, Gayah e Hsia (2008)) investigaram um sistema L.V.V. baseado em uma implantação espacial com período de tempo fixo de ativação (5 e 10 min). As velocidades médias são medidas em cada localização (localização do contador de tráfego) ao longo da rede a cada 5 min e, em seguida, as diferenças de velocidade entre duas seções consecutivas são analisadas no mesmo período de tempo. Estudos foram conduzidos para determinar a diferença de velocidade crítica na qual o L.V.V. deve ser implementado, de acordo com seu efeito sobre o risco de colisão. Como resultados, uma diferença de velocidade de 7 mph foi usada como limite para a ativação do sistema L.V.V. Nesses casos de estudo, os limites de velocidade para testes foram escolhidos arbitrariamente: (i) reduzindo a velocidade na seção a montante da localização do gargalo em 10 mph; (ii) reduzindo a velocidade na seção a montante da localização do gargalo em 5 mph; e (iii) reduzindo a velocidade a montante por 5 mph e aumente a jusante por 5 mph.

Jiang, Liu , Li e Wan (2011) testou um sistema L.V.V. baseado em uma implantação espacial fixa (fixa porque o local de implantação não varia) e com um período de ativação fixo (5, 10 e 15 min). O sistema aplica o modelo de previsão de colisões em tempo real desenvolvido por Lee, Hellinga e Saccomanno (2003) para identificar a ligação entre o controle dinâmico da velocidade e a redução do potencial de colisão. O modelo leva ao cálculo de um potencial de colisão dependente de dados de tráfego em tempo real, tais como: desvio padrão da velocidade; velocidades médias; diferença de velocidade entre seções a montante e a jusante; e densidade a montante. O limite do potencial de colisão (CP) é ajustado também de acordo com o modelo de (LEE; HELLINGA; SACCOMANNO, 2003). CP é calculado a cada 30 segundos e o valor médio para o período de tempo é comparado com o limiar. Quando CP está acima do limiar, o limite de velocidade é definido para um novo valor; e se o potencial de colisão no último período de tempo estiver abaixo do limiar, o limite de velocidade retornará à velocidade padrão. Os limites de velocidade aplicados neste experimento são arbitrariamente determinados e calculados dinamicamente de acordo com a média das velocidades observadas nas seções em torno de um gargalo.

Lee, Hellinga e Saccomanno (2004) analisou um sistema L.V.V. baseado em uma implantação espacial fixa, com período de ativação fixo (2, 5 e 10 min, e todo o tempo de simulação). O sistema também aplica o modelo de previsão de colisão em tempo real desenvolvido por Lee, Hellinga e Saccomanno (2003). Os dados de tráfego em tempo real (desvio padrão da velocidade; diferença de velocidade entre seções a montante e a jusante; e

covariância da diferença de volume entre seções a jusante e a montante em faixas adjacentes) servem para calcular o valor precursor de colisão usado como entrada para o modelo de previsão de colisão, afim de estimar CP. Se o CP atual exceder um limite especificado, os limites de velocidade atuais são reduzidos para um limite reduzido, especificado para o período de tempo de intervenção. Caso contrário, os limites de velocidade atuais são mantidos. O deslocamento de tempo para o cálculo de precursores de colisão é definido igual à duração da intervenção. No caso da duração definida igual a todo o tempo de simulação, um único limite de velocidade é imposto durante a simulação. Os limites de velocidade aplicados nesta experiência são atribuídos dinamicamente de acordo com a média de velocidade observada, e podem ter 7 valores (limite de velocidade de fluxo livre e 6 valores pré-determinados).

Yang et al. (2013) propõe um algoritmo L.V.V. controlado e simulado apenas em Matlab. O algoritmo possui uma função objetivo que soma o acidente esperado em todos os *links* da rede, estimados por um modelo de previsão de acidentes.

Adicionalmente ao sistema de controle L.V.V. com foco na segurança, os estudos a seguir propuseram um novo modelo matemático para avaliar os impactos de segurança.

Fang, Hadiuzzaman, Karim, Luo e Qiu (2014) apresenta um sistema L.V.V. baseado em uma implantação espacial (à frente do gargalo, mas o número de seções sob influência pode variar de acordo com restrições definidas) e tempo de implantação variável com período dinâmico de ativação. O sistema propõe um modelo de previsão de probabilidade de colisão para o sistema de controle L.V.V. Os dados de tráfego em tempo real em cada passo de tempo (*time step*) servem para prever futuras variáveis de estado de tráfego e, em seguida, são usados como entrada do modelo para calcular o limite de velocidade para o próximo passo de tempo. As características de tráfego (velocidade, ocupação e fluxo) antes de um evento de colisão e um correspondente evento sem colisão foram consideradas como variáveis explicativas do modelo. Além disso, algumas restrições ao modelo são: a velocidade é arredondada para um múltiplo de 10 km/h; O limite superior foi ajustado para o limite de velocidade de fluxo livre; A diferença de limites de velocidade entre dois passos de tempo sucessivos é limitada a 10 km/h (distribuição de tempo variável); A diferença de limites de velocidade entre duas seções adjacentes é limitada a menos de 20 km/h (a distribuição espacial pode influenciar mais de uma seção).

Lee, Hellinga e Saccomanno (2006) desenvolveu um modelo de previsão de colisões em tempo real para estimar o potencial de colisão com base na variação das características de tráfego a curto prazo: coeficiente de variação da velocidade a montante; densidade média; e diferença de velocidade média entre a jusante e a montante. O sistema L.V.V. controlado por este modelo é baseado em uma implantação espacial fixa com tempo de ativação fixo (2, 5, 10 e 15 min). Foram consideradas três estratégias: (i) sete limites de velocidade fixo; (ii) um limite de velocidade estabelecido igual à velocidade média a jusante da localização do estrangulamento; e (iii) o limite de velocidade é ajustado igual às velocidades médias a montante e a jusante do gargalo. O modelo foi desenvolvido usando um modelo log-linear que permite investigar a natureza da relação entre os precursores de colisão selecionados e a frequência de colisões ajustada pelo nível apropriado de exposição, conforme apresentado em Lee, Hellinga e Saccomanno (2003) e Lee, Hellinga e Saccomanno (2004).

Li, Liu e Wang (2014) teve como principal objetivo desenvolver uma estratégia de controle L.V.V. para reduzir os riscos de colisão traseira perto de gargalos. Os riscos de colisão traseira foram estimados usando um modelo de previsão de risco de acidente que é desenvolvido especificamente para colisões traseiras em áreas de estrangulamento de rodovias. O sistema L.V.V. baseia-se em uma implantação espacial (antes do gargalo) e na implantação do tempo (cinco níveis de taxas de mudança de velocidade foram testados), com um período de ativação fixo (não especificado). A estratégia de controle L.V.V. é composta por um índice de risco de colisão traseira (RCRI) que considerou as características das trajetórias de desaceleração dos veículos que atingiram as ondas cinemáticas oriundas de gargalos, e de dados de tráfego em tempo real (desvio padrão de velocidade, fluxo e ocupação a jusante e a montante).

Pham e Dumont (2011) propôs um sistema L.V.V. como uma medida preventiva. O sistema L.V.V. é implantado no espaço (na seção de estudo e a montante) com um período de tempo fixo de ativação (5 min). O modelo de controle L.V.V. foi desenvolvido com Matlab para ativar ou desativar uma redução de velocidade. O modelo aplica dados de tráfego em tempo real como entradas para identificar uma situação de risco de colisão durante os últimos três intervalos. No caso do alarme ser ativado, o limite de velocidade é diminuído em 20 km/h para o intervalo seguinte e, se nenhum alarme for ativado, o limite de velocidade é aumentado em 20 km/h (limite inferior de 60 km/h e limite superior de 120 km/h são definidos e não podem ser excedidos).

Yu e Abdel-Aty (2014) apresentou um sistema L.V.V. implantado no espaço (três seções a jusante e uma a montante do gargalo) com um período de tempo fixo de ativação (5 min). O modelo de controle L.V.V. é baseado no modelo METANET pré-existente – apresentado por Messmer e Papageorgiou (1990) – e um modelo de risco de colisão (CR) desenvolvido em seu estudo. O modelo CR utiliza um modelo de regressão logística para medir o risco de colisão com dados históricos de colisão e dados de tráfego em tempo real combinados com cada caso de colisão. As entradas do modelo de controle são os parâmetros de fluxo de tráfego (densidade, velocidade média e volume) e as taxas L.V.V. atuais e as taxas L.V.V. ótimas para o próximo passo são as únicas saídas, o que significa que os limites de velocidade são atribuídos dinamicamente. Além disso, existem algumas restrições ao modelo: a diferença máxima entre dois limites de velocidade vizinhos é de 10 mph (restrição espacial); e a diferença máxima entre dois passos de tempo consecutivos é de 10 mph (restrição temporal).

Como conclusões entre os dez estudos discutidos nesta subseção, nove apresentam como o sistema L.V.V. é implementado na rodovia em estudo. A maioria deles emprega uma implementação de espaço (7) com um período de ativação fixo (8). Quanto aos valores dos limites de velocidade, são atribuídos dinamicamente (3) ou arbitrários (3) e alguns estudos testam ambas as técnicas (3). Metade dos estudos aplicou um modelo pré-existente, e a outra metade desenvolveu o seu próprio. No entanto, todos os estudos usam um indicador de colisão (previsão de colisão, risco de colisão e potencial de colisão) como entrada para o modelo de controle L.V.V. Este indicador de colisão é sempre calculado de acordo com dados de tráfego em tempo real, tais como: volume, velocidade média, desvio padrão da velocidade, diferença de velocidade entre seções, diferença de velocidade entre faixas adjacentes, ocupação e desvio padrão de ocupação.

2.3.2 Quais são os impactos de segurança do L.V.V. em rodovias?

Esta subseção apresenta os resultados da revisão sistemática quanto aos impactos de segurança de sistemas L.V.V., trazendo os resultados apontados nos artigos que aplicam algum indicador de colisão como entrada para o sistema L.V.V.

Abdel-Aty, Dilmore e Dhindsa (2006) e Abdel-Aty, Cunningham, Gayah e Hsia (2008) concluem que o L.V.V. pode ser empregado para reduzir efetivamente os riscos de mudança de faixa e colisões traseiras em condições de tráfego de baixo volume. Estes estudos também concluíram que usando L.V.V. em condições fora do pico, o tempo de viagem também é

positivamente afetado. Eles recomendam que o L.V.V. deve ter velocidades introduzidas gradualmente, com mudanças no tempo próximo de 5 mph a cada 10 min. Nesses estudos, nenhum tratamento foi encontrado para reduzir com êxito os riscos de colisão traseira e de mudança de faixa na condição de tráfego congestionado. Isso é atribuído ao fato de que, em estado congestionado, a velocidade dos veículos está sujeita às condições de tráfego circundantes e não ao limite de velocidade declarado. Portanto, nestes estudos, alterar o limite de velocidade padrão não afeta a velocidade dos veículos de uma forma desejável nesta condição.

Fang, Hadiuzzaman, Karim, Luo e Qiu (2014), Jiang, Liu, Li e Wan (2011), Lee, Hellinga e Saccomanno (2004), Lee, Hellinga e Saccomanno (2006) e Li, Liu e Wang (2014) aplicaram um modelo de previsão de colisões em tempo real para estimar o potencial de colisão (CP) para as estratégias de controle L.V.V.

Li, Liu e Wang (2014) também aponta que os limites de velocidade devem ser gradualmente reduzidos para minimizar a diferença entre a velocidade do congestionamento e a de fluxo livre a montante. Ao alterar abruptamente os limites de velocidade, o sistema L.V.V. pode introduzir distúrbios no fluxo de tráfego, aumentando a probabilidade de colisão quando não empregado corretamente. Os resultados da simulação mostraram que as estratégias de controle L.V.V. propostas foram eficazes na redução de potenciais de colisão próximos a gargalos recorrentes de rodovias. Com a estratégia de controle proposta, o L.V.V. reduziu o potencial de colisão traseira em 69% para o cenário de alta demanda e em 81% para o cenário de demanda moderada. Este artigo sugeriu uma alteração dos limites de velocidade de forma rápida (10 a 15 mph em intervalos de 30 segundos).

Em contrapartida, Jiang, Liu, Li e Wan (2011) afirma que intervalos de 15 min de duração da intervenção leva a melhores resultados enquanto 5 min leva a pior: este fenômeno pode ser explicado devido à instabilidade do tráfego provenientes de frequentes distúrbios causados pelo limite de velocidade muitas vezes alterado. A instabilidade pode aumentar o potencial de colisão, o que é consistente com os resultados de Lee, Hellinga e Saccomanno (2006). O estudo também afirma que o L.V.V. reduz o potencial de colisões sem aumentar o tempo total de viagem.

Lee, Hellinga e Saccomanno (2006) encontrou intervalos dos limiares existentes e a duração de intervenção que reduzem tanto o potencial de colisão quanto o tempo de viagem

total. Os maiores benefícios de segurança foram obtidos quando L.V.V. foi ajustado para empregar os limites de velocidade iguais as médias de velocidade a montante e a jusante (isto é, velocidade de transição). A partir dos resultados, o potencial de colisão geralmente diminui à medida que a duração da intervenção aumenta, e os limites de velocidade variáveis podem reduzir o potencial de colisão em 5-17%, ao reduzir temporariamente os limites de velocidade durante condições de tráfego adversas, quando o potencial de colisão excede o limiar pré-estabelecido.

No estudo de Fang, Hadiuzzaman, Karim, Luo e Qiu (2014), os resultados comprovam que o L.V.V. pode ser eficaz em reduzir a probabilidade de colisão em uma rede de tráfego congestionado. O algoritmo de controle L.V.V. proposto reduz efetivamente o potencial de colisão e o número de colisões relacionadas ao congestionamento pela previsão de estados de tráfego futuros, proporcionando um controle L.V.V. dinâmico e seguro. O sistema reduziu a probabilidade de colisão em 35% na área do gargalo e reduziu em 19% a probabilidade global de colisão.

Lee, Hellinga e Saccomanno (2004) descobriu que o L.V.V. pode reduzir o potencial total de colisões em aproximadamente 25% ao reduzir temporariamente os limites de velocidade durante condições de tráfego adversas. A curta duração da intervenção (2 min) resulta num aumento do potencial de colisão devido a alterações mais frequentes do limite de velocidade. Intervalos de 5 a 10 min são apontados como capazes de maximizar os benefícios de segurança para o segmento de rodovia em estudo, corroborando com Abdel-Aty, Dilmore e Dhindsa (2006), Abdel-Aty, Cunningham, Gayah e Hsia (2008), Jiang, Liu, Li e Wan (2011) e Lee, Hellinga e Saccomanno (2006), que alegam que a duração mais longa da intervenção resulta na diminuição dos potenciais de colisão. Além disso, as reduções nos limites de velocidade podem aumentar o tempo de viagem do sistema. Portanto, existe uma compensação quantificável entre a diminuição do risco (potencial de colisão) e o aumento do tempo de deslocamento do sistema, e a redução do potencial de colisão é maior em locais de elevada turbulência do tráfego, tais como locais de gargalo ou de fusão do tráfego.

Yang et al. (2013) estudou o sistema L.V.V. em condições climáticas adversas. Ao reduzir os limites de velocidade em tais condições climáticas, L.V.V. melhora a segurança, mas piora o congestionamento e as emissões. O estudo aponta para uma diminuição de 19% no número de acidentes, mas 16% de aumento no tempo de viagem, e 3,70% de aumento nas emissões de gases de efeito estufa. Considerando que a segurança é uma preocupação

primordial durante condições climáticas adversas, o trade-off entre segurança, tempo de viagem e emissões é razoável.

Ao estudar o nível de adesão do condutor com o sistema L.V.V., Yu e Abdel-Aty (2014) concluiu que o nível de adesão afeta diretamente os resultados de melhoria de segurança. Isto é, quanto maior o número de condutores que reduzem suas velocidades e aderem ao sistema, maior é o impacto positivo do sistema. O estudo demonstra que o sistema L.V.V. proposto poderia melhorar a segurança, diminuindo o risco de colisão e aumentando a homogeneidade das velocidades sob níveis de adesão altos e moderados. Já para o cenário de baixa adesão, o sistema L.V.V. não melhora significativamente a segurança do tráfego.

2.4 REVISÃO DE ESTUDOS SOBRE MODELAGEM MATEMÁTICA DE CONFLITOS

Como as colisões entre veículos são uma medida direta da segurança do tráfego, muitos estudos têm focado em encontrar uma relação entre as características operacionais da rodovia e risco de colisão. Modelos de previsão de acidentes/colisões em tempo real são frequentemente empregados para avaliar o risco de colisão entre veículos com base em dados agregados de tráfego coletados através de laços indutivos no pavimento ou câmeras de monitoramento (LI *et al.*, 2014).

O risco de acidentes pode ser estimado como a probabilidade de ocorrências de conflito com base nas características do fluxo de tráfego existentes na rodovia, tais como velocidades médias, fluxo, ocupação ou densidade. A previsão do risco de colisão contribui para identificar condições de tráfego perigosas onde estratégias proativas de prevenção de colisões podem ajudar a mitigar a alta probabilidade destes incidentes. Diversos estudos propuseram modelos para prever o risco de colisão em rodovias com base nas características operacionais do tráfego. Uma revisão sistemática sobre os impactos das características do tráfego na ocorrência destes eventos é apresentada por (ROSHANDEL; ZHENG; WASHINGTON, 2015), e resume os principais trabalhos na área.

A regressão logística é uma das técnicas estatísticas mais utilizadas para relacionar a probabilidade de acidentes com as características de tráfego (ABDEL-ATY *et al.*, 2004; ABDEL-ATY; DILMORE; DHINDSA, 2006; ISLAM *et al.*, 2013; LI *et al.*, 2014; PARK, JUNHYUNG; OH, 2009; XU *et al.*, 2012, 2014; XU; TARKO; *et al.*, 2013; ZHENG; AHN;

MONSERE, 2010). A maioria dos estudos aplicou o método “caso-de-controle correspondente”, onde os dados de tráfego foram obtidos a partir de intervalos com acidentes ou conflitos e, em seguida, combinados com intervalos sem estes eventos. Em geral, os resultados indicam que os modelos podem ajudar a estimar a probabilidade de colisão satisfatoriamente, porém, desempenhos inconsistentes e altos erros de predição foram relatados. Além disso, a maioria dos estudos não relata o desempenho preditivo de seus modelos.

Vários outros estudos têm proposto o emprego de técnicas alternativas para avaliar o risco de colisão entre veículos, como por exemplo, modelos log-linear (LEE; HELLINGA; SACCOMANNO, 2003), bayesianos (AHMED; ABDEL-ATY; YU, 2012; OH; OH; RITCHIE, 2005), rede neural probabilística (PNN) (ABDEL-ATY; UDDIN; PANDE, 2005); Abdel-Aty e Pande, 2005), rede neural (ABDEL-ATY; DILMORE; DHINDSA, 2006), e máquina de vetores de suporte (SVM) (YU; ABDEL-ATY, 2013). Resultados de Lee, Hellinga e Saccomanno (2003) sugerem que o coeficiente de variação (isto é, o desvio padrão de uma variável dividida pelo seu valor médio) da velocidade, densidade de tráfego e diferença de velocidade entre os detectores de tráfego posicionados antes e depois do evento de conflito estavam significativamente correlacionados com o risco de colisão. Resultados de Ahmed, Abdel-Aty e Yu (2012) indicaram que a velocidade média e o desvio padrão da velocidade afetaram a probabilidade de ocorrência de colisão em rodovias.

Abdel-Aty e Pande (2005) aplicaram um modelo de rede neural probabilística (PNN) para prever ocorrências de colisões em rodovias usando derivadas múltiplas de velocidade. Em suas proposições, os logaritmos do coeficiente de variação da velocidade foram inseridos em modelos de classificação. Pande e Abdel-Aty (2006) indicaram que a velocidade média, a diferença de ocupação entre faixas adjacentes e o desvio padrão de velocidade e volume contribuíram para aumentar o risco de colisão.

A maioria dos estudos usa dados agregados de tráfego obtidos através detectores instalados no pavimento. Zheng, Ahn e Monsere (2010) indicaram que o desvio-padrão de velocidade verificado em intervalos de 10 minutos poderia ser considerado uma medida de segurança substituta para colisões em condições de tráfego congestionado. No entanto, os dados são geralmente agregados em intervalos de 5 minutos, variando de 5 a 30 minutos antes do conflito ou evento de colisão. Abdel-Aty *et al.* (2004) e Islam *et al.* (2013) relataram que a ocupação média no detector a montante da colisão (0-5 minutos antes da colisão) e o coeficiente de variação da velocidade no detector a jusante do detector de velocidade a jusante da colisão

(5-10 minutos antes da colisão) têm influência significativa na ocorrência de colisão. Foram relatadas conclusões contraditórias quanto ao impacto das variáveis nos modelos; por exemplo. Lee, Hellinga e Saccomanno (2003) sugerem que o aumento do valor do coeficiente de variação da velocidade reduziria o risco de acidente, enquanto Abdel-Aty, Dilmore e Dhinsa (2006) relataram conclusões opostas. Essas conclusões inconsistentes podem estar relacionadas com as diferentes geometrias das rodovias estudadas, bem como diferentes características de fluxo de tráfego e fatores humanos que influenciam a dirigibilidade.

Conforme apontado por Roshandel, Zheng e Washington (2015), a maioria dos estudos anteriores não pareceu avaliar e/ou relatar rigorosamente o desempenho preditivo de seus modelos, como as taxas de previsão falso positivas e negativas. Apenas alguns estudos forneceram métricas para apoiar o desempenho dos modelos propostos: Abdel-Aty *et al.* (2004) afirmaram que seu modelo previu 69% de falhas corretamente com uma taxa de falsos negativos de 38,8%, e uma taxa de falsos positivos de 5,39%; enquanto Hossan e Muromachi (2012) alcançaram 66% de acurácia nas previsões e 20% de falsos positivos usando uma abordagem Bayesiana. Hourdos *et al.* (2006) afirmaram que a acurácia do seu modelo de previsão foi de 80%, com uma taxa de falso positivo de 15%; enquanto Islam *et al.* (2013) apresentou uma acurácia de 68,5%, e 26,1% de falsos alarmes. Como a maioria dos estudos não apresentou qualquer medida de desempenho do seu modelo, torna-se difícil avaliar o desempenho desses modelos na prática. Uma validação abrangente da acurácia do modelo é fundamental antes de qualquer modelo de previsão ser implementado na prática.

Esta tese busca apresentar um modelo de previsão de conflitos baseado em uma metodologia robusta para seleção de variáveis. O desenvolvimento do modelo incluiu a maioria das variáveis relatadas em estudos anteriores. Devido a este elevado número de variáveis, uma metodologia de seleção de variáveis (Capítulo 4) foi empregada para identificar as variáveis mais relevantes – que podem levar ao melhor desempenho de predição.

3. TRECHO EM ESTUDO E CONSTRUÇÃO DOS BANCOS DE DADOS

O trecho em estudo corresponde ao segmento da rodovia BR-290/RS, na região metropolitana da cidade de Porto Alegre – capital do estado do Rio Grande do Sul – entre os marcos quilométricos 87 a 96, direção interior-capital. Este trecho de rodovia possui 3 faixas de tráfego com duas rampas de acesso. Esta seção é o principal acesso à cidade de Porto Alegre. A localização foi selecionada entre outras seções de rodovias devido a vários critérios: a qualidade das câmeras de monitoramento de tráfego, a extensão do congestionamento e a existência de rampas de acesso de alto fluxo que causam distúrbios no fluxo de tráfego. Vídeos de trânsito foram gravados usando câmeras de monitoramento distribuídas para cobrir ambas as rampas de acesso.

Os avanços recentes em técnicas de visão computacional para a automação da extração de conflitos através de vídeo estão apresentando benefícios consideráveis para a realização de estudos de segurança do tráfego. A técnica automatizada baseada em vídeo mostrou-se útil na realização de diversas aplicações de análise de segurança (AUTEY; SAYED; ZAKI, 2012; ESSA; SAYED, 2015b; SAYED; ZAKI; AUTEY, 2013).

A Figura 3 ilustra o local do estudo e as posições das câmeras. As câmeras foram posicionadas acima da rodovia para atingir uma altura de visualização adequada para cobrir toda a área do gargalo 50 metros a jusante das rampas de acesso. A Figura 4 ilustra uma imagem da Câmera 2.

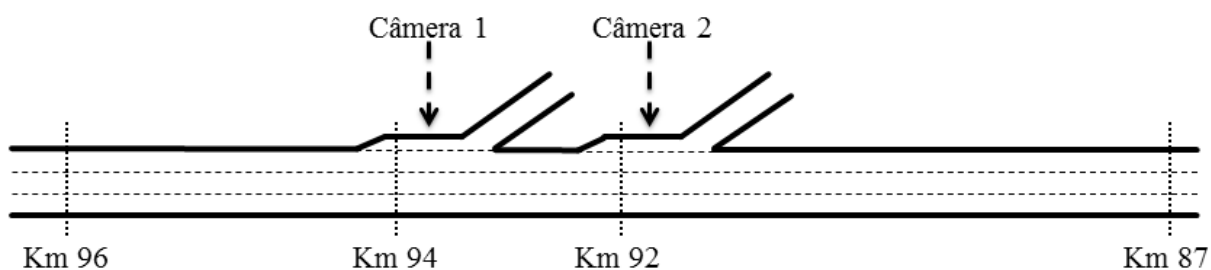


Figura 3: Trecho em estudo

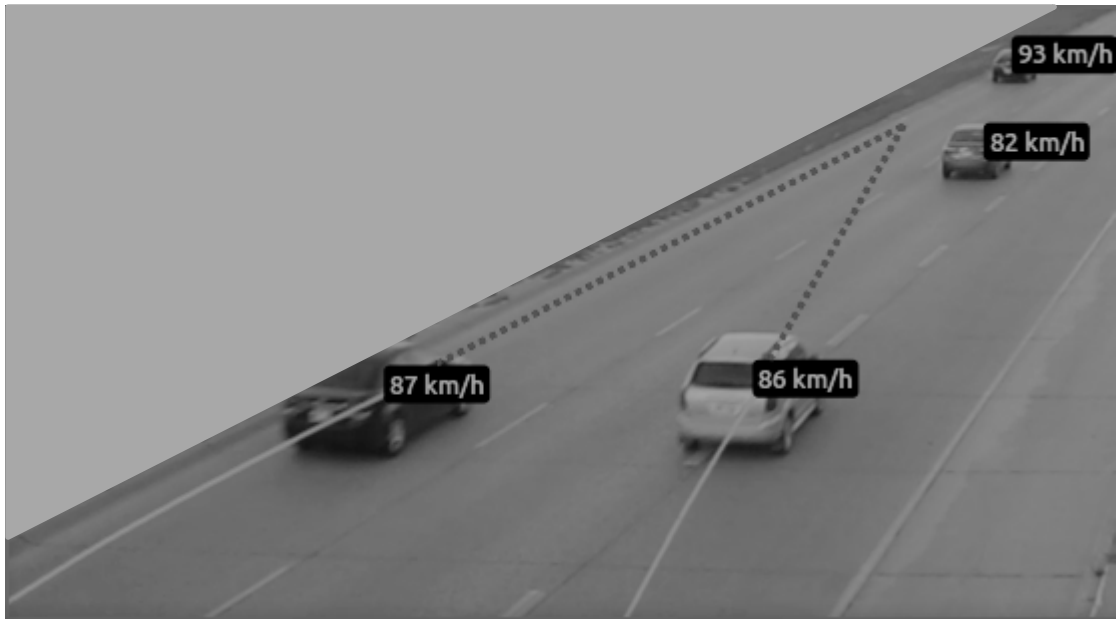


Figura 4: Imagem da Câmera 2

As condições de tráfego no trecho em estudo não são homogêneas, e cada faixa de tráfego normalmente possui médias de velocidades, intensidades de fluxo e composições de tráfego diferentes. A Figura 5 apresenta uma relação fluxo-velocidade para dados coletados através de laços indutivos no km 96, para todo o mês de maio de 2013, que ilustra as diferenças de tráfego entre faixas – particularidades típicas do tráfego nas rodovias brasileiras. A faixa da esquerda (Faixa 1) apresenta velocidades e taxas de fluxo mais altas, enquanto a faixa da direita (Faixa 3) apresenta as velocidades e taxas de fluxo mais baixas. A Faixa 3 recebe principalmente caminhões e ônibus, justificando taxas de fluxo e velocidades reduzidas. Os dados foram agregados em intervalos de 5 minutos.

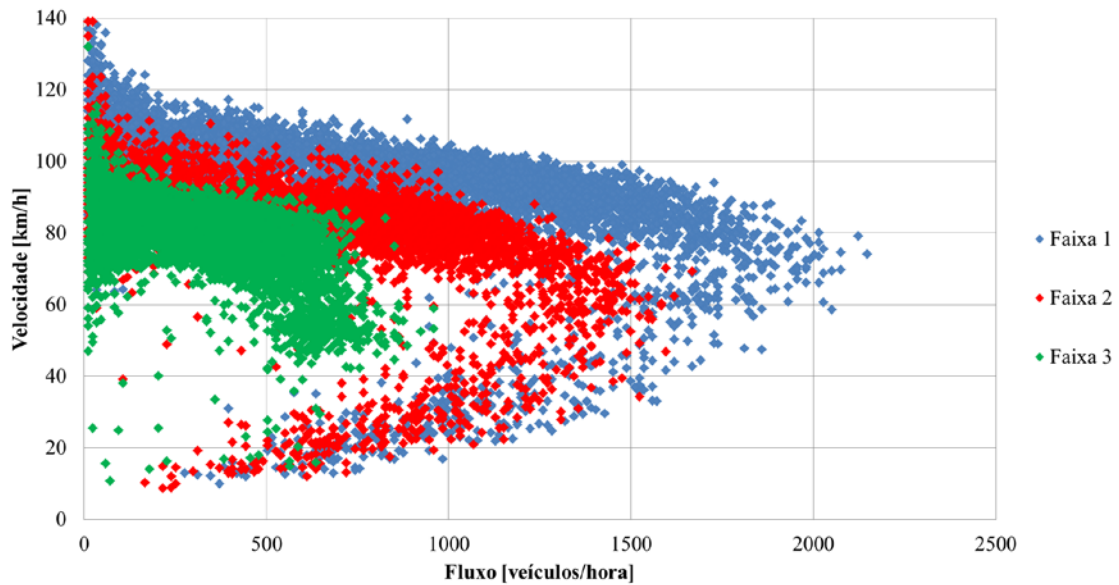


Figura 5: Relação fluxo-velocidade por faixa – km 96.

O número reduzido de observações referentes a acidentes neste trecho de rodovia não permite a construção de um modelo de previsão de acidentes. Assim, esta pesquisa foca em conflitos de tráfego. Uma vez que este segmento de rodovia não possui laços indutivos nos trechos das rampas de acesso onde é provável a ocorrência de conflito, câmeras de monitoramento de tráfego foram usadas para coleta de dados nestes pontos.

A coleta de dados através de vídeo foi realizada em dias de semana sob condições climáticas favoráveis. Um total de 140 horas de dados de tráfego foram registrados nos locais selecionados em maio de 2013, nos quais 120 horas com boa visibilidade (aproximadamente 60 horas de dados para cada rampa de acesso). Os vídeos gravados foram posteriormente analisados em laboratório para obter dados de fluxo de tráfego, velocidades e conflitos. Um estudante de graduação treinado foi designado para rever todos os vídeos para garantir que critérios consistentes foram aplicados para identificar conflitos. Os dados de conflitos foram registrados seguindo os passos propostos em (HUANG *et al.*, 2013). Além disso, a metodologia de coleta de dados foi corroborada por outros membros da pesquisa, para garantir a consistência dos dados.

3.1.1 Descrição da formação do banco de dados de conflitos

Os conflitos de tráfego foram extraídos identificando as ações evasivas dos veículos, como freadas, mudanças de direção e desaceleração dos veículos. O emprego do freio foi

frequentemente usado para identificar conflitos. Um software de reconhecimento de movimento em vídeos foi utilizado para identificação de movimentos (veículos). Este software permite também a manipulação das cores da imagem, para auxiliar na detecção de luzes de freio, por exemplo. Tal software foi desenvolvido pelo estudante de graduação designado para a coleta dos dados.

Para identificar um conflito, o observador deve monitorar as luzes de freio dos veículos, a velocidade e as condições dos veículos. Mudança de direção foi outro indicador de conflitos de trânsito: alguns condutores tendem a mudar de direção (ou faixa) em vez de aplicar os freios para evitar uma colisão. Notável desaceleração consistiu de um indicador subjetivo e só foi usado pelo observador quando não era possível visualizar as luzes de freio. Todos os eventos de conflito classificados na área de 50 metros de cobertura da câmera foram computados.

Uma vez que um conflito foi identificado, as seguintes informações foram coletadas através das filmagens: a velocidade média, ocupação e fluxo total para cada faixa em intervalos de 5 minutos. A fim de executar a técnica *matched case-control technique*, os dados de tráfego para os correspondentes eventos não-conflito precisavam ser coletados. Estudos anteriores têm coletado múltiplos dados de eventos não-colisão/conflito correspondentes a cada evento de colisão/conflito, variando de 1:1 a 1:5, como apontado por (ROSHANDEL; ZHENG; WASHINGTON, 2015), porém não foi encontrada diferença significativa nos parâmetros dos modelos (ABDEL-ATY *et al.*, 2004; ROSHANDEL; ZHENG; WASHINGTON, 2015).

Neste estudo, os dados de tráfego coletados para cada evento de conflito foram seguidos pela coleta de informações sobre um evento não conflitante. Por exemplo, se um determinado conflito ocorreu na segunda-feira as 09:00 horas, os dados referentes a um evento não-conflito foram coletados no mais próximo dia disponível (dia anterior ou dia sucessivo) para a hora exata, desde que nenhum conflito tenha acontecido naquele período de tempo coletado. Foi assegurado que tanto os eventos de conflito quanto os eventos não-conflito ocorreram em condições normais de trafegabilidade e com tempo seco. Outro fator importante é que a seção de rodovia em estudo apresentou distribuição de fluxo semelhante em todos os dias úteis.

Outros dados foram coletados quando um conflito foi identificado: (i) o tempo de cada conflito – definido como o momento em que o primeiro veículo realizou uma ação evasiva para evitar uma colisão; (ii) a distância dos veículos em conflito com o ponto de conflito – definido como a distância da rota para o ponto de encontro entre os veículos em conflito; (iii) o ângulo

de cada veículo em conflito – definido como o ângulo do veículo em conflito quando o primeiro veículo tomou uma ação evasiva para evitar uma colisão; e (iv) a velocidade de cada veículo em conflito. A velocidade de cada veículo em conflito foi calculada através da medição do tempo decorrido para cada veículo viajar uma distância específica (geralmente o comprimento de um carro de passageiro – cerca de 4,5 m) no vídeo. Essas informações permitiram estimar o tempo até a colisão (TTC). O TTC é definido como o tempo esperado para que dois veículos entrem em colisão caso continuem trafegando em sua velocidade atual e no mesmo caminho (HAYWARD, 1972). A coleta destas informações foi realizada através de um software desenvolvido para identificar mudanças de trajetória entre frames de um vídeo. Com o auxílio deste recurso computacional, foi possível realizar medições espaciais entre objetos no vídeo.

O TTC medido nos locais selecionados (km 92 e km 94) variou de 0,5 a 3,6 segundos, com uma média de 2,0 segundos. Os conflitos de tráfego observados foram classificados como: (i) conflitos de colisão traseira; e (ii) conflitos de mudança de faixa. Um total de 3756 conflitos foram observados e identificados nos locais selecionados, incluindo 2291 conflitos de colisão traseira (61%) e 1465 conflitos de mudança de faixa (39%). O elevado número de conflitos de mudança de faixa enfatiza as peculiaridades do tráfego no trecho em estudo, onde ultrapassagens e a mudança de faixa são frequentes devido à alta diferença nas velocidades médias e nos fluxos por faixa, conforme apresentado na Figura 6.

Além dos dados de conflito, os volumes, as velocidades e a composição do tráfego para cada faixa foram também coletados através de laços indutivos instalados nos km 87 e 96, a fim de calibrar o simulador de tráfego não apenas para representar adequadamente os conflitos, mas também para representar adequadamente as condições de tráfego da rede estudada. Determinou-se também a curva de distribuição cumulativa da velocidade desejada para cada faixa e classe de veículos na composição (carros, caminhões e ônibus). A velocidade desejada é a velocidade escolhida por um veículo, se não for impedida por outros veículos ou dispositivos de controle de tráfego (ESSA; SAYED, 2015a). Portanto, para obter a distribuição de velocidade desejada a partir de dados de campo, foram avaliadas velocidades de 2500 veículos selecionados durante períodos de baixo volume.

Estes bancos de dados foram utilizados para criar o modelo de previsão de conflitos (apresentado no Capítulo 4), e para a calibração do simulador de tráfego (apresentado no Capítulo 5).

4. MODELAGEM MATEMÁTICA DE CONFLITOS

Este capítulo busca modelar a relação entre as características de tráfego e a probabilidade da ocorrência de conflitos na rodovia BR-290/RS. Para tanto, primeiramente é apresentado o conjunto de variáveis coletadas através de câmeras de monitoramento, que potencialmente oferecem explicações sobre a ocorrência de conflitos. A seguir, são propostos dois índices alternativos baseados na distância de Bhattacharyya (*Bhattacharyya Distance – BD*) e Análise de Componentes Principais (*Principal Component Analysis – PCA*), com o objetivo de identificar as variáveis mais relevantes para categorizar ocorrências em classes de conflito ou não conflito. Esses índices orientam a remoção de variáveis menos importantes no processo de seleção de variáveis. Depois de cada variável ser excluída, a capacidade de classificação das variáveis restantes é avaliada para categorizar eventos em conflito ou não. O subconjunto selecionado de variáveis foi então inserido em um modelo de Análise Discriminante Linear (*Linear Discriminant Analysis – LDA*) desenvolvido para estimar a probabilidade de conflito, usando dados de tráfego coletados através das câmeras de monitoramento.

4.1 PROCESSAMENTO DO BANCO DE DADOS

Além dos dados de velocidade, ocupação e fluxo por faixa, foram criadas outras variáveis com base nessas três variáveis primárias, visando o desenvolvimento de um modelo de previsão de conflitos mais robusto. O conjunto inicial de variáveis foi composto por (i) Velocidade média para toda a seção [Av.Speed]; (ii) Desvio padrão das velocidades [Std.Dev.Speed]; (iii) Coeficiente de variação da velocidade [Coeff.Var.Speed] – relação entre o desvio padrão e a média; (iv) Diferença entre o desvio padrão das velocidades das faixas [Diff.Std.Dev.Speed]; (v) ocupação média para toda a seção [Av.Occ]; (vi) Desvio padrão da ocupação [Std.Dev.Occ]; (vii) Coeficiente de variação da ocupação [Coeff.Var.Occ]; (viii) Diferença entre os desvios padrão da ocupação das faixas [Diff.Std.Dev.Occ]; (ix) Fluxo total para toda a seção [Total.Flow]; (x) Desvio padrão do fluxo [Std.Dev.Flow]; (xi) Coeficiente de variação do fluxo [Coeff.Var.Flow]; e (xii) Diferença entre os desvios padrão do fluxo das faixas [Diff.Std.Dev.Flow].

Esta gama de variáveis foi criada com base em trabalhos anteriores, como (ABDEL-ATY; DILMORE; DHINDSA, 2006; ISLAM *et al.*, 2013; LEE; HELLINGA;

SACCOMANNO, 2003; OH; OH; RITCHIE, 2005; PARK, JUNHYUNG; OH, 2009; XU; LIU; *et al.*, 2013; ZHENG; AHN; MONSERE, 2010).

Além disso, como um dos principais objetivos desta modelagem matemática é o foco na seleção de variáveis, acredita-se que a inclusão da média, do desvio padrão e do coeficiente de variação no mesmo conjunto de dados pode ajudar a desenvolver um modelo de previsão de conflitos mais preciso. Levando em conta as particularidades do comportamento do tráfego no Brasil, foram criadas também variáveis que levam em conta as diferenças entre os desvios padrão da velocidade, ocupação e fluxo.

Todas essas variáveis foram criadas para intervalos de 5 minutos. Para o modelo de previsão de conflitos, os intervalos de tempo utilizados foram 0-5, 5-10 e 10-15 minutos antes do conflito. Estes intervalos de tempo foram selecionados devido à sua vasta utilização em estudos anteriores, conforme apresentado na Seção 5.1. Uma última variável binária foi adicionada para indicar a ocorrência de um conflito para cada observação (1 para um evento de conflito e zero para não-conflito).

4.2 MÉTODO PARA SELEÇÃO DE VARIÁVEIS

O método proposto para seleção de variáveis baseia-se em duas etapas. A primeira etapa calcula dois índices alternativos de importância que avaliam a relevância das variáveis para a classificação de eventos em duas classes. Na segunda etapa, é realizado um processo iterativo que remove variáveis irrelevantes e classifica eventos usando a técnica LDA. Tais etapas são agora detalhadas.

Na primeira etapa do método proposto, o banco de dados foi dividido em um conjunto de treinamento com eventos N_{tr} e um conjunto de testes com eventos N_{ts} ($N_{tr} + N_{ts} = N$). O conjunto de treinamento é usado para selecionar as variáveis mais importantes, enquanto o conjunto de testes denota novos eventos a serem categorizados; ou seja, um conjunto de validação. Em seguida, são gerados dois índices de importância das variáveis, que orientam o procedimento de remoção de variáveis na segunda etapa.

Considere um conjunto de dados composto por N eventos conflitantes e não conflitantes, descritos por variáveis J .

O primeiro índice testado foi $v_j^B, j = 1, \dots, j$, que se baseia na distância de Bhattacharyya (B_j) entre as distribuições calculadas para cada variável j . A distância de Bhattacharyya (B_j) avalia a distância entre as distribuições de probabilidade (FUKUNAGA, 1990) para cada variável j de tal forma que B_j entre o grupo c (denotando um evento referindo-se a um conflito) e n (denotando um evento que não se refere a um conflito) pode ser expresso pela soma da similaridade de cada variável j em um momento, $B_j(c, n)$, como na equação (1) (COLEMAN; ANDREWS, 1979). Quanto maior a distância de Bhattacharyya para uma variável específica, maior a separação entre as distribuições que descrevem as classes (JUNG *et al.*, 2012). Tais distâncias darão origem a um índice de importância da variável na Seção 7.3; variáveis apresentando grandes $B_j(c, n)$ são entendidas como mais relevantes para o modelo.

$$B_j(b, s) = \frac{1}{4} + \ln \left(\frac{1}{4} \left(\frac{\sigma_{bj}^2}{\sigma_{sj}^2} + \frac{\sigma_{sj}^2}{\sigma_{bj}^2} + 2 \right) \right) + \frac{1}{4} \left(\frac{(\mu_{bj} - \mu_{sj})^2}{\sigma_{bj}^2 + \sigma_{sj}^2} \right) \quad (3)$$

Onde σ^2 e μ são a variância e a média das distribuições estatísticas da j -ésima variável para os grupos b e s , respectivamente.

Quanto maior v_j^B , menor a sobreposição entre as distribuições na variável j que caracterizam cada classe, sugerindo uma maior separação entre categorias (ANZANELLO *et al.*, 2015).

O segundo índice de importância da variável testado foi v_j^P , que é derivado dos parâmetros emergentes do PCA e aplicado ao conjunto de treinamento. A Análise de Componentes Principais (PCA) é uma técnica de redução dimensional que combina linearmente as variáveis originais em novas variáveis, não correlacionadas, denominadas pontuações PCA. Considere uma matriz \mathbf{X} constituída por N amostras descritas por variáveis J , onde o evento i é descrito por $\mathbf{x}_i (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{ij})$. PCA constrói A ($a = 1, \dots, A$) combinações lineares, $t_{ia} = w_{1a}x_{i1} + w_{2a}x_{i2} + \dots + w_{ja}x_{ij}$, das variáveis originais (Rencher, 2002). Essas combinações, também chamadas de componentes principais (PC), explicam a maior parte da variabilidade nos dados originais e dão origem a dois parâmetros principais: (i) o peso associado à variável j , w_{ja} , que é determinado de forma que a variância entre os componentes é maximizada, e (ii) a quantidade de variância explicada por cada PC retido, λ_a . Para detalhes sobre PCA, ver (ANZANELLO, MICHEL J.; ALBIN; CHAOVALITWONGSE, 2012).

Os pesos (w_{ja}) e a quantidade de variância explicada por cada componente retido a ($a = 1, \dots, A$), λ_a , dão origem ao índice ilustrado na equação (4). Nesse índice, as variáveis que apresentam w_{ja} 's grande e que emergem de componentes com λ_a 's grandes são consideradas mais importantes, devido à sua capacidade de destacar a variabilidade nos dados. Com base nesses pressupostos, Anzanello *et al.* (2012) afirmam que as variáveis com maior v_j permitem uma melhor categorização das amostras em classes. Como v_j^P se baseia em uma soma de termos, w_{ja}^2 é quadrado para evitar cancelar a importância da variável j .

$$v_j^P = \sum_{a=1}^A \lambda_a w_{ja}^2 \quad j=1, \dots, J \quad (4)$$

Na segunda etapa do método proposto, os eventos são classificados em duas categorias (isto é, conflitantes e não conflitantes) aplicando a técnica de classificação LDA às variáveis J no conjunto de treinamento, e calculando-se então três métricas para avaliar o desempenho da classificação: acurácia (definida como a fração de eventos corretamente classificados), sensibilidade (fração de eventos conflitantes corretamente classificados como conflito) e especificidade (fração de eventos não conflitantes corretamente classificados como não conflitantes).

Análise Discriminante Linear (LDA) é uma técnica de classificação que deriva combinações lineares (funções discriminantes) de variáveis para atribuir eventos a classes. As saídas de interesse LDA incluem os pesos para cada função discriminante, que são determinados de uma maneira que o erro de classificação é minimizado. As variáveis que descrevem um novo evento são inseridas nas funções discriminantes e a classe de destino para cada evento é definida com base numa comparação do valor emergente da função discriminante com um limiar. Os fundamentos matemáticos da LDA estão disponíveis em (RENCHER, 2002).

Em seguida, a variável com o menor v_j é removida, e uma nova classificação usando as variáveis restantes $J-1$ é realizada; As métricas de desempenho são então recalculadas. Este procedimento iterativo é repetido até que exista apenas uma única variável. Recomenda-se o subconjunto de variáveis com maior sensibilidade para classificar os eventos inseridos no conjunto de testes; alternativamente, podem-se avaliar as variáveis próximas ao subconjunto que produzem a maior sensibilidade e adicionar ou remover subjetivamente variáveis adjacentes ao subconjunto final. Nas proposições deste trabalho, a sensibilidade é entendida

como uma métrica de desempenho adequada a ser avaliada, uma vez que a capacidade de classificar corretamente um conflito como positivo é de grande interesse. Repetem-se então os passos acima mencionados usando o índice de importância da variável v_j^P e comparam-se o desempenho de ambos os índices.

Para avaliar a robustez do método, um grande número de repetições foi testado aleatoriamente embaralhando a ordem das observações e dividindo o conjunto de dados. Esse curso de ação garante que os resultados não são favorecidos por uma divisão específica dos dados em conjuntos de treinamento e teste.

4.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

O método proposto foi aplicado a dados que descrevem eventos de tráfego que resultaram em conflito ou não-conflito; Tais dados foram constituídos por 96 observações (48 eventos conflitantes e 48 eventos não conflitantes) descritas por 36 variáveis (variáveis apresentadas na Seção 6.2, para 0-5, 5-10 e 10-15 minutos). Foram executadas 500 replicações, aleatoriamente embaralhando o conjunto de dados em conjuntos de treinamento e testes. Quanto ao desempenho da classificação no conjunto de treinamento, todos os experimentos levaram a categorizações perfeitas, sugerindo que o conjunto de dados analisado apresenta uma estrutura favorável para a classificação. Todas as experiências computacionais foram realizadas no Matlab® R2012b e no pacote estatístico SPSS. Os resultados de classificação derivados de v_j^B e v_j^P são agora comparados, e o modelo sugerido para prever ocorrências de conflitos é apresentado.

4.3.1 Seleção de variáveis usando a Distância Bhattacharyya

A Tabela 1 apresenta as maiores distâncias de Bhattacharyya estimadas a partir dos dados, que dão origem ao índice v_j^B ; Tais variáveis são consideradas mais importantes para o propósito de classificação, e são as menos importantes a serem removidas do procedimento de classificação. Conforme resumido por Roshandel, Zheng e Washington (2015), o desvio padrão e coeficiente de variação para velocidades, fluxo e ocupação ou densidade são frequentemente usados como variáveis para descrever e classificar conflitos. Embora as variáveis relativas à diferença entre o desvio padrão das velocidades, fluxo e ocupação adotadas neste trabalho não sejam utilizadas em trabalhos anteriores, elas foram criadas para contabilizar as altas diferenças entre faixas, conforme discutido na Seção 7.2.

Tabela 1: Importância da variável, de acordo com a distância Bhattacharyya.

Variável	v_j^B	Variável	v_j^B
Total.Flow_5	141.1	Coef.Var.Speed_5	79.8
Std.Dev.Occ_5	133.8	Std.Dev.Speed_5	65.4
Total.Flow_10	95.6	Diff.Std.Dev.Flow_5	43.4
Std.Dev.Flow_5	95.4	Diff.Std.Dev.Flow_10	39.4
Av.Speed_5	84.2	Diff.Std.Dev.Occ_10	30.4

Nota: _5 refere-se a variáveis 0-5 minutos antes de um conflito.

_10 refere-se a variáveis 5-10 minutos antes de um conflito.

As variáveis são então removidas uma a uma seguindo a ordem sugerida pelo índice v_j^B . Uma vez que o processo de remoção é concluído, é importante salientar que algumas variáveis oferecem a maior parte da informação necessária para a classificação de eventos, como ilustrado na Figura 7.

É importante observar que subconjuntos consistindo de um número elevado de variáveis retidas apresentam níveis muito estáveis de desempenho de classificação, sugerindo que muitas dessas variáveis não oferecem contribuição no processo de categorização. O método aponta que, apenas cinco das 36 variáveis originais, podem inserir eventos corretamente em classes com a mesma precisão obtida usando todas as variáveis originais. Além disso, um subconjunto reduzido de variáveis aumenta significativamente a sensibilidade, conforme ilustrado na Figura 6. Para o perfil ilustrado, os subconjuntos constituídos por 2, 3 e 4 variáveis levam a níveis de sensibilidade ainda mais elevados, embora à custa da acurácia. Subconjuntos que produzem altos níveis de sensibilidade são de suposto interesse, uma vez que indicam precisamente a ocorrência de eventos conflitantes, o que está diretamente alinhado com as proposições deste trabalho. Classificações erradas de eventos não-conflito (especificidade mais baixa) são aceitáveis enquanto a acurácia não diminuir substancialmente, uma vez que o objetivo principal é prever corretamente os conflitos.

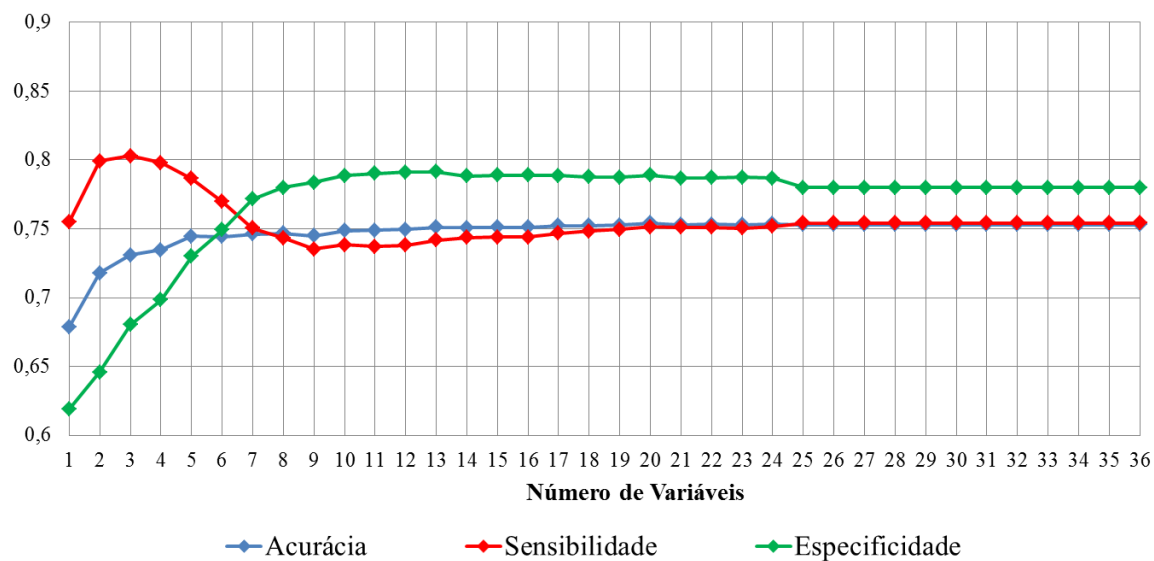


Figura 6: Perfis de acurácia, sensibilidade e especificidade, à medida que as variáveis são removidas, usando o índice v_j^B .

Considerando os resultados, os subconjuntos de 2, 3 e 4 variáveis retidas produzem níveis de sensibilidade mais elevados (0.7990, 0.8030, 0.7979, respectivamente) do que com 5 variáveis (0.7865). Porém, a diminuição substancial na especificidade sugere mais falso-positivos não-conflitos no modelo, o que pode ser um fator de confusão se o modelo LDA for implementado na prática. A Tabela 2 apresenta o desempenho médio da classificação quanto à acurácia, sensibilidade e especificidade quando uma proporção de 80% a 20% é considerada; ou seja, 20% das observações originais são utilizadas para a validação do modelo. Os valores mais altos para cada métrica são destacados em negrito.

Tabela 2: Desempenho médio da classificação usando o índice v_j^B no conjunto de teste, para números diferentes de variáveis retidas.

Desempenho da Classificação Média no Conjunto de Testes	Variáveis Retidas					
	1 Variável	2 Variáveis	3 Variáveis	4 Variáveis	5 Variáveis	6 Variáveis
Acurácia	0.6784	0.7180	0.7309	0.7345	0.7445	0.7441
Sensibilidade	0.7547	0.7990	0.8030	0.7979	0.7865	0.7697
Especificidade	0.6188	0.6457	0.6805	0.6984	0.7299	0.7493
Desvio Padrão da Acurácia	0.1102	0.1039	0.1003	0.0940	0.0925	0.0961
Desvio Padrão da Sensibilidade	0.1478	0.1364	0.1273	0.1332	0.1340	0.1408
Desvio Padrão da Especificidade	0.1324	0.1411	0.1434	0.1333	0.1322	0.1348

Quanto ao desvio padrão, observa-se que a redução do número de variáveis retidas não melhora essa métrica. Isso sugere que o método é robusto nas condições testadas.

4.3.2 Seleção de variáveis usando PCA

O segundo índice testado, derivado dos parâmetros PCA e descrito na Tabela 3, também sugeriu uma redução substancial no número de variáveis a serem retidas para análise. Os resultados são semelhantes aos obtidos pelo primeiro índice, onde 5 variáveis são consideradas mais relevantes para classificar eventos em classes conflitantes e não conflitantes. A Figura 7 apresenta perfis para as três métricas de desempenho de classificação, à medida que as variáveis são removidas, seguindo a ordem sugerida pelo índice v_j^P . Subconjuntos de 3 e 4 variáveis também produzem maior sensibilidade do que aqueles com 5 ou 6 variáveis, mas novamente há uma diminuição substancial na acurácia e especificidade da classificação (ver Tabela 4).

Tabela 3: Importância da variável, de acordo com o PCA.

Variável	v_j^P	Variável	v_j^P
Total.Flow_5	4.726	Std.Dev.Speed_5	1.556
Total.Flow_10	3.246	Av.Speed_5	1.461
Diff.Std.Dev.Occ_5	2.425	Coef.Var.Speed_10	1.155
Diff.Std.Dev.Occ_10	2.115	Std.Dev.Speed_10	0.999
Coef.Var.Speed_5	2.028	Av.Speed_10	0.814

Nota: _5 refere-se a variáveis 0-5 minutos antes de um conflito.

_10 refere-se a variáveis 5-10 minutos antes de um conflito.

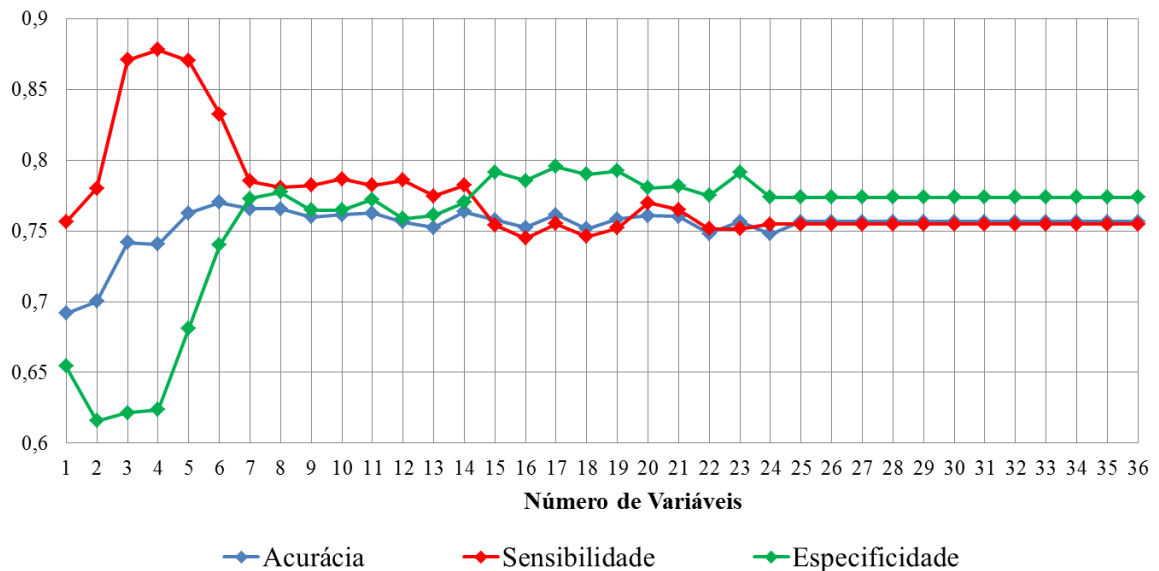


Figura 7: Perfis de acurácia, sensibilidade e especificidade, à medida que as variáveis são removidas, usando o índice v_j^P .

Ambos v_j^P e v_j^B apontam que as 12 variáveis que representam o intervalo de 10-15 minutos não são relevantes para a classificação. Tais resultados sugerem que as variáveis coletadas 10 a 15 minutos antes de um evento de conflito não fornecem informações confiáveis para justificar um evento de conflito, e não devem ser inseridas no modelo de previsão de conflitos. Tais resultados são corroborados por Islam *et al.* (2013), que afirma que se torna difícil justificar uma colisão/conflito causada por uma perturbação do tráfego ocorrida 10 a 15 minutos antes do evento.

Tabela 4: Desempenho médio de classificação do LDA-PCA para a proporção de 80-20%.

Desempenho da Classificação Média no Conjunto de Testes	Variáveis Retidas					
	1 Variável	2 Variáveis	3 Variáveis	4 Variáveis	5 Variáveis	6 Variáveis
Acurácia	0.6917	0.7002	0.7418	0.7406	0.7628	0.7703
Sensibilidade	0.7564	0.7801	0.8708	0.8782	0.8702	0.8325
Especificidade	0.6545	0.6156	0.6216	0.6235	0.6811	0.7400
Desvio Padrão da Acurácia	0.1210	0.0950	0.0980	0.0920	0.0922	0.0951
Desvio Padrão da Sensibilidade	0.1165	0.1154	0.1153	0.1234	0.1250	0.1298
Desvio Padrão da Especificidade	0.1226	0.1331	0.1334	0.1313	0.1342	0.1338

A Tabela 5 apresenta o desempenho de classificação no conjunto de teste estabelecido para ambos os índices assumindo que 5 variáveis são mantidas; decidiu-se manter esse número de variáveis devido aos níveis de sensibilidade mais altos; uma remoção posterior levaria a níveis de acurácia mais baixos.

Tabela 5: Desempenho de classificação no conjunto de teste para ambos os índices, quando 5 variáveis são mantidas.

Desempenho da Classificação Média no Conjunto de Testes	5 Variáveis Retidas	
	Distância LDA - Bhattacharyya	LDA - PCA
Acurácia	0.7445	0.7628
Sensibilidade	0.7865	0.8702
Especificidade	0.7299	0.6811
Desvio Padrão da Acurácia	0.0925	0.0922
Desvio Padrão da Sensibilidade	0.1340	0.1250
Desvio Padrão da Especificidade	0.1322	0.1342

Os resultados sugerem que LDA-PCA (isto é, LDA usando a ordem sugerida pelo índice v_j^P) supera o modelo LDA-Bhattacharyya quando a sensibilidade é avaliada: a primeira apresenta uma média de 0.8702, enquanto a segunda conduz tem uma média de 0.7865. Uma

vez que a maior sensibilidade é tipicamente o objetivo principal, entende-se que o LDA-PCA oferece um modelo mais confiável para prever conflitos.

4.4 MODELO DE PREVISÃO DE CONFLITOS

Dado o desempenho superior do modelo PCA, foi inserido as 5 variáveis sugeridas pela estrutura PCA em um modelo LDA adaptado para prever a ocorrência de conflitos na rodovia avaliada em tempo real. A função LDA resultante, denominada Modelo de Previsão de Conflitos (CPM), é representada na equação (5); apresenta um Lambda de Wilk = 0.565 e um valor de $p = 0.001$, indicando que o modelo explica corretamente as diferenças entre as classes e é significativo. Os valores CPM positivos indicam a ocorrência de um evento de conflito, enquanto os valores negativos apontam para um estado sem conflito.

$$\begin{aligned} CPM = & -4,784 + 0,001(Total.Flow_5) + 0,00019(Total.Flow_{10}) - \\ & 67,496(Diff.Std.Dev.Occ_5) + 4,173(Diff.Std.Dev.Occ_{10}) + \\ & 7,339(Coeff.Var.Speed_5) \end{aligned} \quad (5)$$

As cinco variáveis que melhor predizem a ocorrência de conflitos são aquelas relacionadas ao fluxo total 0-5 e 5-10 minutos antes de um conflito (o coeficiente de variação da velocidade nos cinco minutos anteriores a um conflito e a diferença entre o desvio padrão da ocupação das faixas para 0-5 e 5-10 minutos antes de um conflito ocorrer). As variáveis *Total.Flow* e *Coeff.Var.Speed* são consistentes com os resultados apontados por estudos anteriores. Além disso, a magnitude dos coeficientes na função LDA indicou que as variáveis associadas a períodos mais próximos a um evento de conflito (isto é, 0-5 minutos) têm maior impacto na previsão de conflitos, o que parece lógico, uma vez que os estados operacionais mais próximos desses eventos devem ser mais relevantes.

A variável que contabiliza a diferença entre o desvio padrão da ocupação das faixas (*Diff.Std.Dev.Occ*) foi criada para contabilizar a heterogeneidade do padrão de tráfego entre faixas. Esta variável mostrou-se eficaz na identificação das diferenças entre faixas (condição típica de rodovias brasileiras), contribuindo para uma maior acurácia e sensibilidade na classificação.

Entende-se que o coeficiente relativamente menor das variáveis *Total.Flow* é devido à magnitude dos valores das variáveis em sua escala original (veículos por hora). Os coeficientes

positivos para variáveis associadas ao fluxo total (isto é, as variáveis *Total.Flow_5* e *Total.Flow_10*) indicam que taxas de fluxo mais altas aumentam a probabilidade de uma ocorrência de conflito; assim, quanto mais próximo o fluxo estiver da capacidade da rodovia, maior a probabilidade de um conflito. O coeficiente positivo da variável *Coeff.Var.Speed_5* sugere que velocidades médias mais baixas, que normalmente são verificadas durante eventos de congestionamento, contribuem para a ocorrência de conflitos. Uma maior variabilidade nas velocidades (indicada por altos níveis de desvio padrão nessa variável), que também são percebidos na rodovia em estudo próximo a períodos de congestionamento, também contribuirá para os conflitos.

5. SELEÇÃO E CALIBRAÇÃO DO SIMULADOR DE TRÁFEGO

O objetivo principal desta calibração foi avaliar a adequabilidade do microssimulador VISSIM para representar conflitos veiculares. Para isso, foi investigado se o VISSIM e o SSAM podem fornecer uma relação razoável entre conflitos simulados e medidos em campo para uma rodovia brasileira, em especial para o trecho em estudo.

5.1 SELEÇÃO DO SIMULADOR

O software de microssimulação VISSIM foi selecionado para análise, pois apresenta condições de modelagem distintas para diferentes tipos de veículos, que podem incluir automóveis, caminhões e ônibus, e usa uma função com distribuição estocástica de velocidades desejadas completamente editável para cada tipo de veículo. Gao *et al.* (2002) e Ratrou e Rahman (2009) apontam que o VISSIM se destaca pela capacidade de modelar de forma simples e satisfatória os veículos individualmente e também interações entre veículos.

Uma particularidade do VISSIM é que o modelo também possui um algoritmo de *car following* específico para tráfego rodoviário, com diversos parâmetros editáveis. Possuir um algoritmo específico para rodovias foi um fator determinante na escolha deste modelo de simulação para análise. Através de uma revisão de trabalhos de modelagem, Gettman e Head (2003) apontam que o VISSIM possui um melhor controle de parâmetros referentes às trocas de faixa. Um bom controle de troca de faixas e de *car following* é essencial para a modelagem deste estudo, uma vez que para altas intensidades de fluxo estes parâmetros possuem grande influência no comportamento do trecho.

Outro software, utilizado em conjunto com o software VISSIM, foi o Surrogate Safety Assessment Model (SSAM) – proposto por uma equipe de pesquisa da SIEMENS e patrocinada pela Federal Highway Administration (FHWA) dos Estados Unidos. SSAM utiliza os arquivos de trajetória dos veículos no espaço-tempo, produzidos por modelos de simulação microscópica para realizar “análises de conflito entre veículos”. A abordagem SSAM utiliza vários algoritmos para identificar conflitos entre trajetórias de veículos gerados por modelos de simulação microscópicos populares, tais como VISSIM, PARAMICS, AIMSUN e TEXAS (GETTMAN *et al.*, 2008).

O objetivo primário desta calibração foi investigar se o modelo de microsimulação VISSIM e o SSAM podem fornecer uma relação razoável entre conflitos simulados e medidos em campo para uma rodovia brasileira, em especial para o trecho em estudo.

Condições climáticas adversas podem reduzir a distância de visão dos motoristas e aumentar a distância de parada dos veículos, e acidentes de trânsito podem causar perturbações no comportamento do tráfego em pontos isolados. Estas condições são particularmente complexas de serem modeladas em modelos de microsimulação. Com isso, todas as observações de fluxo-velocidade, em períodos de chuva ou em períodos de acidentes foram retiradas do banco de dados. Este processo foi baseado no estudo de Caleffi *et al.* (2016).

5.2 REVISÃO DA LITERATURA SOBRE CALIBRAÇÃO DE CONFLITOS EM RODOVIAS

Como os dados de colisão confiáveis nem sempre estão disponíveis, nos últimos anos, os conflitos de tráfego têm sido usados como medidas de segurança substituta para a avaliação da segurança tanto para o tráfego urbano como para o tráfego rodoviário. Esses conflitos ajudam a identificar condições de tráfego perigosas onde estratégias proativas de prevenção são necessárias para mitigar a alta probabilidade de colisão (ROSHANDEL; ZHENG; WASHINGTON, 2015).

Nos últimos anos, modelos microscópicos de simulação de tráfego têm sido empregados para a realização de avaliações de segurança baseadas em conflitos. Os modelos de simulação têm sido amplamente utilizados para avaliar o desempenho de várias rodovias em termos de medidas como capacidade, tempo de viagem, atraso e nível de serviço. Existe um interesse crescente na utilização de modelos de simulação para a avaliação da segurança das rodovias através da análise das trajetórias dos veículos e da estimativa dos indicadores de conflito. Esta abordagem pode ter várias vantagens, tais como: (i) os modelos de simulação têm a capacidade de representar várias opções de concepção e operação de tráfego das rodovias; (ii) os modelos de simulação superam as limitações de observar manualmente os conflitos de tráfego, conforme discutido anteriormente (ESSA; SAYED, 2015a; GETTMAN; HEAD, 2003).

O software SSAM faz uso de vários algoritmos para identificar conflitos através de arquivos de trajetória de veículos, gerados por modelos de simulação microscópicos. Vários indicadores de conflito de tráfego são calculados incluindo o tempo de colisão (TTC), tempo

de pós-invasão (PET), velocidade de desaceleração dos veículos (DR), velocidade máxima (MaxS) e diferencial de velocidade (DeltaS). No SSAM, os conflitos são identificados com base em limiares específicos para TTC e PET e são classificados em três tipos de manobra: conflitos traseiros (veículo perseguidor entre em conflito com o veículo líder); conflitos por mudança de faixa; e conflitos em cruzamento (ESSA; SAYED, 2015b; GETTMAN *et al.*, 2008; HUANG *et al.*, 2013).

A principal preocupação com a abordagem SSAM é a validade do uso de conflitos simulados para avaliação de segurança. Como os veículos nos modelos de simulação seguem regras específicas visando evitar colisões, é difícil representar interações inseguras entre veículos. Além disso, os modelos de microssimulação têm muitos parâmetros de modelagem que podem causar um impacto significativo sobre os conflitos simulados (SAUNIER; SAYED, 2007; XU; TARKO; *et al.*, 2013). Portanto, estudos recentes têm focado na calibração de modelos de simulação para reproduzir com mais precisão o comportamento dos motoristas. A maioria desses estudos propõe calibrações para segmentos de tráfego urbano (CUNTO; SACCOMANNO, 2008; ESSA; SAYED, 2015a; GETTMAN *et al.*, 2008; HUANG *et al.*, 2013; ZHOU, HUANYUN; HUANG, 2013; ZHOU *et al.*, 2010). Apenas alguns estudos têm proposto calibrações para segmentos de rodovias (DUONG; SACCOMANNO; HELLINGA, 2010; FAN *et al.*, 2013). Os resultados podem variar significativamente dependendo da abordagem de modelagem.

Alguns estudos examinaram a calibração e validação de modelos de simulação e do SSAM para uso na avaliação de segurança de tráfego. Dijkstra *et al.* (2010) realizaram um estudo na Holanda com 569 junções. O modelo de microssimulação PARAMICS foi utilizado para modelar o tráfego. Verificou-se que o número de conflitos nas junções e o número de veículos que trafegam nas junções estão estatisticamente relacionados com o número de acidentes observados.

Fan *et al.* (2013) propuseram um procedimento de duas etapas usando VISSIM e SSAM para avaliação de segurança em áreas de fusão de rodovias. Os conflitos de campo foram coletados manualmente e comparados com conflitos simulados. Verificou-se que a calibração do VISSIM reduziu o erro percentual absoluto médio (MAPE) para os conflitos indicativos de colisão traseira e de mudança de faixa. Os resultados mostraram que havia uma consistência razoável entre os conflitos simulados e os observados. Huang *et al.* (2013) compararam os conflitos simulados gerados pelo VISSIM e SSAM com conflitos de campo coletados

manualmente em intersecções sinalizadas. Foi proposto um procedimento de calibração onde um limiar mínimo de TTC foi calibrado para gerar um MAPE mínimo. Zhou *et al.* (2010) e Zhou e Huang (2013) também desenvolveram uma metodologia de calibração em dois estágios baseada na otimização experimental. Seis grupos de dados de 3 intersecções foram pesquisados e utilizadas para calibração e validação do VISSIM e SSAM. Os resultados indicaram a viabilidade e a validade dos métodos propostos.

Essa e Sayed (2015a) desenvolveram um procedimento de calibração em duas etapas que propunha melhorar a correlação entre os conflitos simulados e os medidos em campo. O primeiro passo de calibração consistiu em combinar condições de campo reais, tais como velocidade desejada e fluxo, para assegurar que o VISSIM fornecesse valores reais de atraso médio. O segundo passo empregou uma análise de sensibilidade seguida de um algoritmo genético (GA) para calibrar os parâmetros de *car following* e de trocas de faixa do VISSIM que têm o maior efeito nos conflitos simulados. Mapas de calor para os conflitos foram usados para comparar locais de conflito de medidos em campo com os simulados. Os resultados mostraram que apesar de uma boa compatibilidade da frequência dos conflitos, os locais dos conflitos são diferentes.

Como mencionado anteriormente, as particularidades de trânsito das rodovias brasileiras incluem congestionamentos frequentes e condições de tráfego muito heterogêneas. Normalmente, cada faixa da rodovia apresenta diferentes velocidades médias, taxas de fluxo e composição do tráfego. A ultrapassagem é frequente e, nestas condições, muito perigosa (CALEFFI, MOISAN, CYBIS, 2016). Assim, os modelos VISSIM e SSAM podem ajudar a avaliar os conflitos de veículos em diferentes condições de tráfego, e podem auxiliar futuramente na segurança da rodovia.

Neste estudo, as trajetórias dos veículos e a identificação de conflitos em campo foram extraídas através de técnicas semiautomáticas de visão computacional. As medidas de conflito foram determinadas e comparadas com conflitos simulados no VISSIM usando a ferramenta SSAM. Para aumentar a correlação entre conflitos simulados e os coletados em campo, este estudo propõem um procedimento de calibração do trecho em estudo no VISSIM, com o intuito de avaliar se o VISSIM + SSAM fornecem estimativas razoáveis para os conflitos medidos em campo.

5.3 MÉTODO PROPOSTO DE CALIBRAÇÃO DO VISSIM

Como apontado por (AGARWAL; MAZE; SOULEYRETTE, 2005; GETTMAN *et al.*, 2008; JIA *et al.*, 2014; THAKURIAH *et al.*, 2008), condições climáticas adversas podem reduzir a distância de visão dos motoristas e aumentar a distância de parada dos veículos, e acidentes de trânsito podem causar perturbações no comportamento do tráfego em pontos isolados. Estas condições são particularmente complexas de serem modeladas em modelos de microsimulação. Como o objetivo desta calibração é garantir que o modelo represente com precisão as condições de fluxo-velocidade típicas da rodovia em estudo, bem como os conflitos que ocorrem entre veículos, um tratamento prévio do banco de dados foi realizado com o intuito de caracterizar a influência que as condições climáticas adversas e acidentes têm no comportamento do tráfego no trecho em estudo. Esta caracterização é baseada em Caleffi *et al.* (2016), onde é proposto a aplicação de métodos de agrupamento de observações (clusterização) para caracterizar o comportamento do tráfego da rodovia BR-290/RS, na região metropolitana da cidade de Porto Alegre – RS. Dessa forma, todas as observações de fluxo-velocidade, em períodos de chuva ou em períodos de acidentes, foram retiradas do banco de dados.

O processo de desenvolvimento do modelo de simulação no VISSIM iniciou a partir da especificação de todas as características geométricas da rodovia em estudo. Em seguida, regras de prioridade e áreas de conflito também foram adicionadas no modelo de simulação para refletir com precisão os movimentos reais dos veículos. O VISSIM foi codificado para representar o intervalo de tempo que varia entre 06:00 as 14:00 horas durante a semana (segunda a sexta-feira). Portanto, o modelo de simulação foi ajustado para replicar todo o pico matutino durante uma simulação.

Os procedimentos de calibração e validação propostos neste estudo buscam representar no VISSIM as relações fluxo-velocidade e os conflitos coletados em campo, e visam ainda ajustar os limiares dos parâmetros presentes no SSAM para permitir uma avaliação dos conflitos gerados pelo VISSIM.

Em primeiro lugar, o modelo foi calibrado para garantir que a simulação representasse satisfatoriamente todas as distribuições de velocidades e fluxos por faixa, bem como as composições dos veículos, conforme mencionado nas seções anteriores. Testes de qui-quadrado mostraram que as diferenças nas distribuições das taxas de fluxo de tráfego e velocidades observadas no campo e nos modelos de simulação não foram estatisticamente significativas.

Em seguida, os parâmetros de *car following* e de trocas de faixa no VISSIM foram calibrados para melhorar a correlação entre os conflitos simulados e os reais, e entre as relações fluxo-velocidade simuladas e medidas em campo. A relação fluxo-velocidade foi escolhida porque os parâmetros usuais usados em procedimentos de calibração, como o tempo de viagem, não estavam disponíveis. Os parâmetros de comportamento dos condutores foram calibrados utilizando dados de campo do km 96, enquanto que os dados do km 87 foram utilizados para investigar a transferibilidade do modelo de simulação calibrado. Os dados do km 94 foram utilizados para realizar o procedimento de calibração de conflitos e os dados do km 92 foram utilizados para validação.

Foi realizada uma análise de sensibilidade para determinar os parâmetros importantes que têm maior efeito na rede simulada. Foram considerados na análise de sensibilidade vinte e cinco parâmetros de comportamento de condução, que representam parâmetros de *car following* e de trocas de faixas. Para cada parâmetro, uma gama de 5 valores – que incluiu o valor default – foi testada. Estes valores foram determinados com base em estudos anteriores e julgamento de engenharia. Uma análise de variância (ANOVA) foi aplicada para a realização da análise de sensibilidade.

Após a realização da análise de sensibilidade, o modelo foi calibrado utilizando uma análise combinatória com apenas os parâmetros selecionados na análise de sensibilidade. Novamente, utilizou-se uma gama de valores para cada parâmetro, com base em estudos anteriores e no julgamento de engenharia.

Neste estudo, heurísticas não foram utilizadas para automatizar o procedimento de calibração do modelo. Isto foi feito por duas razões principais: (i) garantir que todos os valores das combinações de parâmetros são testados com as análises combinatórias, atingindo assim o melhor ajuste; e (ii) mapear todos os resultados das combinações, porque o objetivo é analisar tanto as relações de fluxo-velocidade quanto os conflitos.

Foram utilizados dois valores fitness para avaliar o processo de calibração. Os valores fitness foram definidos como o erro percentual absoluto médio da relação fluxo-velocidade ($MAPE_{SFR}$), e o erro percentual absoluto médio dos conflitos ($MAPE_{Conflicts}$). O MAPE foi calculado para medir a diferença entre os conflitos e as relações fluxo-velocidade simulados e os observados em campo. Para os conflitos, o MAPE pode ser estimado utilizando a seguinte equação:

$$MAPE_{Conflicts} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{Conflicts_{field}^i - Conflicts_{Sim}^i}{Conflicts_{field}^i} \right| \quad (6)$$

Onde, n representa o número de observações; $Conflicts_{Sim}^i$ representa os conflitos simulados para o intervalo de tempo i ; e $Conflicts_{field}^i$ são os conflitos observados em campo para o intervalo de tempo i . Para as relações fluxo-velocidade, $MAPE_{SRF}$ foi calculado como a soma do erro percentual absoluto médio das velocidades médias ($MAPE_{AS}$) e do fluxo total ($MAPE_{TF}$) para cada quadrante presente na Figura 8. Os dados foram agrupados em intervalos de 5 minutos.

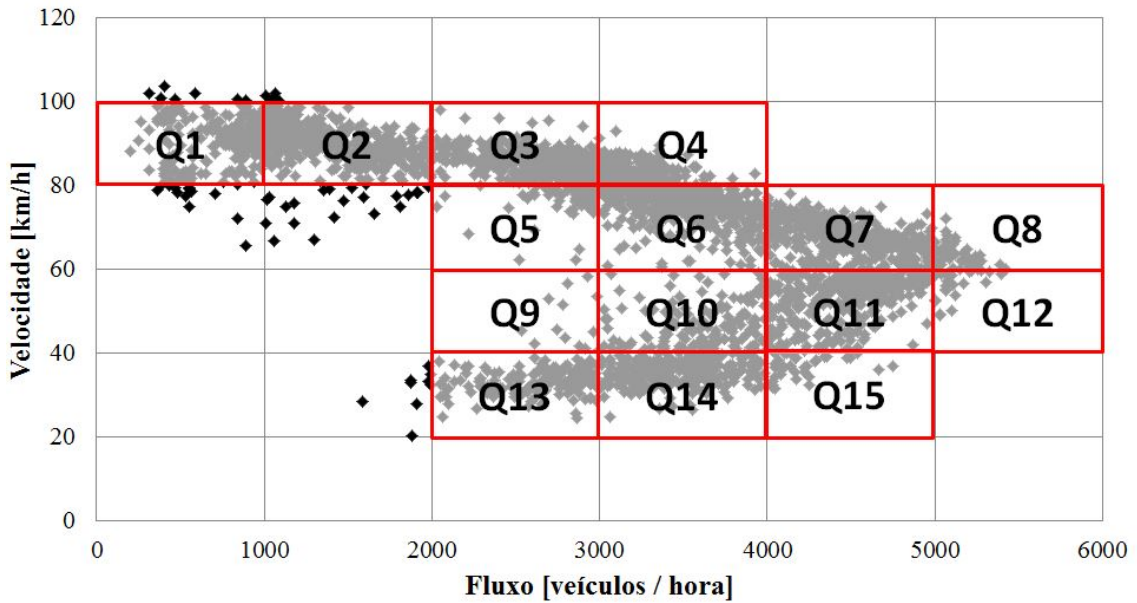


Figura 8: Relação fluxo-velocidade no km 96, para o mês de maio de 2013, com os quadrantes avaliados.

Para as velocidades médias (equação 7) e o fluxo total por quadrante (equação 8), o MAPE pode ser estimado usando as seguintes equações:

$$MAPE_{AS}^Q = \left| \frac{AS_{field}^Q - AS_{Sim}^Q}{AS_{field}^Q} \right| \quad (7)$$

$$MAPE_{TF}^Q = \left| \frac{TF_{field}^Q - TF_{Sim}^Q}{TF_{field}^Q} \right| \quad (8)$$

Onde Q representa cada quadrante; $AS^{Q_{Sim}}$ representa a velocidade média simulada para o quadrante Q ; $AS^{Q_{field}}$ representa a velocidade média simulada para o quadrante Q ; $TF^{Q_{Sim}}$ representa o fluxo total simulado para o quadrante Q ; e $TF^{Q_{field}}$ representa o fluxo total observado em campo para o quadrante Q .

Para as relações fluxo-velocidade, o MAPE para cada quadrante pode ser estimado usando a seguinte equação:

$$MAPE_{SRF}^Q = MAPE_{AS}^Q + MAPE_{TF}^Q \quad (9)$$

O “MAPE_{SRF} Final” é então calculado através da média ponderada de todos os quadrantes MAPE_{SRF} (isto é, ponderada pelo número de observações em cada quadrante). Portanto, os quadrantes com maior quantidade de observações têm um peso maior no MAPE Final, e podem ser estimados usando a equação 10, onde N_{OBS} é o número total de observações – somados todos os quadrantes.

$$MAPE_{SRF} Final = \frac{1}{N_{OBS}} \sum_{Q=1}^{15} MAPE_{SRF}^Q * N_{OBS}^Q \quad (10)$$

Análises de regressão linear foram realizadas para identificar se os conflitos de tráfego simulados forneceram estimativas razoáveis em relação aos conflitos de tráfego observados em campo. Modelos de regressão linear foram ajustados para relacionar os conflitos simulados com diferentes tipos de conflitos de campo (ou seja, conflitos traseiros, conflitos por mudança de faixa e conflitos totais).

A validade dos modelos VISSIM e SSAM calibrados também foi testada comparando o ranking derivado de segurança com base nos conflitos simulados e observados em campo. O coeficiente de correlação de *Spearman rank* foi utilizado para avaliar a correlação entre esses dois níveis de segurança. O coeficiente de correlação *Spearman rank* é uma medida não paramétrica de dependência estatística entre duas variáveis. Ele avalia o quão bem a relação entre duas variáveis pode ser descrita usando uma função monotônica. Um coeficiente de correlação de classificação *Spearman* igual a 1 representa uma correlação perfeita, enquanto uma pontuação próxima a zero representa uma relação fraca entre duas variáveis. O coeficiente de correlação *Spearman rank* pode ser estimado usando a seguinte equação:

$$\rho_s = 1 - \frac{6 \sum_{i=1}^n d_i^2}{n(n^2 - 1)} \quad (11)$$

Onde d_i é a diferença entre as classificações de observação i ; n representa o número de observações no conjunto de dados de validação.

Para validar o procedimento de calibração proposto, os km 92 e 87 foram utilizados como um conjunto de dados de validação. O Km 87 foi usado para identificar a transferibilidade da relação fluxo-velocidade do modelo calibrado, enquanto o km 92 foi usado para os conflitos. Ambos os locais possuem as mesmas condições de tráfego e características geométricas que o segmento de calibração.

5.4 PROCEDIMENTOS DE CALIBRAÇÃO DO VISSIM

É importante destacar novamente que o TTC medido nos locais selecionados (km 92 e km 94 – dados coletados através de câmeras de monitoramento) variou de 0,5 a 3,6 segundos, com uma média de 2,0 segundos. Os conflitos de tráfego observados foram classificados como: (i) conflitos indicativos de colisão traseira; e (ii) conflitos de mudança de faixa. Um total de 3756 conflitos foram observados e identificados nos locais selecionados, incluindo 2291 conflitos de colisão traseira (61%) e 1465 conflitos de mudança de faixa (39%). O elevado número de conflitos de mudança de faixa enfatiza as peculiaridades do tráfego nas rodovias brasileiras, onde ultrapassagens e a mudança de faixa são frequentes devido à alta diferença nas velocidades médias e nos fluxos por faixa, conforme apresentado na Figura 5, no Capítulo 3.

Em primeiro lugar, o modelo foi calibrado para garantir que a simulação representasse satisfatoriamente todas as distribuições de velocidades e fluxos por faixa, bem como as composições dos veículos, conforme mencionado nas seções anteriores. Testes de qui-quadrado mostraram que as diferenças nas distribuições das taxas de fluxo de tráfego e velocidades observadas no campo e nos modelos de simulação não foram estatisticamente significativas. Em seguida, os parâmetros de *car following* e de trocas de faixa no VISSIM foram calibrados para melhorar a correlação entre os conflitos simulados e os reais, e entre as relações fluxo-velocidade simuladas e medidas em campo. A relação fluxo-velocidade foi escolhida porque os parâmetros usuais usados em procedimentos de calibração, como o tempo de viagem, não estavam disponíveis. Os parâmetros de comportamento dos condutores foram calibrados utilizando dados de campo do km 96, enquanto que os dados do km 87 foram utilizados para investigar a transferibilidade do modelo de simulação calibrado. Os dados do km 94 foram

utilizados para realizar o procedimento de calibração de conflitos e os dados do km 92 foram utilizados para validação.

5.4.1 Análise de sensibilidade

O VISSIM contém um grande número de parâmetros (cerca de 190), o que pode tornar o processo de calibração muito longo e complexo. No entanto, o foco deste estudo é a calibração dos parâmetros de comportamento dos condutores, que controlam a forma como os veículos se comportam e interagem durante a simulação. Neste estudo, utilizou-se o modelo de *car following* Wiedemann-99 presente no VISSIM, uma vez que foi sugerido pelo manual do usuário que este modelo é principalmente adequado para o tráfego em rodovias (PTV, 2014).

Para simplificar o processo de calibração, foi realizada uma análise de sensibilidade para determinar os parâmetros importantes que têm maior efeito na rede simulada. Foram considerados na análise de sensibilidade vinte e cinco parâmetros de comportamento de condução, que representam parâmetros de *car following* e de trocas de faixas. Para cada parâmetro, uma gama de cinco valores – que incluiu o valor default – foi testada. Estes valores foram determinados com base em estudos anteriores, como Huang *et al.* (2013), Yu e Abdel-Aty (2014) e Essa e Sayed (2015a).

Nesta etapa, o tempo médio de viagem para a rede simulada foi usado como uma medida de eficácia para determinar se o parâmetro de comportamento testado tem influência significativa no resultado do modelo ou não. Cada parâmetro de comportamento foi simulado individualmente, mantendo os outros com valores padrão. Cada simulação envolveu um período relativo a uma hora, com 3 sementes aleatórias, num total de 375 simulações (25 parâmetros X 5 valores X 3 sementes aleatórias). A semente aleatória permite replicar a natureza estocástica do fluxo de tráfego e suas variações temporais, alterando o padrão de chegada de veículos (PTV, 2014).

Uma análise de variância (ANOVA) foi aplicada para a realização da análise de sensibilidade. A Tabela 6 resume os resultados da análise de sensibilidade e destaca em negrito os 6 parâmetros mais importantes. Estes parâmetros são CC0 (distância de parada), CC1 (tempo de headway), CC2 (variação de *following*), CC3 (espaçamento para entrar em *following*), CC4 e CC5 (limites de *following* positivos e negativos) e "Fator de redução de distância segura". Uma descrição detalhada dos parâmetros pode ser encontrada em (PTV, 2014).

Tabela 6. Análise de sensibilidade – ANOVA.

ANOVA Test (Alpha = 0,05)						
Nº	Following Parameters	MS	F	P-Value	Fcrit.	Significant
1	CC0 (Standstill distance)	44,1000	22,0500	0,0015	5,3177	Yes
2	CC1 (Headway time)	220,9000	7,0350	0,0291	5,3177	Yes
3	CC2 (Following variation)	722,5000	7,2577	0,0273	5,3177	Yes
4	CC3 (Threshold of entering following)	1960,0000	18,9739	0,0024	5,3177	Yes
5	CC4&CC5 (Negative and positive following thresholds)	144,4000	15,2000	0,0046	5,3177	Yes
6	CC6 (Speed dependency of oscillation)	0,0572	0,0681	0,8007	5,3177	No
7	CC7 (Oscillation acceleration)	2,8063	4,9747	0,0563	5,3177	No
8	CC8 (Standstill acceleration)	0,2247	0,2105	0,6586	5,3177	No
9	CC9 (Acceleration at 80 km/h)	0,0451	0,0838	0,7796	5,3177	No
10	Look ahead distance (Min.)	1,3468	1,5128	0,2537	5,3177	No
11	Look ahead distance (Max.)	1,3521	1,6183	0,2391	5,3177	No
12	Observed vehicles	3,4300	3,8305	0,0860	5,3177	No
13	Look back distance (Min.)	0,8424	1,9741	0,1976	5,3177	No
14	Look back distance (Max.)	0,0844	0,0824	0,7813	5,3177	No
15	Temporary lack of attention (Duration and Percentage)	2,5496	2,7793	0,1341	5,3177	No
Lane Change Parameters						
16	Max. deceleration (Own)	0,8073	0,8851	0,3743	5,3177	No
17	Max. deceleration (Trailing)	0,0055	0,0054	0,9430	5,3177	No
18	-1m/s ² per distance (Own)	3,2049	3,8954	0,0839	5,3177	No
19	-1m/s ² per distance (Trailing)	0,5153	0,7024	0,4263	5,3177	No
20	Accepted deceleration (Own)	0,7043	1,0477	0,3360	5,3177	No
21	Accepted deceleration (Trailing)	1,9335	2,7157	0,1380	5,3177	No
22	Waiting time before diffusion	0,0163	0,0262	0,8755	5,3177	No
23	Min. headway (front/rear)	0,9798	0,8151	0,3930	5,3177	No
24	Safety distance reduction factor	78,4000	62,7200	0,0000	5,3177	Yes
25	Max. deceleration for cooperative braking	1,0316	2,2804	0,1695	5,3177	No

5.4.2 Processos de calibração

Após a realização da análise de sensibilidade, o modelo foi calibrado utilizando uma análise combinatória com apenas os parâmetros selecionados na análise de sensibilidade. Novamente, utilizou-se uma gama de valores para cada parâmetro, com base em estudos anteriores. A Tabela 7 apresenta os parâmetros selecionados com seus respectivos valores de intervalo.

Tabela 7. Parâmetros selecionados na análise de sensibilidade e seus valores empregados.

Following Parameters	Min.	Max.	Intervalo
CC1 (Headway time)	0,9	1,2	0,1
CC2 (Following variation)	2,3	2,8	0,1
CC3 (Threshold of entering following)	-5,3	-5,8	0,1
CC4&CC5 (Negative and positive following thresholds)	$\pm 0,3$	$\pm 0,7$	0,1
Lane Change Parameter	min	máx	Intervalo
Safety distance reduction factor	0,2	0,5	0,1

Uma vez que CC0 (distância de parada) define a distância desejada entre dois veículos parados, esta variável pôde ser facilmente medida através das análises de vídeo. O valor médio que melhor representa esse parâmetro é $CC0 = 1,4$ metros. Foram realizadas 8640 simulações (5 parâmetros X 3 sementes aleatórias) na análise combinatória.

Foram utilizados dois valores fitness para avaliar o processo de calibração. Os valores fitness foram definidos como o erro percentual absoluto médio da relação fluxo-velocidade ($MAPE_{SFR}$), e o erro percentual absoluto médio dos conflitos ($MAPE_{Conflicts}$). O MAPE foi calculado para medir a diferença entre os conflitos e as relações fluxo-velocidade simulados e os observados em campo.

5.4.3 Resultados da calibração

O procedimento de calibração proposto melhorou a correlação entre as medidas simuladas e as observações de campo tanto para relações de fluxo-velocidade como para os conflitos. Como esperado, os valores dos parâmetros que aumentaram a correlação entre relações fluxo-velocidade também otimizaram a correlação entre conflitos. Apenas um parâmetro, (CC3), teve um valor diferente que “otimizou” as correlações. A Tabela 8 apresenta os parâmetros calibrados com seus respectivos valores default e os valores após a calibração. A Tabela 9 apresenta os valores MAPE calibrados que otimizaram as correlações, ressaltando os

diferentes valores de (CC3). A Tabela 9 também apresenta os valores MAPE com todos os parâmetros definidos com seus respectivos valores default.

Tabela 8. Valores de dos parâmetros default x calibrado.

Following Parameters	Relação fluxo-velocidade		Conflitos
	Default	Após a Calibração	Após a Calibração
CC0 (Standstill distance)	1,5	1,4	1,4
CC1 (Headway time)	0,9	1,1	1,1
CC2 (Following variation)	4,0	2,6	2,6
CC3 (Threshold of entering following)	-8,0	-5,6	-5,5
CC4&CC5 (Negative and positive following thresholds)	±0,35	±0,5	±0,5
Lane Change Parameter	Default	Após Calibração	Antes da Calibração
Safety distance reduction factor	0,6	0,3	0,3

Tabela 9. Valores MAPE para os parâmetros default x calibrados.

		MAPE _{SRF} Final	MAPE _{Conflicts}
Modelo Calibrado	CC3 = -5,5	1,09%	8,60%
	CC3 = -5,6	1,01%	8,84%
Todos os Parâmetros Default		87,94%	79,62%

A grande diferença entre os valores MAPE para o modelo calibrado e o modelo com seus parâmetros default pode ser explicada pelas características do tráfego brasileiro. Como mencionado anteriormente, o tráfego é muito heterogêneo, com cada faixa apresentando diferentes velocidades médias, taxas de fluxo e composição do tráfego, levando a uma alta frequência de ultrapassagens e trocas de faixa. Os valores dos parâmetros default do VISSIM não representam esse comportamento agressivo e, portanto, tendem a reduzir o número de conflitos. Para a relação fluxo-velocidade, uma vez que a capacidade total da rodovia é de 5100 veículos por hora, o modelo padrão aumenta a capacidade em 1200 veículos por hora. Esta diferença deve-se principalmente às características heterogêneas do tráfego. Com maior capacidade no modelo default, condições de *breakdown* acontecem com menos frequência, levando a um ambiente mais seguro.

No modelo calibrado, uma vez que o MAPE_{SRF} aumenta apenas 0,08% para o MAPE_{Conflicts} mais baixo, (CC3 = -5,5) foi escolhido como o melhor valor para este parâmetro. A calibração proposta também aumentou a correlação entre os limiares de TTC simulados e os

observados em campo, como ilustra a Figura 9. A figura apresenta a correlação do modelo calibrado; e o modelo com os valores dos parâmetros default. No SSAM, um conflito foi identificado quando o valor mínimo de TTC entre dois veículos convergentes excedeu o valor de limiar pré-definido. O valor limite de TTC no SSAM tem um grande impacto sobre o número de conflitos simulados. O intervalo de TTC no SSAM foi ajustado de 0,5 segundos a 3,6 segundos, de acordo com o intervalo medido no campo.

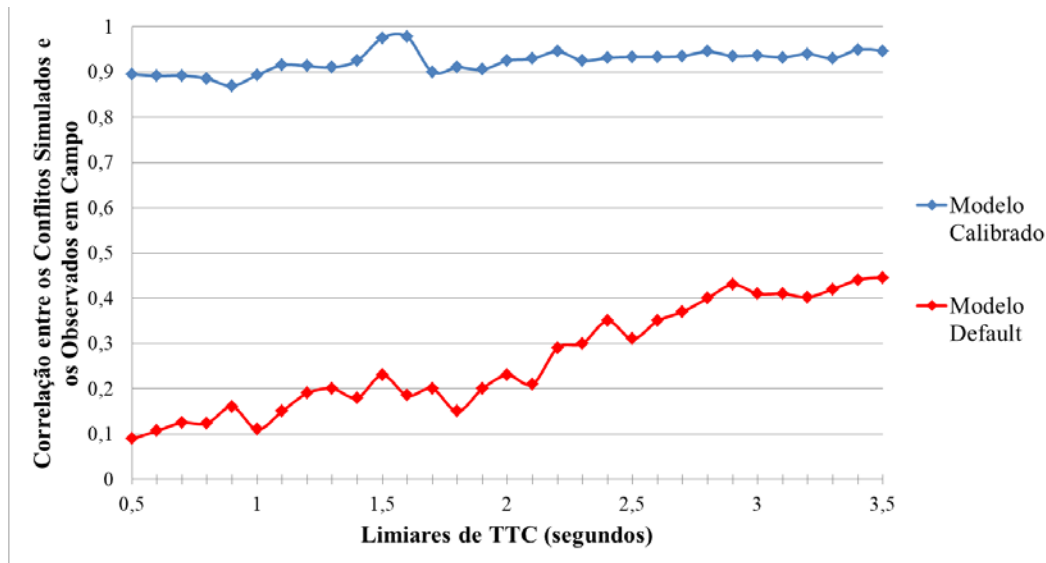


Figura 9: Correlação dos limiares de TCC entre os conflitos simulados e os observados em campo.

Os resultados mostram que o modelo calibrado aumenta a correlação em todos os limiares de TTC, com a correlação variando de 0,88 a 0,98. A maior correlação em todos os TTCs pode ser explicada pelo fato de que com a calibração da relação fluxo-velocidade, o comportamento dos condutores no modelo pode ser assumido como sendo altamente compatível com o comportamento de campo, representando as interações entre veículos em todas as circunstâncias ou níveis de serviço. Para o modelo default do VISSIM, quanto maior o limiar de TTC, maior é a correlação. Isto pode ser explicado pelo fato de que para um TTC mais alto, há uma maior dependência da exposição representada no volume de tráfego, como concluído por (ESSA; SAYED, 2015a).

A calibração da relação fluxo-velocidade resultou em um $MAPE_{SFR}$ Final de 1,09%, indicando um ajuste satisfatório. Para melhor representar conflitos de campo, o comportamento do tráfego deve ser bem calibrado. Um $MAPE_{SFR}$ tão pequeno quanto o encontrado garante que o comportamento dos veículos é simulado adequadamente, levando a conflitos simulados que

combinam com medidas de campo. A Tabela 10 apresenta os valores de MAPE para as velocidades médias e para o fluxo total por quadrante, e o MAPE_{SRF} Final ponderado pelas observações em cada quadrante.

Tabela 10. Valores MAPE para as velocidades médias e fluxo total.

Quadrante	Observações por Quadrante	MAPE _{AS}	MAPE _{TF}	MAPE _{SRF}
Q1	548	0,40%	1,05%	1,45%
Q2	719	0,43%	1,51%	1,94%
Q3	1440	0,05%	0,15%	0,20%
Q4	539	0,03%	0,19%	0,22%
Q5	144	1,03%	0,30%	1,33%
Q6	624	1,20%	1,13%	2,33%
Q7	523	1,31%	0,26%	1,57%
Q8	91	0,02%	0,00%	0,02%
Q9	30	0,87%	0,22%	1,09%
Q10	602	0,41%	0,38%	0,79%
Q11	857	0,31%	0,00%	0,31%
Q12	68	0,23%	0,00%	0,23%
Q13	217	1,71%	2,57%	4,28%
Q14	391	1,18%	0,52%	1,70%
Q15	53	0,51%	0,00%	0,51%
Total	6846		MAPE _{SRF} Final	1,09%

A Figura 10 apresenta as relações fluxo-velocidade das medidas de campo no km 96 e para o modelo calibrado. Os dados foram agrupados em intervalos de 5 minutos.

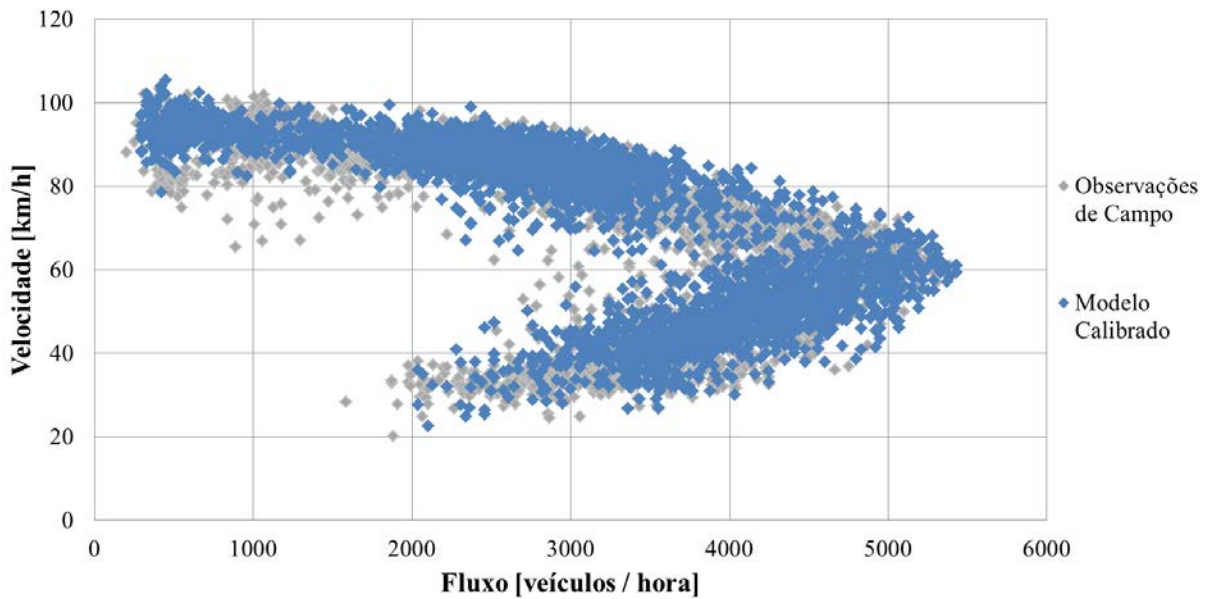


Figura 10: Relações fluxo-velocidade do modelo calibrado e das observações de campo, para o km 96.

O modelo calibrado indica que toda a nuvem de fluxo-velocidade está bem combinada com as medidas de campo. Como mencionado, esta calibração é crucial para melhor representar o comportamento dos veículos, o que também leva a uma melhor representação dos conflitos. Sem esta calibração, os conflitos podem ter um pequeno $MAPE_{Conflicts}$, induzidos por uma combinação de parâmetros singular que não representam os comportamentos de campo.

No SSAM, os conflitos são classificados em três tipos de manobra: conflitos traseiros, conflitos por mudança de faixa e conflitos em cruzamento. O ângulo de conflito padrão é dado de 30° , o que indica que um conflito com um ângulo conflitante $<30^\circ$ será considerado um conflito de colisão traseira. Uma vez que o trecho de estudo é uma via livre sem interseções, os conflitos de cruzamento não acontecem. Como o ângulo conflitante definido pelo observador durante a coleta de dados pode ter alguma distorção, o ângulo de conflito padrão no SSAM foi ajustado até que a melhor consistência entre os conflitos simulados e os de campo tenha sido alcançada. O limite do ângulo conflitante com a melhor consistência foi definido como 29° .

O valor $MAPE_{Conflicts}$ para os conflitos totais do modelo calibrado variou de 1,3% a 19,35%, para o km 94, para diferentes intervalos de tempo de uma hora, conforme apresentado na Tabela 12. O valor geral médio do $MAPE_{Conflicts}$ foi de 8,60% para os conflitos totais, indicando uma boa correlação entre os conflitos simulados e as medidas de campo. Para os conflitos traseiros, o MAPE variou de 0,00% a 31,82%, com um valor médio de 8,92%. Quanto

aos conflitos de mudança de faixa, o MAPE variou de 3,45% a 36,11%, com um valor médio de 14,63%. Conforme mencionado, o VISSIM foi projetado para modelar o pico da manhã, que varia de 07:00 a 12:00 durante a semana, de segunda a sexta-feira (ou seja, 5 dias). Portanto, o modelo de simulação foi configurado para replicar cinco vezes o pico da manhã durante uma simulação.

Análises de regressão linear também foram realizadas para identificar se os conflitos de tráfego simulados forneceram estimativas razoáveis em relação aos conflitos de tráfego observados em campo. Modelos de regressão linear foram ajustados para relacionar os conflitos simulados com diferentes tipos de conflitos de campo (ou seja, conflitos traseiros, conflitos por mudança de faixa e conflitos totais). Os resultados são apresentados na Figura 11. Verificou-se que as relações entre os conflitos simulados e os de campo foram estatisticamente significativas. O valor R^2 para o modelo de conflito total foi de 0,9592, indicando que os conflitos simulados explicaram 95,92% da variação medida em campo para os conflitos totais. Os modelos de regressão linear para os conflitos traseiros e de mudança de faixa também produziram altos valores de R^2 , com 0,9563 e 0,8907, respectivamente.

Tabela 11. Valores de $MAPE_{Conflicts}$ para conflitos traseiros, conflitos de mudança de faixa e total de conflitos no km 94.

km 94	Total Conflicts			Rear-end Conflicts			Lane-change Conflicts		
	Field Conflicts	Simulated Conflicts	MAPE	Field Conflicts	Simulated Conflicts	MAPE	Field Conflicts	Simulated Conflicts	MAPE
07:00	69	74	7,25%	42	45	7,14%	27	29	7,41%
08:00	75	83	10,67%	46	52	13,04%	29	31	6,90%
09:00	82	94	14,63%	50	58	16,00%	32	36	12,50%
10:00	54	57	5,56%	33	39	18,18%	21	18	14,29%
11:00	44	49	11,36%	27	29	7,41%	17	20	17,65%
12:00	31	32	3,23%	19	22	15,79%	12	10	16,67%
07:00	75	74	1,33%	46	46	0,00%	29	28	3,45%
08:00	77	79	2,60%	47	51	8,51%	30	28	6,67%
09:00	85	89	4,71%	52	54	3,85%	33	35	6,06%
10:00	53	57	7,55%	32	33	3,13%	21	24	14,29%
11:00	49	48	2,04%	30	32	6,67%	19	16	15,79%
12:00	38	35	7,89%	23	22	4,35%	15	13	13,33%
07:00	65	70	7,69%	40	43	7,50%	25	27	8,00%
08:00	72	77	6,94%	44	47	6,82%	28	30	7,14%
09:00	88	92	4,55%	54	53	1,85%	34	39	14,71%
10:00	61	67	9,84%	37	38	2,70%	24	29	20,83%
11:00	53	59	11,32%	32	39	21,88%	21	20	4,76%
12:00	30	33	10,00%	18	20	11,11%	12	13	8,33%
07:00	67	70	4,48%	41	42	2,44%	26	28	7,69%
08:00	74	71	4,05%	45	46	2,22%	29	25	13,79%
09:00	80	86	7,50%	49	51	4,08%	31	35	12,90%
10:00	56	54	3,57%	34	38	11,76%	22	16	27,27%
11:00	41	37	9,76%	25	26	4,00%	16	11	31,25%
12:00	36	30	16,67%	22	21	4,55%	14	9	35,71%
07:00	77	86	11,69%	47	50	6,38%	30	36	20,00%
08:00	82	89	8,54%	50	52	4,00%	32	37	15,63%
09:00	93	111	19,35%	57	62	8,77%	36	49	36,11%
10:00	59	65	10,17%	36	40	11,11%	23	25	8,70%
11:00	47	56	19,15%	29	35	20,69%	18	21	16,67%
12:00	36	41	13,89%	22	29	31,82%	14	12	14,29%
Total	1849	1965		1129	1215		720	750	
Average MAPE			8,60%			8,92%			14,63%

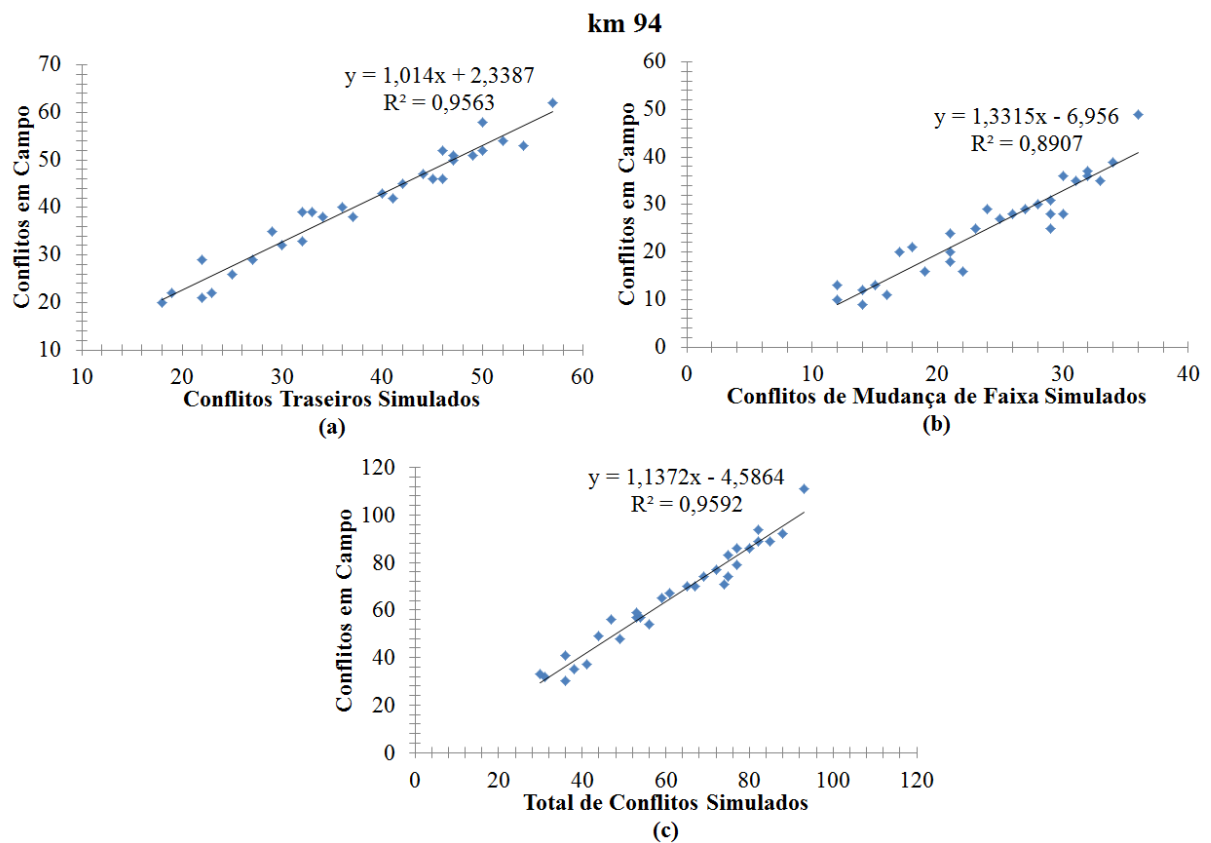


Figura 11: Relação entre os conflitos simulados e observados em campo, para o km 94.

A validade dos modelos VISSIM e SSAM calibrados também foi testada comparando o ranking derivado de segurança com base nos conflitos simulados e observados em campo. O coeficiente de correlação de *Spearman rank* foi utilizado para avaliar a correlação entre esses dois níveis de segurança.

O coeficiente de correlação *Spearman rank* foi de 0,9826, indicando uma razoável adesão entre as classificações dos conflitos observados em campo com os conflitos simulados gerados com a abordagem SSAM.

5.4.4 Transferibilidade dos modelos simulados

Para validar o procedimento de calibração proposto, os km 92 e 87 foram utilizados como um conjunto de dados de validação. Km 87 foi usado para identificar a transferibilidade da relação fluxo-velocidade do modelo calibrado, enquanto o km 92 foi usado para os conflitos. Conforme apresentado na Seção 3, esses locais possuem as mesmas condições de tráfego e características geométricas que o segmento de calibração.

A correlação entre a relação fluxo-velocidade simulada e a observada em campo no km 87 produziu um valor final $MAPE_{SRF}$ de 1,32%, indicando uma boa transferibilidade do modelo quanto à representação do comportamento dos veículos, bem como os níveis de serviço do tráfego. Para o km 92, análises de regressão linear também foram realizadas para identificar a transferibilidade dos conflitos simulados e dos observados em campo, conforme apresentado na Figura 12. O valor $MAPE_{Conflicts}$ para os conflitos totais neste local foi de 10,27%, com os conflitos traseiros e de mudança de faixa com valores MAPE de 10,76% e 15,24%, respectivamente.

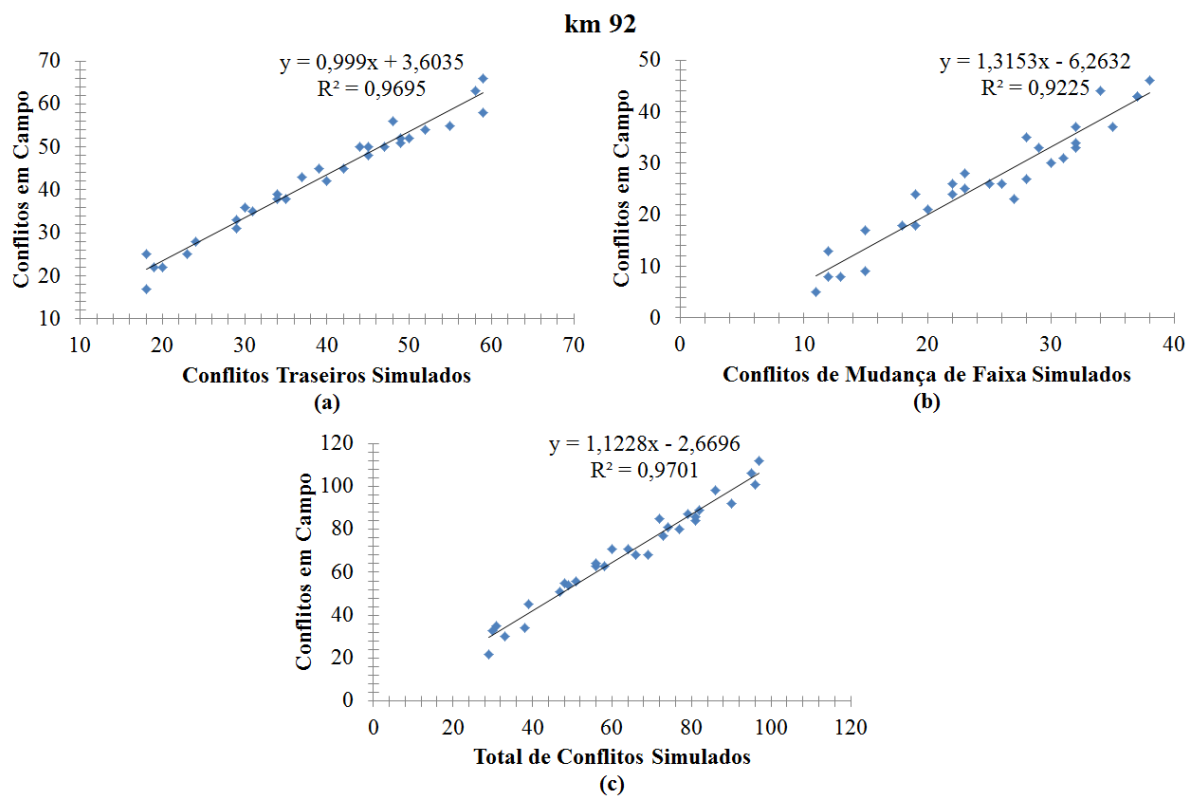


Figura 12: Relação entre os conflitos simulados e observados em campo, para o km 92.

Verificou-se que as relações entre os conflitos simulados e de campo também foram estatisticamente significantes, indicando uma boa transferência do modelo de conflitos. Os valores R^2 são semelhantes aos do km 94, indicando que os conflitos simulados podem ser explicados com alta precisão. O coeficiente de correlação de *Spearman* para km 92 foi de 0,9842, indicando também uma razoável conformidade entre os conflitos de campo e simulados.

Os resultados demonstram que o procedimento de calibração melhorou a correlação entre as relações de conflitos e de fluxo-velocidade simulados e observados em campo, indicando que uma calibração dos parâmetros de comportamento de condutores no VISSIM é crucial para obter bons resultados. Após a calibração do modelo, o valor MAPE para relação fluxo-velocidade foi reduzido de 87,94% para 1,09%; e o valor MAPE para conflitos totais foi reduzido de 79,62% para 8,60%. Os modelos de regressão linear e o coeficiente de correlação de *Spearman* também foram desenvolvidos para investigar a relação entre os conflitos simulados e os de campo, com resultados que indicam uma boa consistência entre as medidas simuladas e as de campo. A transferibilidade dos modelos de simulação calibrados também teve grande precisão, apontando para uma alta qualidade de ajuste.

6. ALGORITMO DE CONTROLE DOS LIMITES DE VELOCIDADE VARIÁVEL PROPOSTO

Para esta tese, um algoritmo de controle - a ser executado no modelo de simulação - foi proposto com o objetivo de empregar na rodovia os limites de velocidade que melhor respondem ao modelo de previsão de conflitos. Este algoritmo usa dados da caracterização do tráfego, juntamente com o modelo de previsão de conflitos, para determinar o limite de velocidade a ser empregado na rodovia em tempo real.

Muitos algoritmos de controle dos limites de velocidade variável (L.V.V.) não levam em conta o risco de colisões em períodos futuros. Portanto, tais algoritmos não usam impactos do L.V.V. para escolher o plano de controle com relação à segurança; planos de controle são normalmente empregados com o objetivo de reduzir o congestionamento (FANG *et al.*, 2014). Devido à alta variabilidade das médias de velocidade e volume entre as faixas de tráfego, comuns em rodovias brasileiras e que causam grandes perturbações no tráfego – que além dos recorrentes congestionamentos, geram um número elevado de conflitos –, o algoritmo de controle proposto nesta tese busca empregar um sistema com base em avaliações de segurança. Dessa forma, é possível elevar os níveis de segurança na rodovia de acordo com as informações relativas aos conflitos de tráfego em tempo real.

No modelo de simulação, o algoritmo de controle foi implementado através da ferramenta (VAP) do VISSIM. Esse algoritmo de controle foi projetado para selecionar os limites de velocidade com base em medidas médias de volume, velocidade e ocupação da via em intervalos de 5 minutos. Estes limites são selecionados através de informações provenientes dos detectores que estão posicionados em locais onde ocorrem grandes perturbações no tráfego. Tais detectores estão posicionados em todas as faixas de tráfego. Este design incorpora o estado da prática dos primeiros sistemas de gerenciamento ativo de tráfego. Exemplos de algoritmos e seus limites podem ser encontrados em (ALLABY; HELLINGA; BULLOCK, 2007; PAPAGEORGIOU; KOSMATOPOULOS; PAPAMICHAIL, 2008).

Para a simulação dos limites de velocidade variável (L.V.V.), foram criados no modelo de simulação cinco pórticos. Estes pórticos são responsáveis por indicar aos veículos uma eventual mudança nos limites de velocidade. Os detectores utilizados para alimentar o algoritmo de controle proposto estão posicionados exatamente sob estes pórticos. Estes pórticos estão posicionados em um espaçamento de um quilômetro entre si. A Figura 13 apresenta o

posicionamento dos pórticos e detectores utilizados para alimentar o algoritmo de controle proposto.

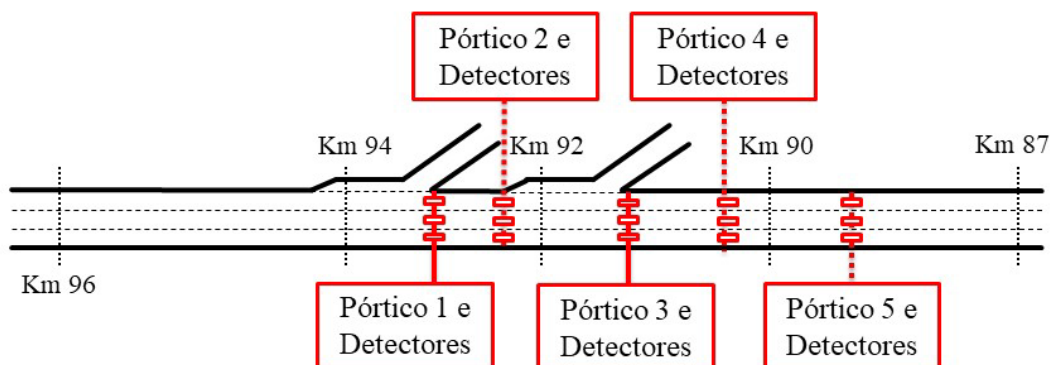


Figura 13: Posicionamento dos pórticos e detectores no trecho modelado.

Os valores dos parâmetros para o algoritmo de controle modelado foram selecionados com base em um estudo de caracterização das condições operacionais do trecho em períodos críticos, que precedem a ocorrência de congestionamentos e conflitos de tráfego. Um limiar de volume de 3000 veículos por hora foi selecionado a partir da análise de dados históricos de sensores da rodovia. Observou-se que este é o volume de tráfego a partir do qual as velocidades médias dos veículos apresentam quedas significativas, que precedem a ocorrência de congestionamentos. Para a ocupação, foi selecionado um limiar de 15%, pois dados revelaram que este limite se aproxima da ocupação crítica, na qual as velocidades médias apresentam quedas mais acentuadas.

Foram usados três limites de velocidade na modelagem. A velocidade limite da via (100 km/h); a primeira redução de velocidade (80 km/h); e a segunda redução de velocidade (70 km/h). O limite de velocidade de 90 km/h não foi empregado na modelagem, pois testes apontaram que a velocidade média do trecho já é em torno de 90 km/h, e uma redução de apenas 10 km/h no limite da via não causa grande efeito no desempenho dos veículos.

Uma vez que os limites de velocidade variáveis são ativados no pórtico onde há a detecção dos limiares do algoritmo de controle, as velocidades indicadas nos pórticos a montante são determinadas com base em uma zona de atuação e uma zona de transição, descritas a seguir:

- Zona de atuação – Novas velocidades são ativadas no pórtico de detecção do indicativo de conflito e no pórtico mais próximo a montante. Se o limite de

velocidade ativado for reduzido de 100 km/h para 80 km/h, o p3rtico a montante exibe os mesmos limites de velocidade do p3rtico de detecç3o;

- Zona de transiç3o – Se o limite de velocidade ativado for reduzido de 100 km/h para 70 km/h, os dois p3rticos mais pr3ximos a montante s3o ativados. O primeiro p3rtico a montante recebe o limite de velocidade de 80 km/h, e o segundo p3rtico a montante recebe o limite de 70 km/h. Assim, o sistema proporciona uma transiç3o gradual de reduç3o de velocidade para os condutores.

A zona de atuaç3o foi criada, pois uma reduç3o das velocidades apenas pontual e pr3xima da 3rea de conflito ou congestionamento n3o 3 capaz de harmonizar o tr3fego a montante. J3 a zona de transiç3o foi criada para oferecer uma gradual reduç3o de velocidade no trecho, pois assim, os ve3culos n3o sofrem uma brusca queda no limite de velocidade.

A Figura 14 apresenta o fluxograma do algoritmo de controle usado na modelagem.

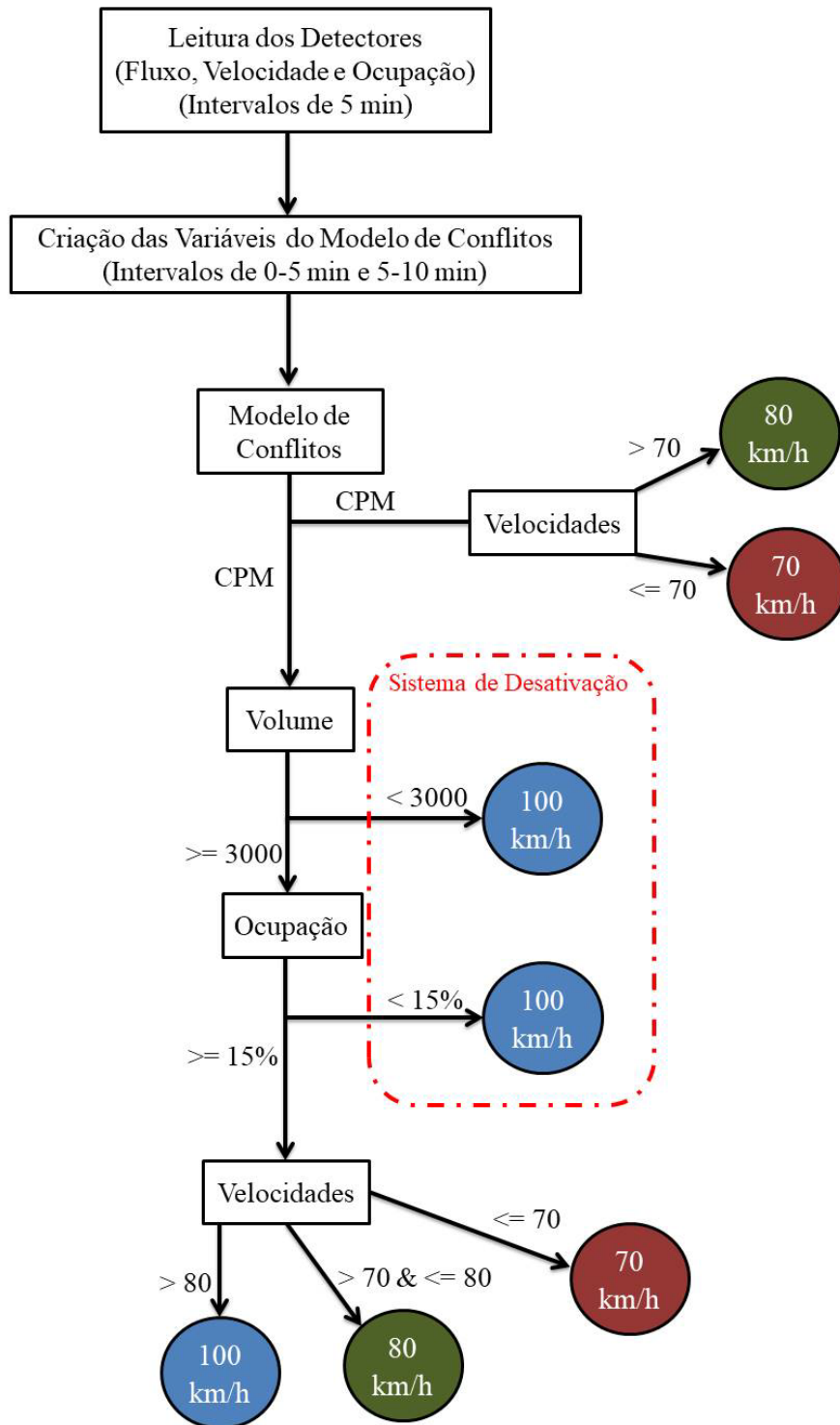


Figura 14: Fluxograma do algoritmo de controle proposto.

O primeiro passo do algoritmo de controle consiste na leitura dos detectores. As médias das leituras relativas a cada cinco minutos são comparadas com os limiares de volume, ocupação e velocidades definidos no estudo de caracterização do trecho, para determinar se o sistema de harmonização da velocidade deve entrar em operação. Este intervalo de cinco minutos foi empregado, pois para intervalos maiores, as médias de velocidade e ocupação

tendem a atenuar os picos e vales destas variáveis. Desta forma, em especial para a análise de conflitos, valores maiores acabam atenuando os impactos relacionados à segurança. Já para intervalos menores de cinco minutos, a oscilação dos valores médios destas variáveis é grande, fazendo com que poucas leituras agregadas criem falsos positivos e negativos na análise de conflitos.

O sistema é ativado através das variáveis: volume, ocupação média, velocidade média e, primeiramente, o CPM (Modelo de Previsão de Conflitos proposto por este estudo e apresentado na Seção 5.5). Como descrito anteriormente, os valores CPM positivos indicam a ocorrência de um evento de conflito, enquanto os valores negativos apontam para um estado sem conflito. Para o algoritmo de controle proposto, o limiar de CPM empregado foi de -0,5. Devido ao perfil de demanda nos horários de pico no trecho em estudo, acima deste valor (CPM = -0,5), há sempre registros de ocorrência de conflitos a partir dos 10 minutos seguintes. Portanto, uma inferência no perfil diário dos valores de CPM indica que na maioria das vezes que o valor de -0,5 é atingido, há uma alta probabilidade de o CPM se aproximar de zero e passar a ter valores positivos. Após o CPM atingir seu limiar de ativação, os volumes, ocupação média e as velocidades médias passam a ser monitoradas, como ilustra o fluxograma do algoritmo.

O sistema é desativado quando detectores indicam que a corrente de tráfego atinge volume menor que 3000 veic/hora e ocupação menor que 15%. Quando as condições de tráfego se encontram próximas ao limiar de ativação, pode-se observar uma oscilação indesejável no sistema, com ativações e desativações frequentes. Este estado é referido na literatura como chaveamento. Em situações reais é importante conceber mecanismos de proteção contra o chaveamento (ALLABY; HELLINGA; BULLOCK, 2007; PAPAGEORGIU; KOSMATOPOULOS; PAPAMICHAIL, 2008). Para este algoritmo, a proteção contra o chaveamento é realizada da seguinte forma:

- Uma vez ativado o sistema, ele permanecerá ativo por pelo menos 15 minutos, evitando um chaveamento excessivo do sistema.
- Já quando desativado, o algoritmo pode voltar a ser ativado nos próximos cinco minutos. Esta lógica é empregada devido a potencial ocorrência de conflitos, onde a ativação do sistema pode auxiliar a mitigar os efeitos negativos de tais conflitos.

7. RESULTADOS DE SIMULAÇÃO

Este capítulo descreve os resultados das simulações realizadas. Os perfis de volume de veículos inseridos no modelo buscaram representar as intensidades de fluxo que ocorrem na rodovia no pico da manhã, que é o momento com maior carregamento no trecho em estudo. A Figura 15 apresenta os perfis de volume modelados para o km 96, e Pórticos 1 e 3, evidenciando os acréscimos de demanda que as rampas de acesso dos km 92 (Pórtico 3) e 94 (Pórtico 1) têm sobre a rodovia. Cabe destacar que estes perfis de volume ocorrem para todos os dias da semana, tendo pouca variação durante estes dias.

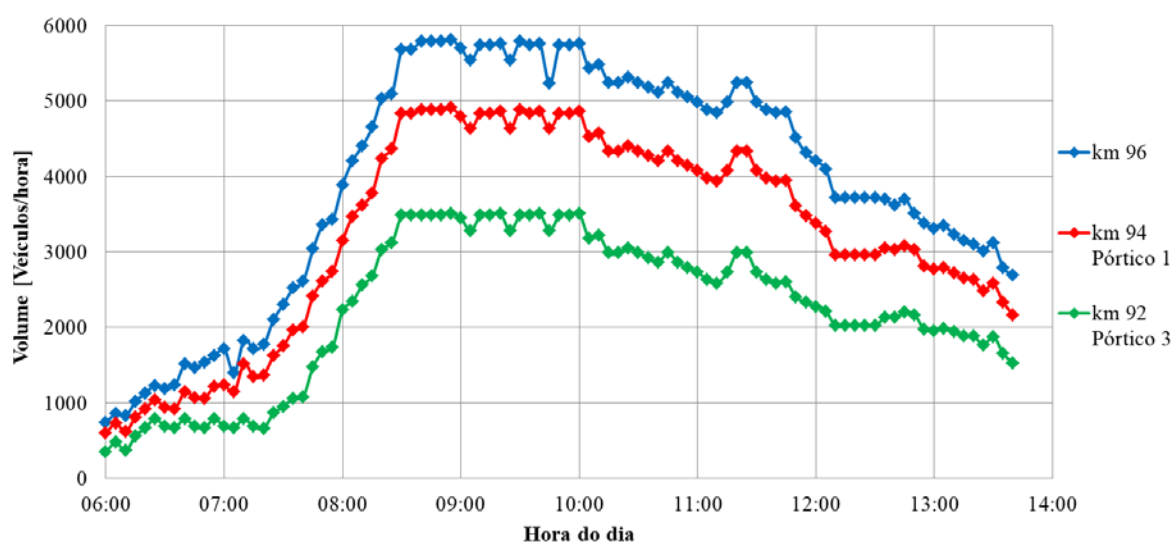


Figura 15: Perfis de volume modelados para o km 96, e Pórticos 1 e 2.

Como ilustra a imagem, durante o período de 8 horas de simulação, o perfil de demanda parte de uma condição de fluxo livre até atingir a capacidade da rodovia (08:30 a 10:00 horas). Optou-se por uma modelagem de 8 horas, e o perfil de volume apresentado, justamente para poder representar diferentes condições operacionais em uma única simulação, o que permite também avaliar a progressão e/ou regressão da predição de conflitos (CPM) ao longo do tempo.

O software Surrogate Safety Assessment Model (SSAM) também foi empregado como método de avaliação da segurança nos modelos de simulação. Foram avaliados os conflitos entre trajetórias de veículos nas regiões caracterizadas como gargalos – destacadas na Figura 16. Estas são as regiões mais críticas do trecho em estudo, onde os conflitos se intensificam devido às rampas de acesso e as posteriores reduções no número de faixas de tráfego.

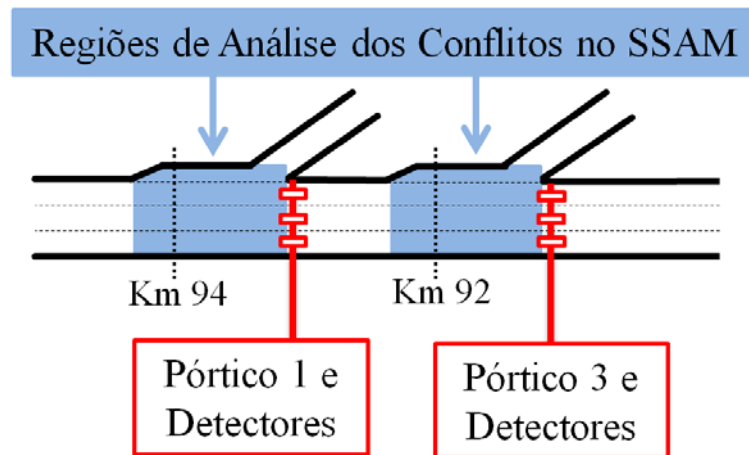


Figura 16: Regiões de Análise no software SSAM.

7.1 CENÁRIOS MODELADOS

Os cenários modelados no VISSIM foram:

- Cenário Base: representa a rodovia em seu estado atual, sem a operação de limites de velocidade variável (L.V.V.) – apenas representando as condições operacionais atuais do trecho em estudo.
- Cenário com sistema L.V.V.: empregado com o algoritmo apresentado no Capítulo 6. Através deste cenário foi possível avaliar o impacto que a estratégia L.V.V. tem sobre o trecho em estudo, especialmente no que diz respeito à redução de conflitos e de congestionamentos. É importante destacar que este cenário assume que todos os veículos simulados respeitam os limites de velocidade estabelecidos pelo algoritmo de controle.
- Cenários com diferentes taxas de adesão dos condutores: estes cenários são modelados com diferentes taxas de adesão dos condutores quanto à redução dos limites de velocidade, com o intuito de avaliar para qual porcentagem de adesão o sistema passa a não ter efeitos positivos no trecho em estudo. Habtemichael e Santos (2013), Hadiuzzaman et al. (2014) e Hellinga e Mandelzys (2011) apontam que os benefícios do L.V.V. relacionados à mobilidade e segurança estão positivamente correlacionados com o aumento do nível de adesão dos condutores.

Com estes cenários, foi possível avaliar a estratégia de L.V.V. para o trecho em estudo, traçando um paralelo com as condições operacionais da rodovia em seu estado atual, evidenciando assim os potenciais benefícios do sistema L.V.V., em especial no que tange à segurança.

7.2 RESULTADOS PARA O PÓRTICO 1 – KM 94

O Pórtico 1, localizado no km 94 da rodovia, é o ponto de maior perturbação no trecho em estudo. Isso se deve ao fato de que neste ponto há a segunda rampa de acesso, e o final do *taper* de acesso à rodovia gera um gargalo neste local – como ilustra a Figura 16. Assim, neste ponto a rodovia atinge seu patamar de operação mais crítico. A Figura 17 apresenta uma comparação entre o Cenário Base e o Cenário com operação do L.V.V. O Cenário Base de simulação representa a rodovia em seu estado atual, sem a operação de limites de velocidade variável (L.V.V.) – apenas representando as condições operacionais atuais do trecho em estudo.

Nesta comparação são apresentados os perfis de velocidade média para as 8 horas de simulação, e os perfis dos valores do modelo CPM. Estes perfis ilustram as médias de dez sementes aleatórias do VISSIM.

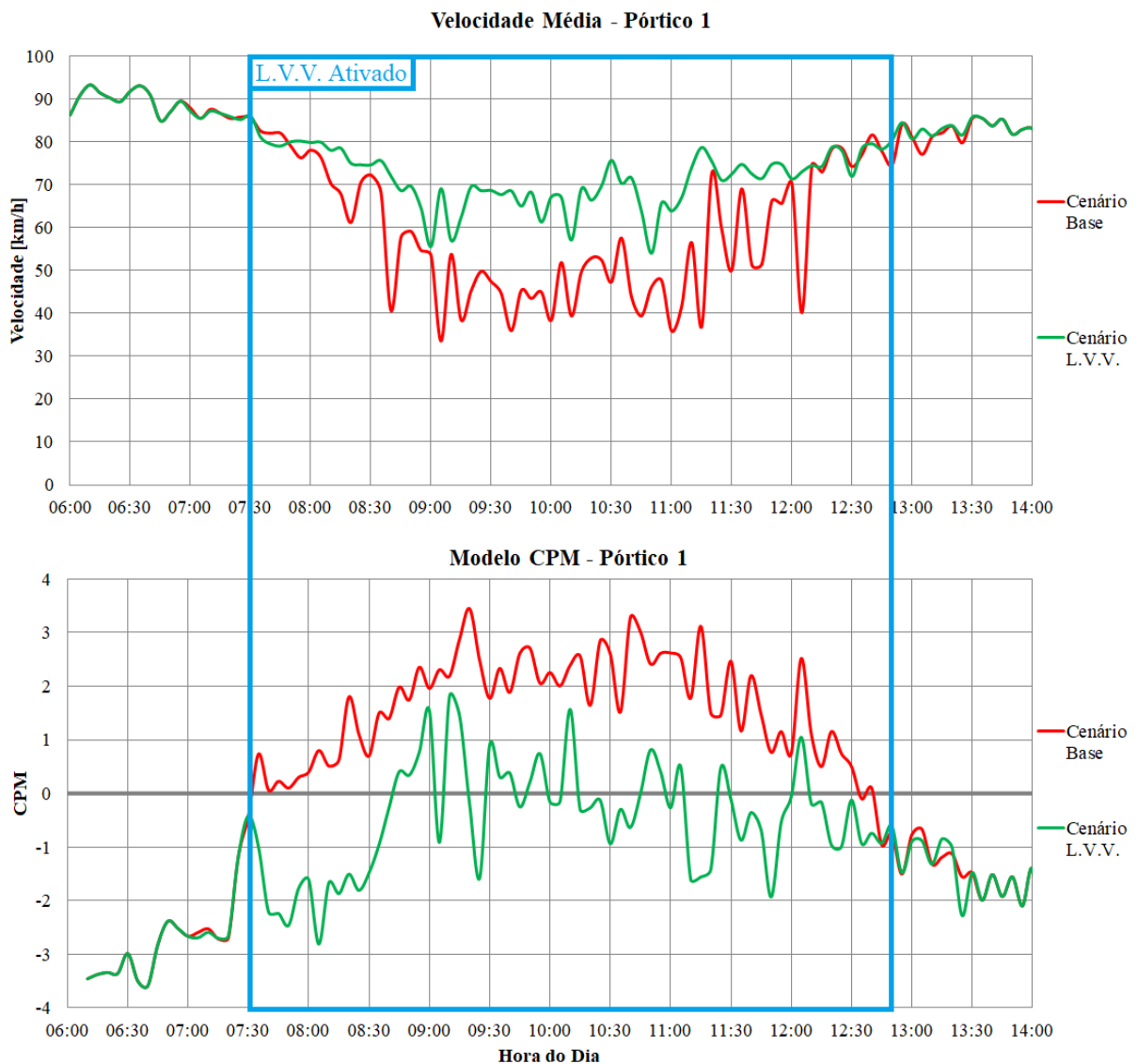


Figura 17: Comparação dos perfis de velocidade média e do modelo CPM – Pórtico 1.

As dez sementes aleatórias apresentaram perfis de velocidades semelhantes, com o sistema L.V.V. sendo ativado sempre em torno de 07h30min, com desvio de 10 min entre sementes aleatórias. A desativação do sistema teve desvio de 15 min. A primeira ativação do L.V.V. sempre aconteceu através da variável “CPM” no algoritmo – evidenciando que a probabilidade de ocorrer conflitos atinge patamares críticos quando a rodovia se aproxima de condições operacionais adversas (próximo da capacidade).

O emprego do sistema L.V.V. proposto contribuiu significativamente para a redução da probabilidade de conflitos. Como discutido na Seção 5.5, onde foi apresentado o modelo de previsão de conflitos proposto (CPM), sempre que CPM atinge valores positivos (maiores que

zero) o modelo indica a ocorrência de conflitos. Para o Pórtico 1, a Tabela 12 apresenta uma síntese do desempenho dos cenários quanto ao modelo de conflitos.

Tabela 12: Desempenho dos cenários quanto ao modelo de conflitos, para o Pórtico 1.

	Período com Conflito [min]	Período Total da Simulação [min]	% do Total
Cenário Base	305	480	63,54%
Cenário L.V.V.	85	480	17,71%

O perfil CPM para a modelagem do Cenário com L.V.V. permaneceu 17,71% do tempo, em média, na região indicativa de conflitos. Isso indica uma redução de 72,13% no tempo de ocorrência de conflitos em relação ao Cenário Base, evidenciando que o emprego da harmonização da velocidade contribuiu para reduzir o período em que a rodovia opera com indicativo da ocorrência de conflitos. Conseqüentemente, essa redução aponta para uma melhora na segurança.

Para o perfil de velocidade do Cenário com L.V.V., nota-se que nos primeiros minutos de ativação do sistema, as velocidades para o Cenário Base são maiores. Isso se deve ao fato de que com a ativação do L.V.V. através da variável CPM, os limites de velocidade são reduzidos para 80 km/h – forçando as médias a cair. No entanto, percebe-se que o Cenário Base apresenta uma queda mais abrupta nas velocidades, enquanto que o L.V.V. mantém as médias em patamares superiores por um período maior. Esse é um benefício típico de sistemas de harmonização da velocidade.

Outro benefício do Cenário com L.V.V. diz respeito às médias de velocidade mínimas, que atingiram cerca de 55 km/h em diferentes momentos. Já para o Cenário Base, as velocidades mínimas atingem patamares inferiores, chegando a 33 km/h. No período em que a rodovia está operando com o L.V.V. ativado – período crítico –, o perfil de velocidade do Cenário com L.V.V. permanece sempre com patamares superiores em relação ao Cenário Base, indicando novamente que a harmonização da velocidade traz benefícios para o trecho em estudo. A Tabela 13 apresenta as médias de velocidade para o período em que o L.V.V. estava ativado.

Tabela 13: Médias de velocidade no Pórtico 1, para o período em que o L.V.V. estava ativado.

	Média de Velocidade [km/h]	Desvio Padrão [km/h]
Cenário Base	58,57	15,10
Cenário L.V.V.	71,61	6,63

As médias de velocidade para o período de operação do L.V.V. indicam, mais uma vez, os efeitos positivos da harmonização da velocidade. Através do L.V.V., foi possível aumentar em cerca de 13 km/h a velocidade média do trecho, melhorando a eficiência da rodovia. Ainda, o L.V.V. também reduziu o desvio padrão das velocidades – oferecendo um tráfego mais homogêneo – que contribui para a redução do número de trocas de faixa e, conseqüentemente, para um aumento da segurança.

7.2.1 Resultados oriundos do software SSAM

Através do software SSAM, foi possível avaliar diferentes indicadores relacionados diretamente com a segurança, como:

- Perfil dos conflitos indicativos de colisão traseira ao longo do período de simulação;
- Perfil dos conflitos indicativos de colisão por mudança de faixas ao longo do período de simulação;
- Perfil de TTC ao longo do período de simulação;
- Diferença de velocidade entre veículos para o tempo de colisão (TTC) mínimo – que corresponde a magnitude das diferenças de velocidade entre os veículos envolvidos em um conflito;
- Máxima desaceleração do veículo seguidor envolvido em um conflito.

Para o Cenário Base foram registrados um total de 5035 conflitos, enquanto que para o Cenário com L.V.V. o total foi de 2784 conflitos, o que equivale a uma redução de 44,71% no total de conflitos para a região do Pórtico 1. A Tabela 14 sintetiza os benefícios do Sistema L.V.V. quanto ao número de conflitos registrados.

Tabela 14: Síntese do número de conflitos registrados com o SSAM

	Colisão traseira	Colisão por mudança de faixa	Total
Cenário Base	4271	764	5035
Cenário L.V.V.	2290	494	2784
Redução de conflitos com L.V.V.	46,38%	35,34%	44,71%

As Figuras 18, 19 e 20 apresentam os perfis dos conflitos indicativos de colisão traseira, colisão por mudança de faixa e, total de colisões.

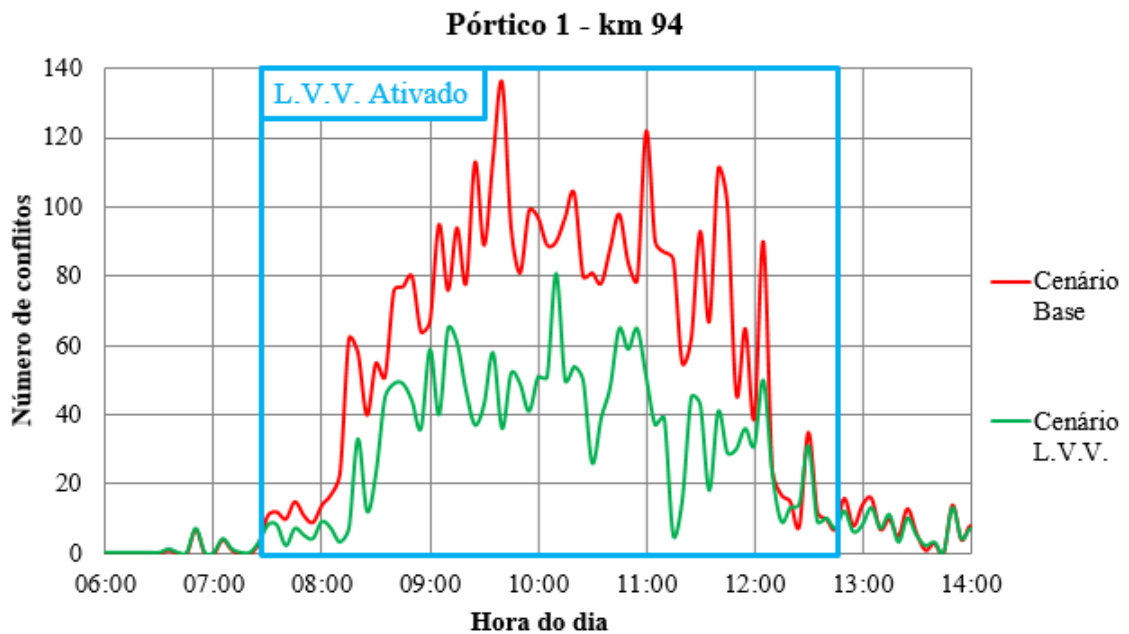


Figura 18: Perfil dos conflitos indicativos de colisão traseira ao longo do período de simulação, para o Pórtico 1.

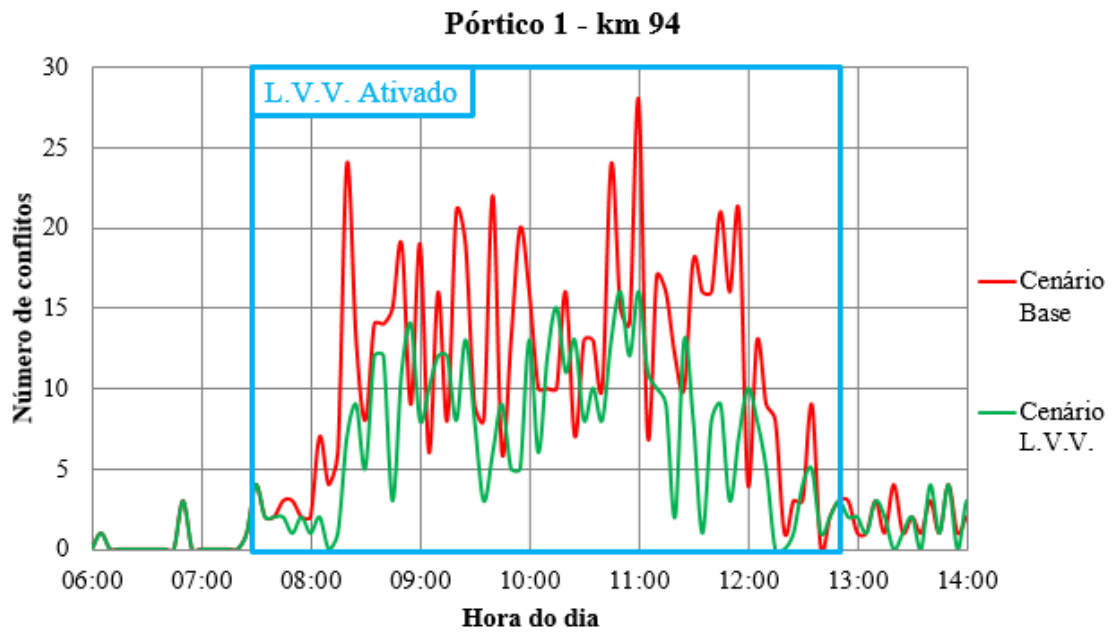


Figura 19: Perfil dos conflitos indicativos de colisão por mudança de faixa ao longo do período de simulação, para o Pórtico 1.

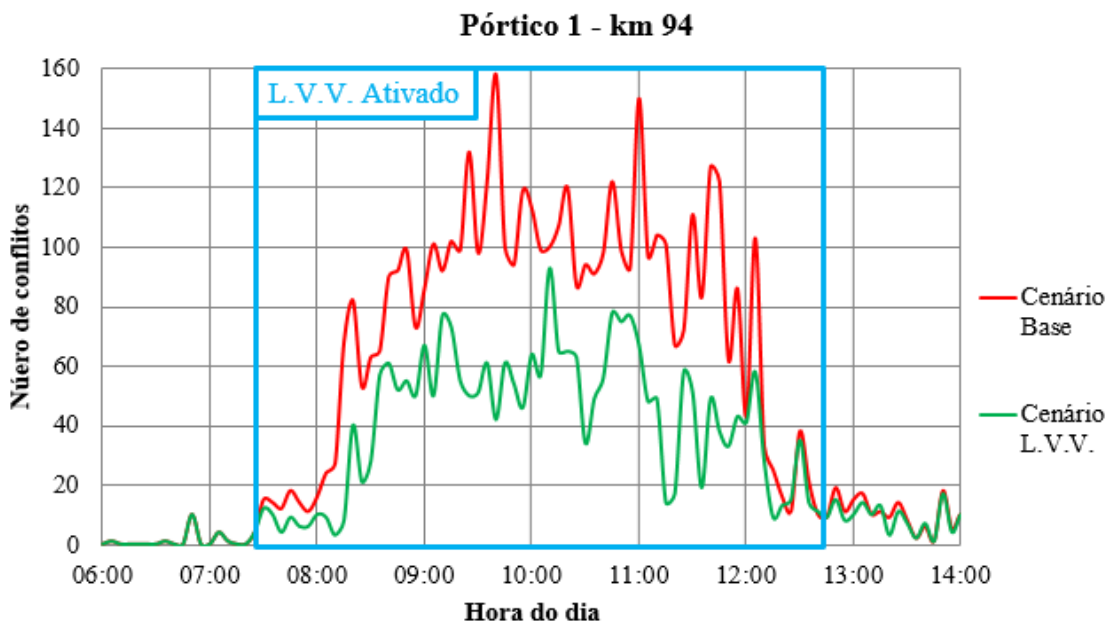


Figura 20: Perfil do total de conflitos ao longo do período de simulação, para o Pórtico 1.

Como esperado, os conflitos apresentam perfis semelhantes ao perfil do Modelo CPM. Quando o Sistema L.V.V. está ativado (período de maior volume na via) acontecem as maiores intensidades de conflitos e, conseqüentemente, os maiores benefícios do modelo L.V.V.

A Figura 21 apresenta a relação entre o número de conflitos e os diferentes tempos de colisão (TTC) para o Pórtico 1. A margem de valores TTC avaliados variou de 0,5 a 3,6

segundos – valores estes medidos na coleta de dados de campo e empregados na calibração do simulador.

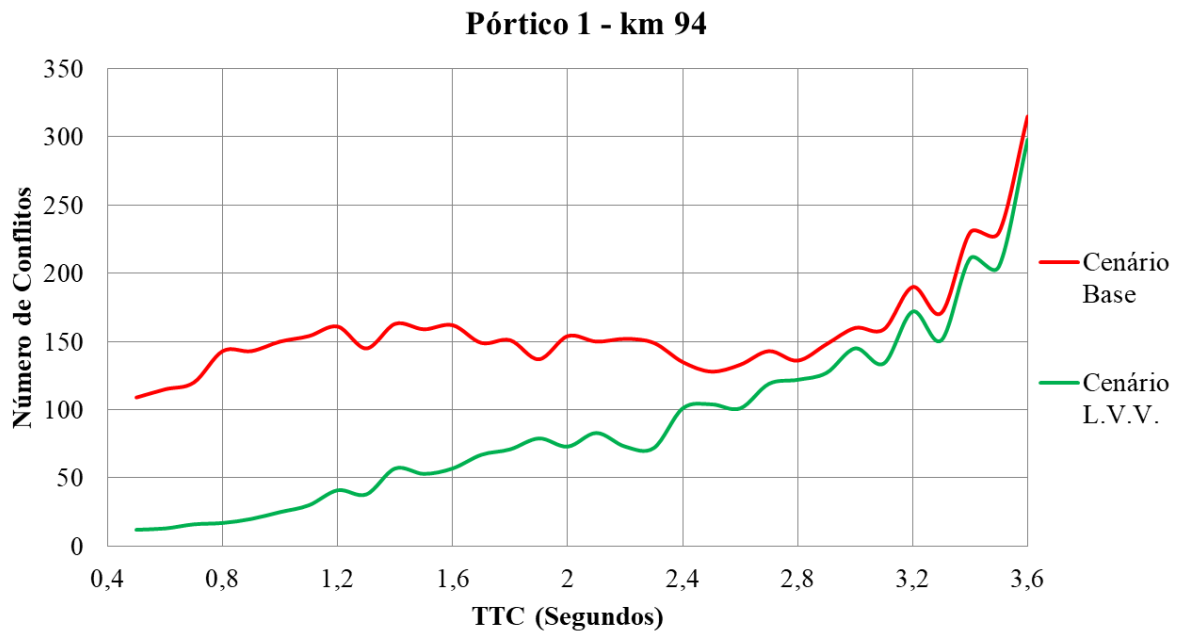


Figura 21: Relação entre o número de conflitos e o TTC para o Pórtico 1.

A redução do número de conflitos é maior à medida que os valores TTC diminuem, indicando que a harmonização das velocidades contribuiu para um menor risco de acidentes. Como aponta Hayward (1972), valores menores de TCC indicam maiores riscos de ocorrer acidentes. Portanto, ao empregar o L.V.V., estes riscos são reduzidos. Quanto maior o TTC, mais próximo é o número de conflitos entre os Cenários modelados. Isto pode ser explicado pelo fato de que para um TTC mais alto, há uma maior dependência da exposição representada no volume de tráfego, como concluído por (ESSA; SAYED, 2015a).

Com relação a diferença de velocidade entre veículos para o tempo de colisão (TTC) mínimo – que corresponde ao valor matemático que define a magnitude das diferenças de velocidade entre os veículos envolvidos em um conflito, mais uma vez é possível apontar a superioridade do modelo L.V.V. em relação ao Cenário Base, como ilustra a Figura 22.

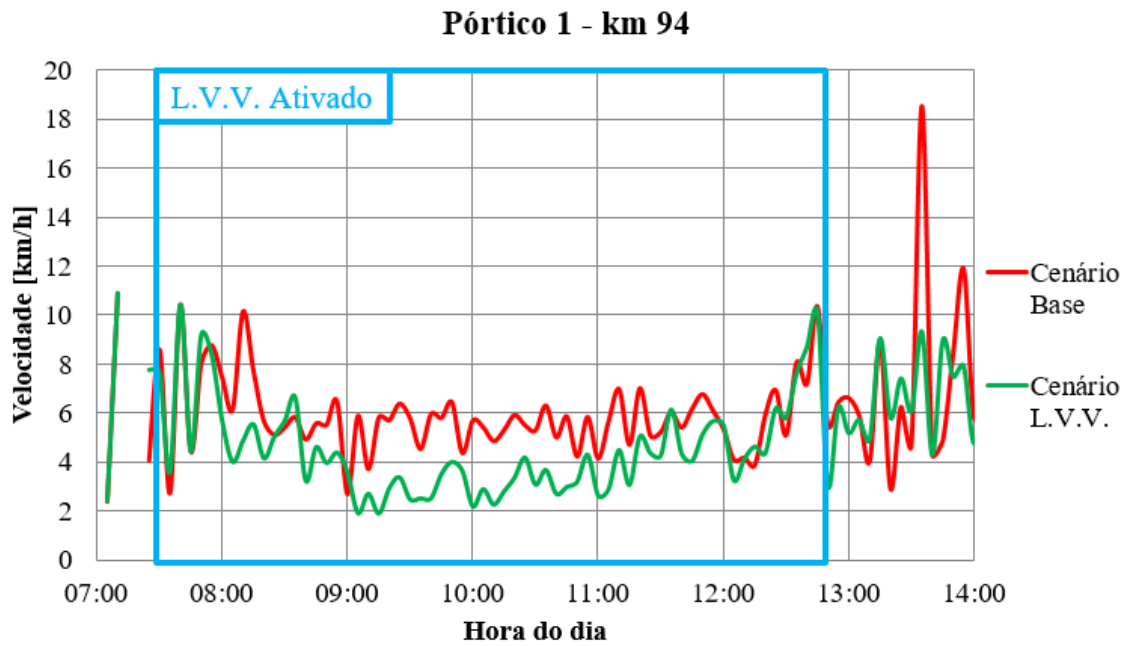


Figura 22: Perfil da diferença de velocidade entre veículos para o tempo de colisão (TTC) mínimo, para o Pórtico 1.

Durante o período mais congestionado (08:30 as 11:00), as diferenças de velocidade reduzem em cerca de 2 km/h. Em suma, quando o Sistema L.V.V. está ativado, há uma clara redução na diferença de velocidades entre os veículos envolvidos em um conflito – indicando uma potencial melhora em termos de segurança.

Outro indicador de segurança avaliado foi a máxima desaceleração do veículo seguidor envolvido em um conflito. Os perfis de desaceleração são apresentados na Figura 23.

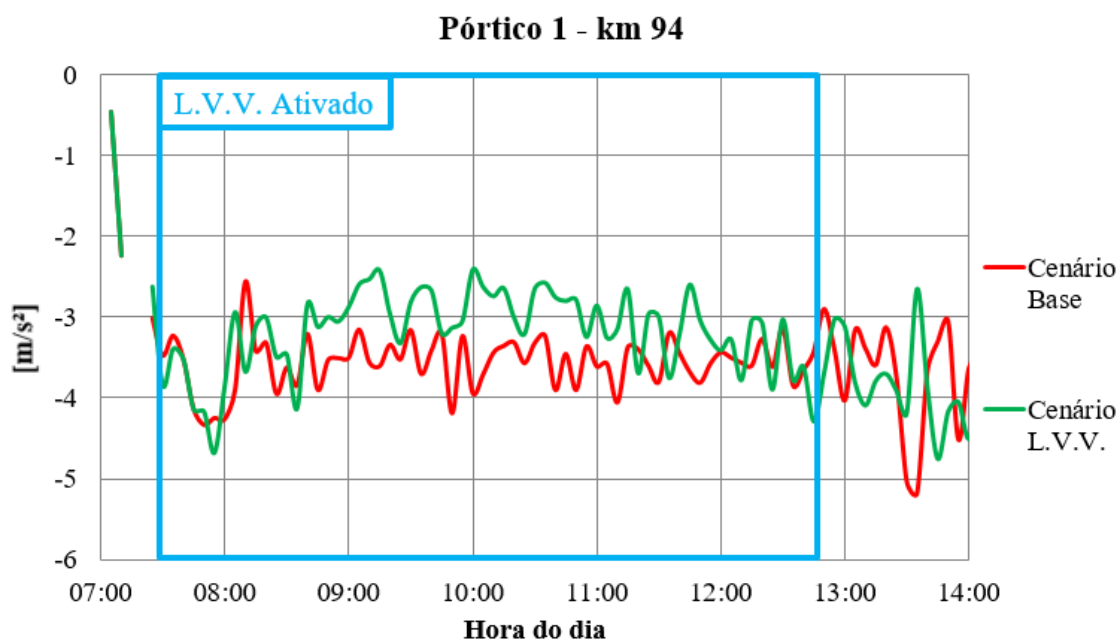


Figura 23: Perfil da máxima desaceleração do veículo seguidor envolvido em um conflito, para o Pórtico 1.

Através da análise dos perfis é possível concluir novamente que o Sistema L.V.V. oferece benefícios ao trecho em estudo, uma vez que, quando o sistema está ativado, as desacelerações são menores. As maiores taxas de desaceleração para o Cenário Base apontam para potenciais colisões com gravidade superior – tendo relação direta com a maior variabilidade das médias de velocidade com o Cenário Base.

7.3 RESULTADOS PARA O PÓRTICO 3 – KM 92

O Pórtico 3, localizado no km 92 da rodovia, também se caracteriza como um ponto de perturbação no trecho em estudo – neste ponto há a primeira rampa de acesso. O final do *taper* de acesso à rodovia gera também um gargalo neste local – como ilustra a Figura 17. Neste ponto a rodovia também atinge patamares de operação críticos, porém com menor intensidade.

A Figura 24 apresenta uma comparação entre o Cenário Base e o Cenário com operação do L.V.V. para o Pórtico 3. Nesta comparação são apresentados os perfis de velocidade média para as 8 horas de simulação, e os perfis dos valores do modelo CPM. Estes perfis ilustram as médias de dez sementes aleatórias do VISSIM.

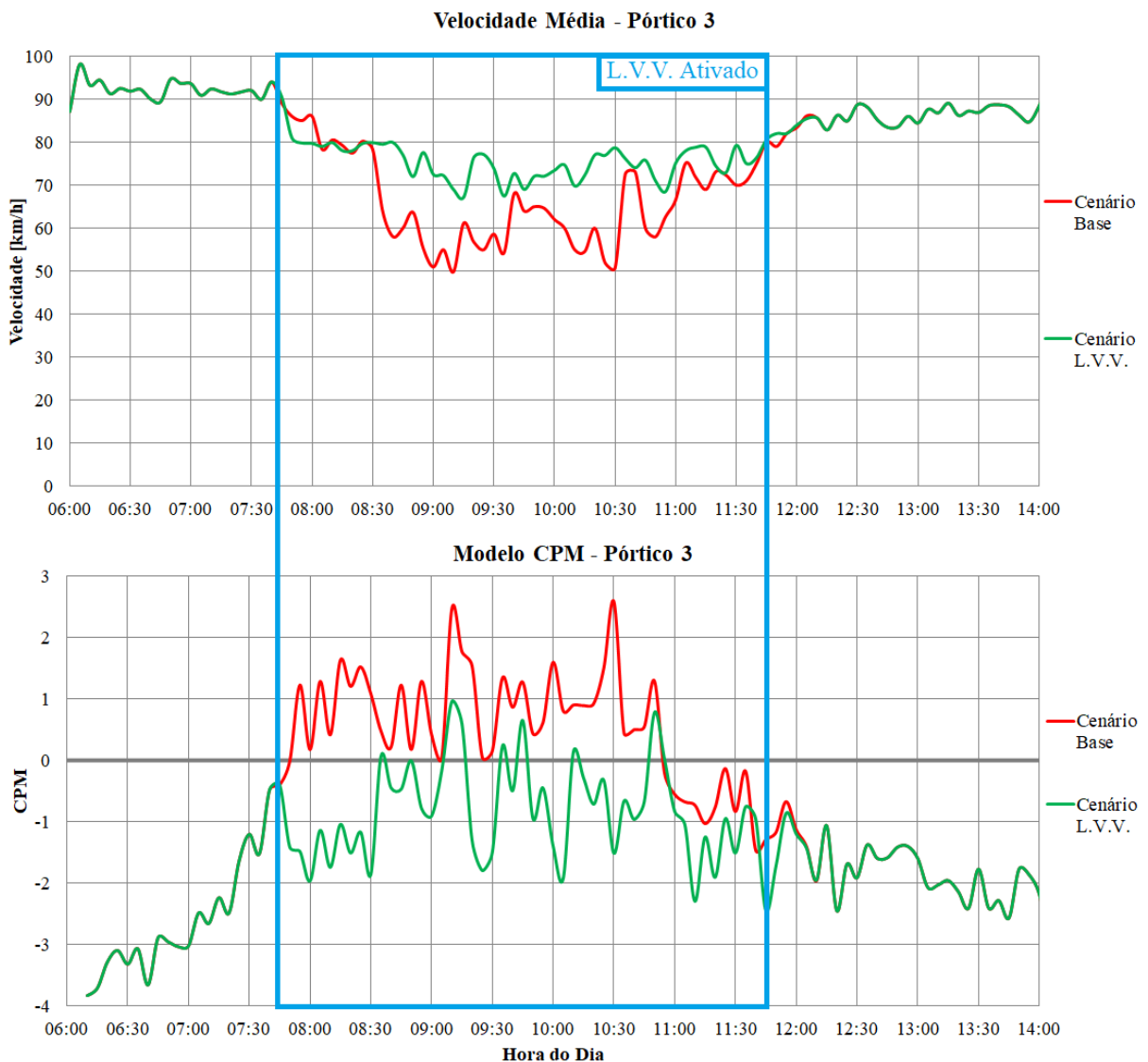


Figura 24: Comparação dos perfis de velocidade média e do modelo CPM – Pórtico 3.

Assim como no Pórtico 1, as dez sementes aleatórias também apresentaram perfis de velocidades semelhantes. Para este Pórtico, o sistema L.V.V. foi ativado sempre em torno de 07h45min, com desvio de 10 min entre sementes aleatórias. A desativação do sistema teve desvio de 15 min. Mais uma vez, a primeira ativação do L.V.V. sempre aconteceu através da variável “CPM” no algoritmo. A Tabela 15 apresenta uma síntese do desempenho dos cenários quanto ao modelo de conflitos.

Tabela 15: Desempenho dos cenários quanto ao modelo de conflitos, para o Pórtico 3.

	Período com Conflito [min]	Período Total da Simulação [min]	% do Total
Cenário Base	180	480	37,50%
Cenário L.V.V.	40	480	8,33%

O perfil CPM para a modelagem do Cenário com L.V.V. permaneceu 8,33% do tempo, em média, na região indicativa de conflitos. Isso indica uma redução de 77,78% no tempo de ocorrência de conflitos em relação ao Cenário Base, evidenciando que o emprego da harmonização da velocidade também contribuiu para reduzir o período em que a rodovia opera com indicativo da ocorrência de conflitos neste ponto.

Outro benefício do Cenário com L.V.V. diz respeito às médias de velocidade mínimas, que atingiram cerca de 68 km/h. Já para o Cenário Base, as velocidades mínimas atingem patamares inferiores, chegando a 50 km/h. No período em que a rodovia está operando com o L.V.V., as velocidades permanecem sempre com patamares superiores em relação ao Cenário Base – assim como no Pórtico 1 –, indicando novamente que a harmonização da velocidade traz benefícios para o trecho em estudo. A Tabela 16 apresenta as médias de velocidade para o período em que o L.V.V. estava ativado.

Tabela 16: Médias de velocidade no Pórtico 3, para o período em que o L.V.V. estava ativado.

	Média de Velocidade [km/h]	Desvio Padrão [km/h]
Cenário Base	66,70	10,55
Cenário L.V.V.	75,73	4,30

Através do L.V.V., foi possível aumentar em cerca de 9 km/h a velocidade média do trecho, melhorando a eficiência da rodovia. O L.V.V., também neste ponto, reduziu o desvio padrão das velocidades, oferecendo um tráfego mais homogêneo – aumento assim a segurança.

7.3.1 Resultados oriundos do software SSAM

Para o Cenário Base foram registrados um total de 3382 conflitos, enquanto que para o Cenário com L.V.V. o total foi de 2045 conflitos, o que equivale a uma redução de 39,53% no total de conflitos para a região do Pórtico 3. A Tabela 17 sintetiza os benefícios do Sistema L.V.V. quanto ao número de conflitos registrados.

Tabela 17: Síntese do número de conflitos registrados com o SSAM

	Colisão traseira	Colisão por mudança de faixa	Total
Cenário Base	2689	693	3382
Cenário L.V.V.	1605	440	2045
Redução de conflitos com L.V.V.	40,31%	36,51%	39,53%

Como esperado, os conflitos do Pórtico 3 também apresentam perfis semelhantes ao perfil do Modelo CPM. Com a análise, através do software SSAM, da relação entre o número de conflitos e os diferentes tempos de colisão (TTC), nota-se novamente uma redução do número de conflitos – como ilustra a Figura 25.

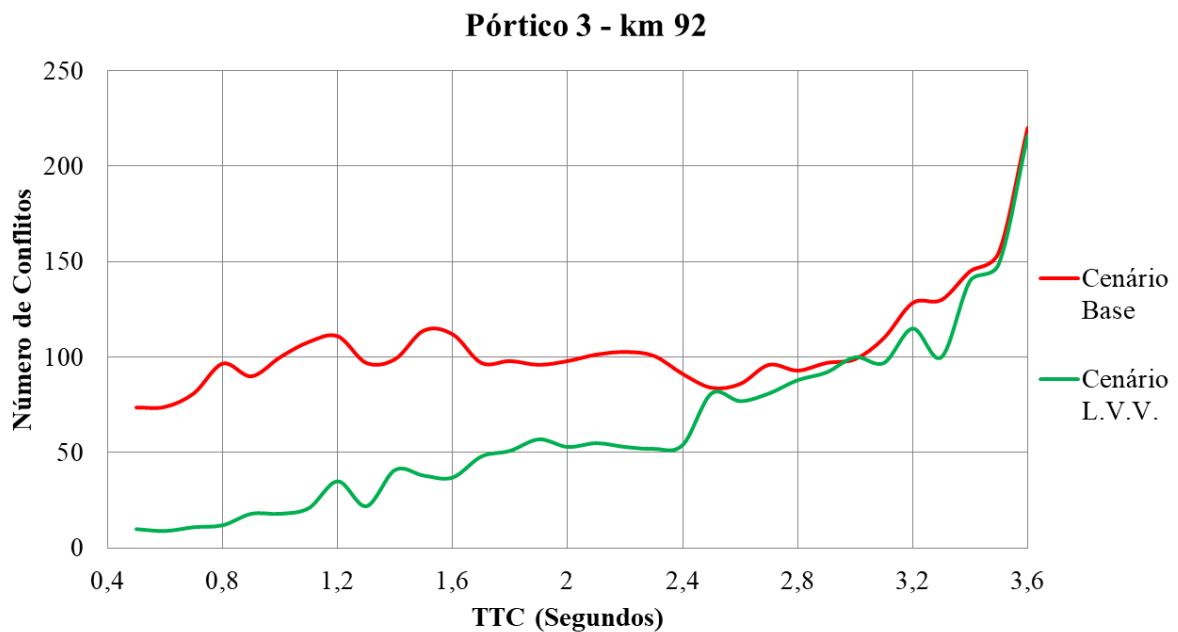


Figura 25: Relação entre o número de conflitos e o TTC para o Pórtico 3.

Assim como na região do Pórtico 1, a redução do número de conflitos é maior à medida que os valores TTC diminuem, indicando que a harmonização das velocidades contribuiu para um menor risco de acidentes também neste Pórtico.

Com relação a diferença de velocidade entre veículos para o tempo de colisão (TTC) mínimo; e a máxima desaceleração do veículo seguidor envolvido em um conflito, os resultados

foram semelhantes aos encontrados para o Pórtico 1, reforçando a superioridade do modelo L.V.V.

7.4 COMPRIMENTO DE FILA E PARADAS NAS RAMPAS DE ACESSO

Devido ao elevado fluxo de veículos na via principal, formam-se filas nas rampas de acesso nos períodos de pico. Desta forma, uma análise dos comprimentos de fila e do total de paradas dos veículos nas rampas de acesso dos km 92 e 94 também foi realizada. As Figuras 26 e 27 apresentam os comprimentos de fila máximos e o total de paradas dos veículos para o Cenário Base e para o Cenário com L.V.V. Uma parada foi contabilizada cada vez que um veículo realizou uma parada total na rampa.

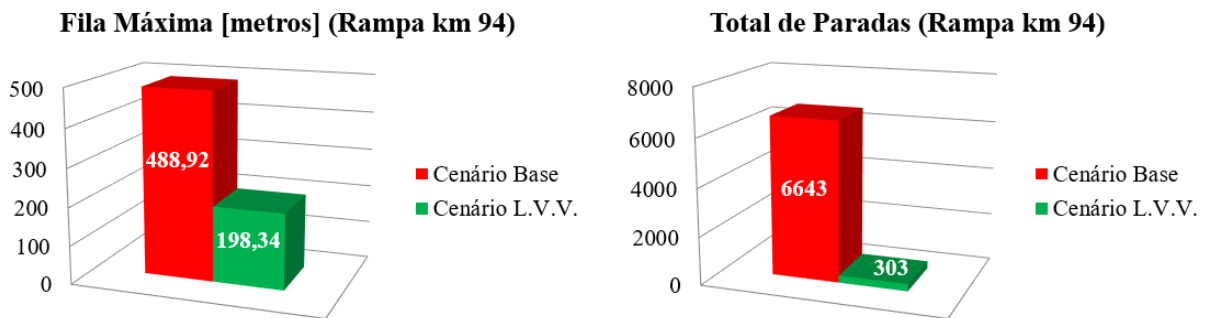


Figura 26: Comprimento de fila máximo e total de paradas (Rampa km 94)

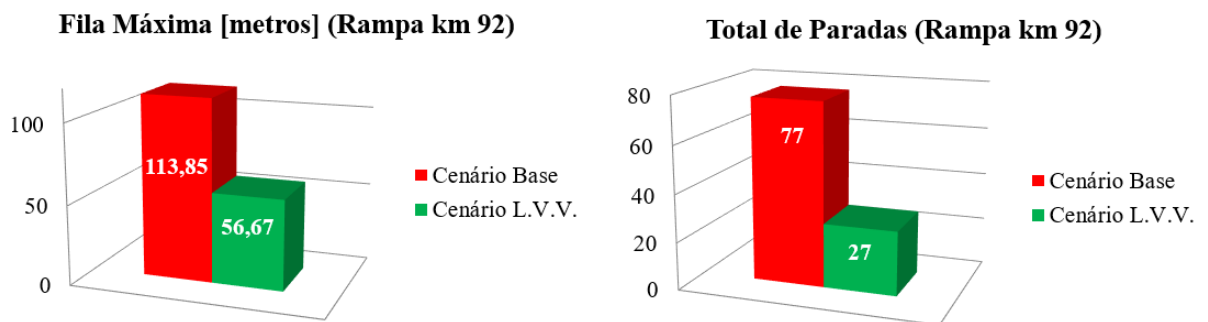


Figura 27: Comprimento de fila máximo e total de paradas (Rampa km 92)

Mais uma vez é possível perceber os benefícios do modelo L.V.V. Ao harmonizar as velocidades, o modelo permite que os veículos oriundos das rampas ingressem com maior facilidade na via principal. Dessa forma, não só o potencial de conflitos é reduzido, como também o congestionamento nestes locais caracterizados como gargalos. Isso resulta em menores filas de veículos nas rampas e, conseqüentemente, um total de paradas menor.

7.5 CENÁRIOS COM DIFERENTES TAXAS DE ADESÃO DOS CONDUTORES

Cenários com diferentes taxas de adesão dos condutores quanto à redução dos limites de velocidade foram modelados, com o intuito de avaliar para qual porcentagem de adesão o sistema passa a não ter efeitos positivos no trecho em estudo.

Para os testes com diferentes cenários de adesão, foram admitidas taxas de adesão de 100%, 90%, 75% e 50%. A Figura 28 apresenta uma comparação das velocidades médias e do Modelo CPM entre os diferentes cenários, para o Pórtico 1. Estes resultados foram semelhantes para o Pórtico 3.

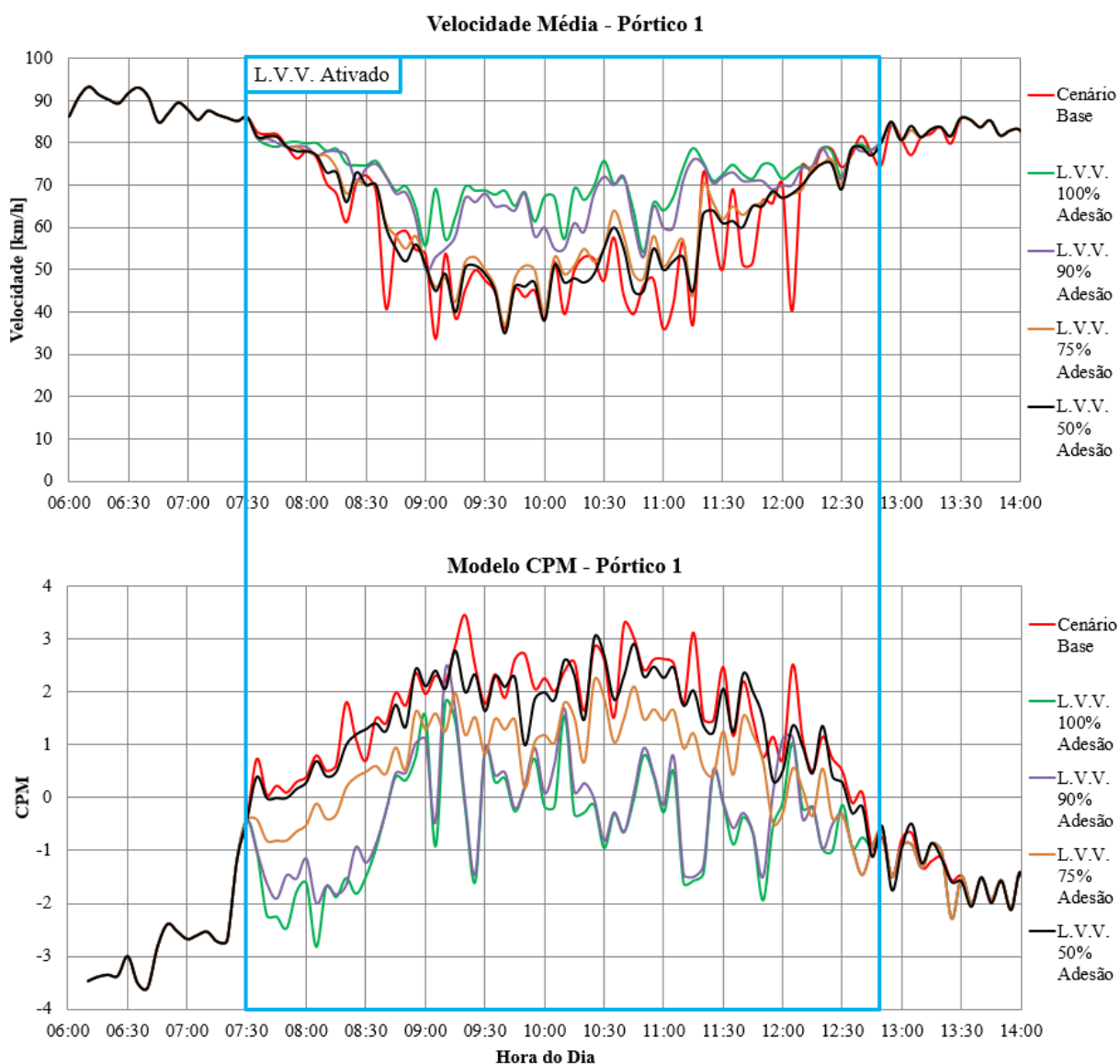


Figura 28: Comparação das velocidades médias e do Modelo CPM entre os diferentes cenários de taxas de adesão.

Como apontado por Habtemichael e Santos (2013), Hadiuzzaman et al. (2014) e Hellinga e Mandelzys (2011), os benefícios do L.V.V. relacionados à mobilidade e segurança estão positivamente correlacionados com o aumento do nível de adesão dos condutores. Dessa forma, é sempre desejável que a adesão esteja o mais próximo possível de 100% dos condutores. Os resultados apontados por esta pesquisa corroboram com os da literatura. Com uma queda de apenas 10% na porcentagem de adesão (L.V.V. 90%), já é possível ver uma queda nas velocidades médias e no desempenho do Modelo CPM. Próximo de 75% de adesão, o sistema L.V.V. passa a oferecer poucos benefícios, indicando a necessidade de um alto índice de adesão para que o sistema opere de forma adequada. A Figura 29 apresenta uma comparação entre os cenários quanto a: velocidade média total; do desvio padrão total das velocidades; porcentagem de intervalos com conflito; e porcentagem de redução dos conflitos.

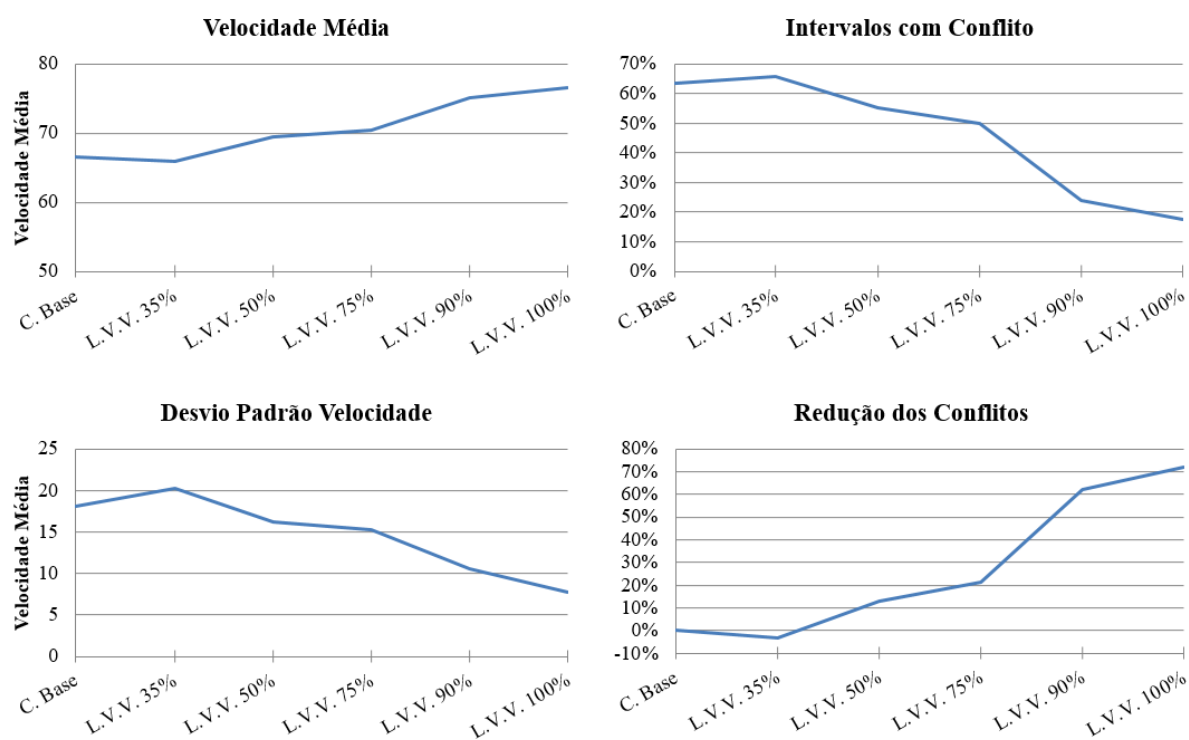


Figura 29: Comparação entre os cenários com diferentes taxas de adesão dos condutores.

Mais uma vez é possível perceber a importância de uma alta taxa de adesão dos condutores quanto aos limites de velocidade impostos. Para que o sistema tenha impactos positivos na quantidade e severidade dos conflitos – e potencialmente na segurança – é necessário um índice de adesão dos motoristas bastante elevado. Dessa forma, não só o sistema de controle de velocidade precisa ser efetivo, mas também os motoristas precisam estar conscientes dos seus benefícios.

8. CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES

Esta tese apresentou o desenvolvimento de um algoritmo de controle de L.V.V., alimentado por um modelo matemático capaz de prever a probabilidade da ocorrência de conflitos entre veículos, para controlar o tráfego com o objetivo de aumentar a segurança – usando como estudo de caso um trecho da rodovia BR-290/RS, situada na região metropolitana da cidade de Porto Alegre.

Com os cenários propostos, foi possível avaliar a estratégia de L.V.V. para o trecho em estudo, traçando um paralelo com as condições operacionais da rodovia em seu estado atual, evidenciando assim os potenciais benefícios do sistema L.V.V., em especial no que tange à segurança.

8.1 CONCLUSÕES A CERCA DA CALIBRAÇÃO

A metodologia de calibração proposta buscou avaliar a adequabilidade do microssimulador VISSIM para representar as relações fluxo-velocidade medidas em campo e os conflitos veiculares. O processo de calibração apresentado difere da grande maioria dos trabalhos encontrados da literatura no que se refere ao emprego de heurísticas para automatizar o procedimento de calibração. Nesta tese, heurísticas não foram empregadas por duas razões: (i) para garantir que todos os valores das combinações de parâmetros pudessem ser testados, garantindo assim o melhor ajuste, e permitindo também uma melhor compreensão dos resultados de maneira global; e (ii) mapear todos os resultados das combinações, porque o objetivo é analisar tanto as relações de fluxo-velocidade quanto os conflitos.

A calibração proposta melhorou a correlação entre as medidas simuladas e as observações de campo tanto para relações de fluxo-velocidade como para os conflitos. Como esperado, os valores dos parâmetros que aumentaram a correlação entre relações fluxo-velocidade também otimizaram a correlação entre conflitos. Para a relação fluxo-velocidade, o $MAPE_{SRF\ FINAL}$ foi de 1,09%, e para os conflitos, o $MAPE_{CONFLITOS}$ foi de 8,60%. Ambos indicam um ajuste satisfatório do modelo. Cabe destacar a convergência dos parâmetros de calibração para ambos os indicadores utilizados (fluxo-velocidade e conflitos).

A transferibilidade dos modelos de simulação calibrados foi testada com os dados coletados nos locais que não foram usados para calibrar os modelos de simulação. Verificou-se que as relações fluxo-velocidade as relações entre os conflitos simulados e de campo também foram estatisticamente significantes, indicando uma boa transferência do modelo.

Cabe destacar a grande diferença entre os valores MAPE para o modelo calibrado e o modelo com seus parâmetros *default*. Essa diferença evidencia a necessidade de calibração, bem como traz luz às características do tráfego brasileiro. Com um tráfego heterogêneo, tendo cada faixa apresentando diferentes velocidades médias, taxas de fluxo e composição do tráfego, que resultam numa alta frequência de ultrapassagens e trocas de faixa, já era esperado que o desempenho dos parâmetros para o tráfego brasileiro fosse significativamente distinto dos padrões default (típicos do tráfego europeu). Para a relação fluxo-velocidade, uma vez que a capacidade total da rodovia é de 5100 veículos por hora, o modelo *default* aumenta a capacidade em 1200 veículos por hora. Esta diferença deve-se principalmente às características heterogêneas do tráfego brasileiro. Com maior capacidade no modelo *default*, condições de *breakdown* acontecem com menos frequência, levando a um ambiente mais seguro.

Os resultados mostram também que o modelo calibrado aumentou significativamente a representação das iterações entre veículos para todos os limiares de TTC. Isso pode ser explicado pelo fato de que com a calibração da relação fluxo-velocidade em conjunto com a calibração de conflitos, o comportamento dos condutores no modelo pode ser assumido como sendo altamente compatível com o comportamento de campo, representando as interações entre veículos em todas as circunstâncias ou níveis de serviço.

Os modelos calibrados forneceram estimativas razoáveis para os conflitos totais, em especial para conflitos de colisão traseira, indicando que a abordagem pode ser usada em outros ambientes de tráfego, como freeways e rodovias, onde a maioria dos conflitos de tráfego são de colisão traseira e por mudança de faixa.

O comportamento dos motoristas em condições reais de tráfego é diverso e menos previsível do que aqueles definidos pelos modelos de simulação. Dessa forma, os erros (MAPE_{CONFLITOS}) encontrados neste estudo quanto a correlação entre a simulação e os dados de campo refletem a limitação do uso de simulação de tráfego para avaliação de segurança.

Como discutido no capítulo de calibração do simulador, “*O modelo calibrado indica que toda a nuvem de fluxo-velocidade está bem combinada com as medidas de campo. Como mencionado, esta calibração é crucial para melhor representar o comportamento dos veículos, o que também leva a uma melhor representação dos conflitos. Sem esta calibração, os conflitos podem ter um pequeno $MAPE_{Conflicts}$, induzidos por uma combinação de parâmetros singular que não representam os comportamentos de campo*”. Dessa forma, fica evidenciado a importância de uma calibração conjunta de diferentes indicadores, para assim assegurar um ajuste satisfatório do modelo no processo de calibração.

8.2 CONCLUSÕES A CERCA DO MODELO DE PREVISÃO DE CONFLITOS PROPOSTO

Esta modelagem propôs uma estrutura de análise multivariada para a seleção das melhores variáveis a serem incluídas em um modelo LDA, adaptado à previsão de conflitos. Para tanto, foram propostos dois índices de importância variável para identificar as variáveis que melhor classificam os eventos em duas classes (conflito ou não-conflito). As variáveis selecionadas pelo índice levando à acurácia, sensibilidade e especificidade satisfatórias foram então usadas no modelo LDA.

Os resultados indicaram que o modelo LDA-PCA superou o LDA alinhado com a distância Bhattacharyya. A abordagem LDA-PCA obteve uma precisão de classificação média de 76% e classificou corretamente 87% dos conflitos efetivamente ocorridos (avaliados por meio da sensibilidade). As variáveis que impactaram significativamente o modelo estão associadas ao fluxo total, à diferença entre o desvio padrão da ocupação das faixas e o coeficiente de variação da velocidade. Através da variável relacionada às diferenças de ocupação das faixas (criada especificamente para esta pesquisa), o modelo também permitiu avaliar o comportamento característico das rodovias brasileiras. Esta variável foi eficaz na identificação da heterogeneidade típica do padrão de tráfego entre faixas, o que leva a manobras agressivas, resultando em altas taxas de mudanças de faixa e de conflitos de colisão traseira.

O modelo desenvolvido foi baseado em um tamanho de amostra pequeno, mas apresentou uma taxa de classificação satisfatória, indicando um bom ajuste. O modelo de previsão de conflitos desenvolvido neste estudo pode ser usado para monitorar em tempo real as condições de segurança na rodovia e auxiliar no desenvolvimento de medidas dinâmicas de

controle de tráfego (por exemplo, limites de velocidade variável ou *ramp metering*) para reduzir mudanças de faixa e colisões traseiras.

8.3 CONCLUSÕES A CERCA DAS SIMULAÇÕES

O emprego do sistema L.V.V. proposto contribuiu significativamente para a redução da probabilidade de conflitos. O perfil CPM para a modelagem do Cenário com L.V.V. indicou uma redução de 72,13% no tempo de ocorrência de conflitos, evidenciando a contribuição do modelo para a redução do período em que a rodovia opera com indicativo da ocorrência de conflitos.

O sistema L.V.V. aumentou as velocidades médias nos períodos de fluxo elevado, e também reduziu o desvio padrão das velocidades – oferecendo um tráfego mais homogêneo – que contribui para a redução do número de trocas de faixa e, conseqüentemente, para um aumento da segurança. O perfil de velocidade do Cenário com L.V.V. permanece sempre com patamares superiores em relação ao Cenário Base, indicando novamente que a harmonização da velocidade traz benefícios para o trecho em estudo.

É importante destacar também que se o percentual de adesão ao sistema de controle for baixo, a aplicação do L.V.V. pode não apresentar benefícios, podendo inclusive contribuir para o aumento no número de conflitos. Portanto, em uma potencial implantação deste sistema de controle de velocidade em campo, é imprescindível obter uma alta adesão dos usuários para que o sistema possa oferecer benefícios significativos.

8.4 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Trabalhos futuros poderiam reproduzir diferentes configurações de algoritmos, a fim de aperfeiçoar e enriquecer o modelo. Diferentes testes na modelagem podem ser feitos para estender a análise dos impactos do uso do sistema.

Como o modelo de previsão de conflitos proposto é baseado em uma amostra pequena, recomenda-se ampliar esta amostra, bem como expandir este modelo para demais pontos de gargalo – com grandes potenciais de ocorrência de conflitos. Ainda, este modelo é baseado em dados com condições climáticas favoráveis. Dessa forma, é recomendado aplicar esta metodologia também para períodos adversos, como chuva e neblina, para posterior comparação e ajuste destes modelos.

Outra recomendação seria aprofundar a análise referente as taxas de adesão dos condutores – traçando um paralelo com a aceitação dos motoristas brasileiros com a estratégia L.V.V. –, uma vez que os benefícios do modelo estão diretamente relacionados com o nível de adesão.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABDEL-ATY, Mohamed; CUNNINGHAM, Ryan J.; GAYAH, Vikash; HSIA, Liang. Dynamic Variable Speed Limit Strategies for Real-Time Crash Risk Reduction on Freeways. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, v. 2078, p. 108–116, 1 dez. 2008.
- ABDEL-ATY, Mohamed; DILMORE, Jeremy; DHINDSA, Albinder. Evaluation of variable speed limits for real-time freeway safety improvement. *Accident Analysis and Prevention*, v. 38, n. 2, p. 335–45, mar. 2006.
- ABDEL-ATY, Mohamed; UDDIN, Nizam; PANDE, Anurag. Split Models for Predicting Multivehicle Crashes During High-Speed and Low-Speed Operating Conditions on Freeways. In: Presented at the 84th Annual Meeting of the Transportation Research Board, Washington, DC., 2005.
- ABDEL-ATY, Mohamed; UDDIN, Nizam; PANDE, Anurag; ABDALLA, Fathy; HSIA, Liang. Predicting freeway crashes from loop detector data by matched case–control logistic regression. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, v. 1897(1), p. 88–95, 2004.
- AGARWAL, Manish; MAZE, Thomas H; SOULEYRETTE, Reginald R. Impacts of Weather on Urban Freeway Traffic Flow Characteristics and Facility Capacity. Final Technical Report, Center for Transportation Research and Education Iowa State University, USA, 2005.
- AGENCY, Highways. M42 MM monitoring and evaluation three year safety review. 2012.
- AHMED, Mohamed; ABDEL-ATY, Mohamed; YU, Rongjie. A Bayesian Updating Approach for Real-Time Safety Evaluation with Automatic Vehicle Identification Data. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Reserach Board*, v. 12–0368, n. 2280, p. 60–67, 2012.
- ALLABY, Peter; HELLINGA, Bruce; BULLOCK, Mara. Variable speed limits: safety and Operational Impacts of a Candidate Control Strategy for Freeway Applications. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, v. 8, n. 4, p. 671–680, 2007.
- ANZANELLO, M. J.; KAHMANN, A.; MARCELO, M. C. A.; MARIOTTI, K. C.;

- FERRÃO, M. F.; ORTIZ, R. S. Multicriteria wavenumber selection in cocaine classification. *Journal of pharmaceutical and biomedical analysis*, v. 115, p. 562–569, 2015.
- ANZANELLO, Michel J.; ALBIN, Susan L.; CHAOVALITWONGSE, Wanpracha A. Multicriteria variable selection for classification of production batches. *European Journal of Operational Research*, v. 218, n. 1, p. 97–105, 2012.
- AUTEY, Jarvis; SAYED, Tarek; ZAKI, Mohamed H. Safety evaluation of right-turn smart channels using automated traffic conflict analysis. *Accident; analysis and prevention*, v. 45, p. 120–30, 2012.
- BEL, Germà; ROSELL, Jordi. Effects of the 80km/h and variable speed limits on air pollution in the metropolitan area of barcelona. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, v. 23, p. 90–97, 2013.
- BRINCKERHOFF, Parsons; FARRADYNE, Telvent. Evaluation of Active Traffic Management Strategies. Metropolitan Highway System Investment Study, 2010.
- CALEFFI, Felipe; LUCCHESI, Shana T.; ANZANELLO, Michel J.; CYBIS, Helena B. B. (2016). Influência das condições climáticas e de acidentes na caracterização do comportamento do tráfego em rodovias. *Transportes*, 24(4), 57.
- CHANG, Gang-len; PARK, Sung Toon; PE, Jawad Paracha. ITS Field Demonstration: Integration of a VSL Control and Travel Time Estimation for a Recurrently Congested Highway. *Transportation Research Board 90th Annual Meeting, Washington D.C.*, v. 14, n. 3500, p. 1–26, 2011.
- COLEMAN, Guy B.; ANDREWS, Harry C. Image segmentation by clustering. *Proceedings of the IEEE*, v. 67, n. 5, p. 773–785, 1979.
- CUNTO, Flávio; SACCOMANNO, Frank F. Calibration and validation of simulated vehicle safety performance at signalized intersections. *Accident; analysis and prevention*, v. 40, n. 3, p. 1171–9, 2008.
- DIJKSTRA, Atze; DROLENGA, Hans; Van MAARSEVEEN, M. F. AS. M. Do Calculated Conflicts in Microsimulation Model Predict Number of Crashes? *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, v. 2147, p. 105–112, 2010.

DUONG, David; SACCOMANNO, Frank; HELLINGA, Bruce. Calibration of microscopic traffic model for simulating safety performance. Transportation Research Board 89th Annual Meeting. Washington DC, 2010.

DYBA, Tore; DINGSOYR, Torgeir; HANSSEN, Geir K. Applying Systematic Reviews to Diverse Study Types: An Experience Report. First International Symposium on Empirical Software Engineering and Measurement (ESEM 2007), n. 7465, p. 225–234, 2007.

EASYWAY. Speed control evaluation on the A13 motorway (France). Evaluation Expert Group (EW EEG) Document – EEG/11/7, n. 2a Ed., 2012.

ESSA, Mohamed; SAYED, Tarek. Simulated Traffic Conflicts: Do They Accurately Represent Field-Measured Conflicts? Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2015a.

ESSA, Mohamed; SAYED, Tarek. Transferability of calibrated microsimulation model parameters for safety assessment using simulated conflicts. Accident Analysis & Prevention, v. 84, p. 41–53, 2015b.

EWTC II, Report Sweden. E22 Blekinge: Improvements of VSL system,. East West Transportation Corridor II, EWTC II report, 2012.

FAN, Rong; YU, Hao; LIU, Pan; WANG, Wei. Using VISSIM simulation model and Surrogate Safety Assessment Model for estimating field measured traffic conflicts at freeway merge areas. IET Intelligent Transport Systems, v. 7, n. 1, p. 68–77, 2013.

FANG, Jie; HADIUZZAMAN, Mohamed; KARIM, Mohamed; LUO, Ying; QIU, Tony. A Novel VSL Control Strategy with Traffic State Prediction Based Collision Probability Assessments. Transportation Research Board 93rd Annual Meeting, p. 1–18, 2014.

FUKUNAGA, Keinosuke. Introduction to Statistical Pattern Recognition, 2nd ed. Academic Press Professional, Inc., San Diego, CA, USA, 1990.

GAO, Yuan; HE, Guanghui; HOU, Jennifer C. On Exploiting Traffic Predictability in Active Queue Management. 21st Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies, v. 3, p. 1630–1639, 2002.

GEISTEFELDT, Justin. Impact of Variable Speed Limits on Motorway Level of Service.

International Journal of Intelligent Transportation Systems Research, v. 12, n. 2, p. 61–69, 2013.

GETTMAN, Douglas; HEAD, Larry. Surrogate Safety Measures From Traffic Simulation Models. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, v. 1840, n. 1, p. 104–115, 2003.

GETTMAN, Douglas; PU, Lili; SAYED, Tarek; SHELBY, Steve. Surrogate Safety Assessment Model and Validation: Final Report. Federal Highway Administration, Report No. FHWA-HRT-08-051, 2008.

HABTEMICHAEL, Filmon G; SANTOS, Luis de Picado. Safety and Operational Benefits of VSL Under Different Traffic Conditions and Driver Compliance Levels. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, p. 7–15, 2013.

HABTEMICHAEL, Filmon G; SANTOS, Luis de Picado. Safety and Operational Benefits of VSL Under Different Traffic Conditions and Driver Compliance Levels. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, n. 2386, p. 7–15, 2013.

HADIUZZAMAN, M.; FANG, J.; KARIM, M. A.; LUO, Y.; QIU, T. Z. Modeling Driver Compliance to VSL and Quantifying Impacts of Compliance Levels and Control Strategy in Mobility and Safety. Transportation Research Board 93rd Annual Meeting, 1–17. 2014.

HAMDAR, Samer H.; TREIBER, Martin; MAHMASSANI, Hani S.; KESTING, Arne. Modeling Driver Behavior as a Sequential Risk Taking Task. Transportation Research Record, v. 2088, p. 208–217, 2008.

HAYWARD, J.C. Near-miss determination through use of a scale of danger. Highway Research Record., n. 384, p. 24–34, 1972.

HELLINGA, Bruce; MANDELZYS, Michael. Impact of Driver Compliance on the Safety and Operational Impacts of Freeway Variable Speed Limit Systems. Journal of Transportation Engineering, v. 137, n. 4, p. 260–268, 2011.

HOOGENDOORN, S. P.; DAAMEN, W.; HOOGENDOORN, R. G.; GOEMANS, J. W. Assessment of Dynamic Speed Limits on Freeway A20 near Rotterdam, Netherlands. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, v. 2380, p.

61–71, 2013.

HOSSAIN, Moinul; MUROMACHI, Yasunori. A Bayesian network based framework for real-time crash prediction on the basic freeway segments of urban expressways. *Accident; analysis and prevention*, v. 45, p. 373–81, 2012.

HOURDOS, John; GARG, Vishnu; MICHALOPOULOS, Panos; DAVIS, Gary. Real-Time Detection of Crash-Prone Conditions at Freeway High-Crash Locations. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, v. 1968 (1), p. 83–91, 2006.

HUANG, Fei; LIU, Pan; YU, Hao; WANG, Wei. Identifying if VISSIM simulation model and SSAM provide reasonable estimates for field measured traffic conflicts at signalized intersections. *Accident; analysis and prevention*, v. 50, p. 1014–24, 2013.

ISLAM, M. Tazul; HADIUZZAMAN, M.; FANG, Jie; QIU, Tony Z.; EL-BASYOUNY, Karim. Assessing Mobility and Safety Impacts of a Variable Speed Limit Control Strategy. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, n. 2364, p. 1–11, 2013.

JIA, Yuhan; WU, Jianping; DU, Yiman; QI, Geqi. Impacts of rainfall weather on urban traffic in beijing: analysis and modeling. *Physics and Society*, p. 1–13, 2014.

JIANG, Xuan; PAN, Liu; LI, Zhibin; WAN, Jingjing. Evaluating the Control Strategies for Freeway Variable Speed Limit Systems in PARAMICS: Selection of the Optimal Posted Speed Limit. *Proceedings of ICCTP 2011*, p. 210–218, 2011.

JUNG, Claudio R; ORTIZ, Rafael S; LIMBERGER, Renata; MAYORGA, Paulo. A new methodology for detection of counterfeit Viagra® and Cialis® tablets by image processing and statistical analysis. *Forensic science international*, v. 216, n. 1–3, p. 92–6, 2012.

KIANFAR, J; EDARA, P; SUN, C. Operational Analysis Of A Freeway Variable Speed Limit System-Case Study Of Deployment In Missouri. *Transportation Research Board 92nd Annual Meeting, Washington D.C.*, v. 7990, n. 573, p. 1–18, 2013.

KIRK, Andy. M42 Active Traffic Management (ATM). Highways Agency, UK, 2007.

KITCHENHAM, Barbara; CHARTERS, S. Guidelines for performing Systematic Literature Reviews in Software Engineering. Technical Report EBSE-2007-01, School of Computer

Science and Mathematics, Keele University, UK, 2007.

KWON, Eil; BRANNAN, Daniel; SHOUMAN, Kahled; ISACKSON, Cassandra; ARSENEAU, Bernie. Development and Field Evaluation of Variable Advisory Speed Limit System for Work Zones. *Transportation Research Record*, v. 2015, p. 12–18, 2007.

LEE, Chris; ABDEL-ATY, Mohamed. Testing Effects of Warning Messages and Variable Speed Limits on Driver Behavior Using Driving Simulator. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, v. 2069, p. 55–64, 2008.

LEE, Chris; HELLINGA, B; SACCOMANNO, F. Real-time crash prediction model for application to crash prevention in freeway traffic. *Transportation Research Record*, v. 1840, n. 1, p. 67–77, 2003.

LEE, Chris; HELLINGA, Bruce; SACCOMANNO, Frank. Assessing Safety Benefits of Variable Speed Limits. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, n. 1897, p. 183–190, 2004.

LEE, Chris; HELLINGA, Bruce; SACCOMANNO, Frank. Evaluation of variable speed limits to improve traffic safety. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, v. 14, n. 3, p. 213–228, jun. 2006.

LEE, Chris; SACCOMANNO, Frank; HELLINGA, Bruce. Analysis of Crash Precursors on Instrumented Freeways. *Transportation Research Record*, v. 1784, n. 1, p. 1–8, 2002.

LEE, Jinwoo Brian; QIAN, Gongbin; CHUNG, Edward. Using Variable Speed Limits for Motorway Off-ramp Queue Protection. *Transportation Research Board 92rd Annual Meeting*, p. 1–20, 2013.

LI, Zhibin; AHN, Seongchae; CHUNG, Koohong; RAGLAND, David R.; WANG, Wei; YU, Jeong W. Surrogate safety measure for evaluating rear-end collision risk related to kinematic waves near freeway recurrent bottlenecks. *Accident; analysis and prevention*, v. 64, p. 52–61, 2014.

LI, Zhibin; LIU, Pan; LI, Ye; et al. Development of a Variable Speed Limit Strategy based on Car Following Behaviors for Improving Freeway Safety under Severe Weathers. *Transportation Research Board 93rd Annual Meeting*, v. 288, p. 1–18, 2014.

LI, Zhibin; LIU, Pan; WANG, Wei; et al. Development of a Control Strategy of Variable Speed Limits to Reduce Rear-End Collision Risks Near Freeway Recurrent Bottlenecks. *IEEE Transactions in Intelligent Transportation Systems*, v. 15, n. 2, p. 866–877, abr. 2014.

LIN, Pei-Wei; KANG, Kyeong-Pyo; CHANG, Gang-Len. Exploring the Effectiveness of Variable Speed Limit Controls on Highway Work-Zone Operations. *Journal of Intelligent Transportation Systems*, v. 8, n. 3, p. 155–168, 2004.

LU, Xiao-Yun; SHLADOVER, Steven. Review of Variable Speed Limits and Advisories. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, v. 2423, n. 2423, p. 15–23, 2014.

MCCABE, Keith; RILEY, Andy. A flexible approach to motorway control. *PROCEEDINGS OF THE 13th ITS WORLD CONGRESS, LONDON, 8-12 OCTOBER*, p. 37–42, 2006.

MESSMER, A; PAPAGEORGIOU, M. METANET: A macroscopic simulation program for motorway networks. *Traffic Engineering & Control*, v. 31, n. 9, p. 466–470, 1990.

MIRSHAHI, Mohammad; OBENBERGER, Jon; FUHS, Charles A.; HOWARD, Charles E.; KRAMMES, Raymond A.; KUHN, Beverly T.; MAYHEW, Robin M.; MOORE, Margaret A.; SAHEBJAM, Khani; STONE, Craig J.; YUNG, Jessie L. Active Traffic Management: The Next Step in Congestion Management. Federal Highway Administration, Report no. FHWA-PL-07-012, Washington D.C., 2007.

NEZAMUDDIN, N et al. Active traffic management strategies: implications for freeway operations and traffic safety. *Transportation Research Board 90st Annual Meeting*, 2011.

NISSAN, Albania. Evaluation of Recommended Variable Speed Limits for Motorway Traffic Control: Case of E4-Motorway in Stockholm. *Transportation Research Board 92rd Annual Meeting*, 2013.

NISSAN, Albania; KOUTSOPOULOS, Haris N. Evaluation of the Impact of Advisory Variable Speed Limits on Motorway Capacity and Level of Service. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, v. 16, p. 100–109, 2011.

OH, Cheol; OH, Jun Seok; RITCHIE, Stephen G. Real-time hazardous traffic condition warning system: Framework and evaluation. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation*

Systems, v. 6, n. 3, p. 265–272, 2005.

PAPAGEORGIU, Markos; KOSMATOPOULOS, Elias; PAPAMICHAIL, Ioannis. Effects of Variable Speed Limits on Motorway Traffic Flow. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, v. 2047, n. 1, p. 37–48, 2008.

PARK, Byungkyu Brian; QI, Hongtu Maggie. Microscopic simulation model calibration and validation for freeway work zone network - a case study of VISSIM. 2006 IEEE Intelligent Transportation Systems Conference, p. 1471–1476, 2006.

PARK, Junhyung; OH, Cheol. Relating Freeway Traffic Accidents to Inductive Loop Detector Data Using Logistic Regression. 4th IRTAD Conference 2009, 2009.

PAUW, Ellen De; DANIELS, Stijn; FRANCKX, Laurent; MAYERES, Inge. Dynamic speed limits on Flemish motorways: Effects on crashes and the balance against the costs. Steunpunt Verkeersveiligheid | RA-2015-005, 2015.

PHAM, Minh-Hai; DUMONT, André-Gilles. Evaluation of Variable Speed Limits in a Risk-Sensitive Traffic Management System. IEEE Forum on Integrated and Sustainable Transportation Systems, p. 289–294, 2011.

PIAO, J.; MCDONALD, M. Safety Impacts of Variable Speed Limits - A Simulation Study. Proceedings of the 11th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems, p. 833–837, out. 2008.

PTV. VISSIM User Manual - V. 8.0. PTV Planung Transport Verkehr AG, Karlsruhe, Germany, 2014.

RATROUT, Nedal T; RAHMAN, Syed Masiur. A Comparative Analysis of Currently Used Microscopic and Macroscopic Traffic. Science, v. 34, n. 1, p. 121–133, 2009.

RENCHE, Alvin C. Methods of Multivariate analysis. Wiley Interscience: New York, USA, 2002.

ROSHANDEL, Saman; ZHENG, Zuduo; WASHINGTON, Simon. Impact of real-time traffic characteristics on freeway crash occurrence: Systematic review and meta-analysis. Accident; analysis and prevention, v. 79, p. 198–211, 2015.

SAHA, Promotes; YOUNG, Rhonda Kae. Weather-Based Safety Analysis for the Effectiveness of Rural VSL Corridors. Transportation Research Board 93rd Annual Meeting, p. 1–12, 2014.

SAMIMI, Amir; HELLINGA, Bruce. Sensitivity of a real-time freeway crash prediction model to calibration optimality. *European Transport Research Review*, v. 4, n. 3, p. 167–174, 18 jan. 2012.

SAUNIER, N; SAYED, T. Automated road safety analysis using video data. *Transportation Research Record*, v. 2019, p. 57–64, 2007.

SAYED, Tarek; ZAKI, Mohamed H.; AUTEY, Jarvis. Automated safety diagnosis of vehicle–bicycle interactions using computer vision analysis. *Safety Science*, v. 59, p. 163–172, 2013.

SISIOPIKU, Virginia P; SULLIVAN, Andrew; FADEL, Germin. Implementing Active Traffic Management Strategies in the U.S. University Transportation Center for Alabama, Management and Safety of Transportation Systems, Report no. 08206, USA, 2009.

STOELHORST, Henk; SCHREUDER, Marco; POLDERDIJK, Suerd. Summary results of dutch field trials with dynamic speed limits (Dynamax). 18th ITS World Congress, p. 1–13, 2011.

TALEBPOUR, Alireza; MAHMASSANI, Hani S; HAMDAR, Samer H. Speed Harmonization : Effectiveness Evaluation under Congested Conditions. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, n. 2391, p. 69–79, 2013.

THAKURIAH, Piyushimita; YANOS, George; LIN, Jane; METAXATOS, Paul; SULO, Rajmonda; PU, Wenjing; MLBEKEANI, Lumumba. Including Weather Effects In a Real-Time Traffic Information Environment - Exploratory Analysis and Alternative Models. In *Proceedings of the 15th Intelligent Transportation Systems World Congress, New York City - USA*, 2008.

VADDE, Ramakrishna et al. A simulation study of using active traffic management strategies on congested freeways. *Journal of Modern Transportation*, v. 20, n. 3, p. 178–184, 27 set. 2012.

XU, Chengcheng; LIU, Pan; WANG, Wei; JIANG, Xuan. Development of a crash risk index to identify real time crash risks on freeways. *KSCE Journal of Civil Engineering*, v. 17, n. 7, p. 1788–1797, 2013.

XU, Chengcheng; LIU, Pan; WANG, Wei; LI, Zhibin. Evaluation of the impacts of traffic states on crash risks on freeways. *Accident Analysis & Prevention*, v. 47, p. 162–171, 2012.

XU, Chengcheng; TARKO, Andrew P.; WANG, Wei; LIU, Pan. Predicting crash likelihood and severity on freeways with real-time loop detector data. *Accident Analysis and Prevention*, v. 57, p. 30–39, 2013.

XU, Chengcheng; WANG, Wei; LIU, Pan. Identification of freeway crash-prone traffic conditions for traffic flow at different levels of service. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, v. 69, p. 58–70, 2014.

YANG, Xianfeng; LU, Yang Carl. Development of Optimal Variable Speed Limit Control System for Freeway Work Zone Operations. *Transportation Research Board 93rd Annual Meeting*, p. 1–18, 2014.

YANG, Yanni et al. Optimizing Variable Speed Limits For Efficient, Safe and Sustainable Mobility. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1 e 2, n. 2333, p. 37–45, 2013.

YU, Rongjie; ABDEL-ATY, Mohamed. An optimal variable speed limits system to ameliorate traffic safety risk. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, v. 46, p. 235–246, set. 2014.

YU, Rongjie; ABDEL-ATY, Mohamed. Utilizing support vector machine in real-time crash risk evaluation. *Accident Analysis & Prevention*, v. 51, p. 252–259, 2013.

ZHENG, Zuduo; AHN, Soyoung; MONSERE, Christopher M. Impact of traffic oscillations on freeway crash occurrences. *Accident Analysis and Prevention*, v. 42, n. 2, p. 626–636, 2010.

ZHOU, Huanyun; HUANG, Fei. Development of Traffic Safety Evaluation Method based on Simulated Conflicts at Signalized Intersections. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, v. 96, p. 881–885, 2013.

ZHOU, Si'em; LI, Keping; SUN, Jian; HAN, Pingchao. Calibration and Validation Procedure for Intersection Safety Simulation Using SSAM and VISSIM. ICCTP: Integrated Transportation Systems, p. 603–615, 2010.

Anexo I

Este anexo apresenta a revisão sistemática realizada sobre como a harmonização da velocidade pode ser empregada para melhorar a segurança.

1. REVISÃO SISTEMÁTICA DE LIMITES DE VELOCIDADE VARIÁVEL EMPREGADOS PARA MELHORAR A SEGURANÇA

Na maioria dos estudos com L.V.V., modelos de probabilidade de colisão são adotados apenas como uma medida de desempenho do sistema. O algoritmo de controle L.V.V. não leva em conta o risco de colisões em períodos futuros. Portanto, esses algoritmos não usam os impactos dos sistemas L.V.V. para escolher o plano de controle baseado em parâmetros ligados à segurança. Usualmente, estes sistemas buscam apenas melhorar o fluxo do tráfego, e fazem uso de modelos de probabilidade de colisão somente como uma forma de avaliação posterior da estratégia (ABDEL-ATY; DILMORE; DHINDSA, 2006; FANG *et al.*, 2014).

Recentemente, estudos foram propostos com o objetivo de usar o L.V.V. com base em avaliações de segurança, como em (FANG *et al.*, 2014). Estes estudos visam aumentar a segurança nas rodovias de acordo com as informações relativas à segurança do tráfego em tempo real.

Através destes estudos é possível determinar o estado da arte e prática sobre como o L.V.V. é implantado para melhorar a segurança e quais são os impactos desses sistemas. Assim, esta revisão sistemática tem o objetivo de mapear e descrever estudos que empregaram L.V.V. para aumentar a segurança em rodovias.

Dessa forma, essa revisão sistemática permitiu elencar e caracterizar as variáveis de tráfego que melhor descrevem os eventos relacionados às questões de segurança em uma rodovia.

1.1 METODOLOGIA DA REVISÃO SISTEMÁTICA

Uma revisão sistemática permite a interpretação e avaliação de estudos relacionados a uma questão de pesquisa ou tópico de interesse. Há muitas razões para se realizar uma revisão sistemática: sintetizar estudos sobre uma abordagem ou tecnologia, identificar novas questões

de pesquisa, e orientar pesquisas para áreas inexploradas ou interessantes dentro de um tópico de interesse (KITCHENHAM; CHARTERS, 2007). As seções seguintes (4.1.1 a 4.1.5) apresentam os cinco passos propostos por Kitchenham e Charters (2007) para realizar uma revisão sistemática, dando suporte ao método utilizado nesta revisão.

1.1.1 Questões de pesquisa

A fim de destacar e investigar o emprego do L.V.V. para melhorar a segurança, foram propostas as seguintes questões de pesquisa:

I. Como o L.V.V. é empregado para melhorar a segurança nas rodovias?

II. Quais são os impactos de segurança do L.V.V. em rodovias?

1.1.2 Estratégia de pesquisa

Uma pesquisa bibliográfica foi conduzida através de uma pesquisa automatizada, a fim de capturar artigos relevantes sobre o tema proposto. Os bancos de dados utilizados para a pesquisa foram: *Scopus*; *ScienceDirect – Elsevier*; *SpringerLink*; e *TRID – Transportation Research Information Database*. Palavras-chave aplicadas na busca automatizada usando *strings*, bem como operadores booleanos foram:

[("Speed harmonization" OR "Variable speed limits") AND ("Safety" OR "Collision"
OR "Incident" OR "Accident")]

Como um dos critérios da pesquisa foi a seleção de estudos apenas em língua inglesa, as palavras-chave foram empregadas já nesta língua.

1.1.3 Critérios e procedimentos de seleção

Os estudos selecionados de acordo com os procedimentos detalhados nas seções anteriores foram submetidos a uma análise de relevância. Os artigos selecionados foram classificados como "artigos a serem incluídos na análise" (I) e "artigos excluídos" (E) de acordo com os seguintes critérios: (I) Apenas estudos acadêmicos em língua inglesa; (I) sistemas L.V.V. que operam com o objetivo de melhorar a segurança nas rodovias; (I) Estudos que apresentam claramente impactos na segurança quando o L.V.V. está operando; (E) Estudos que apresentam sistemas L.V.V. com o objetivo de reduzir apenas o congestionamento, não

procurando melhorar a segurança como meta, mas apenas como um benefício esperado do sistema; (E) Trabalhos duplicados.

A análise de relevância envolveu as seguintes etapas: (i) leitura de títulos e resumos dos trabalhos, atribuindo status I e E, eliminando assim estudos irrelevantes para as questões de pesquisa sob investigação; (ii) leitura da introdução e conclusão dos trabalhos selecionados no passo anterior, e atribuindo status I e E de acordo com o mesmo procedimento; (iii) ler os artigos selecionados na etapa anterior na íntegra, aplicando novamente os mesmos critérios; (iv) selecionar e documentar os trabalhos restantes de acordo com o método descrito nas seções a seguir.

1.1.4 Avaliação de qualidade dos trabalhos selecionados

A qualidade do estudo pode constituir um critério para inclusão, exclusão, ou dar suporte a análise e síntese dos trabalhos (DYBA; DINGSOYR; HANSSEN, 2007). No entanto, na presente revisão sistemática esta avaliação de qualidade não qualificou os estudos com um índice de qualidade global. A avaliação da qualidade dos trabalhos foi utilizada principalmente como meio de orientar a interpretação dos resultados para análise e síntese, a fim de organizar os artigos na interpretação dos resultados. Esta avaliação da qualidade baseia-se nos critérios definidos por Dyba, Dingsoyr e Hanssen (2007), que utiliza uma classificação em escala binária. Os critérios foram:

- a) O estudo relatou pesquisas empíricas ou foi apenas um relatório de “lições aprendidas” baseado na opinião de especialistas?
- b) Os objetivos foram claramente relatados (incluindo uma justificativa para o motivo pelo qual o estudo foi realizado)?
- c) Houve uma descrição adequada do contexto em que a pesquisa foi realizada?
- d) Foram utilizados e descritos métodos adequados de coleta de dados?
- e) O estudo apresentou um novo modelo matemático ou foi baseado em modelos anteriores?
- f) A pesquisa foi baseada em simulação computacional?

- g) O estudo forneceu conclusões claras, com resultados críveis e conclusões justificadas?

1.1.5 Extração e síntese dos trabalhos

Foi elaborado um formulário de extração de dados com o objetivo de reunir as informações necessárias para atender aos objetivos desta revisão, classificando e respondendo as questões de pesquisa. Inicialmente, foram extraídas as seguintes informações de cada estudo: autor, título, fonte, ano, volume, páginas, resumo, palavras-chave, e se aderiram aos critérios de inclusão.

Uma vez que todos os estudos foram documentados e classificados pelas etapas de pré-seleção, os trabalhos selecionados para análise foram analisados qualitativamente. Os resultados dessa análise permitiram organizar e identificar as propriedades e características dos estudos relacionados a responder às questões de pesquisa levantadas nesta revisão, conforme relatado nas seções 4.2 e 4.3.

1.2 RESULTADOS

Esta revisão foi realizada no período entre maio de 2016 a agosto de 2016, de acordo com os procedimentos apresentados na seção 4.1. Após a realização das etapas descritas na seção 4.1, a pesquisa automatizada nos repositórios de pesquisa resultou em 153 estudos. Outra seleção baseada nos títulos e resumos dos trabalhos resultou em 75 estudos. A etapa de leitura da introdução e conclusão levou à seleção de 44 estudos. A seleção final, após leitura completa, levou a 22 estudos remanescentes para análise, como mostra a Figura 1.

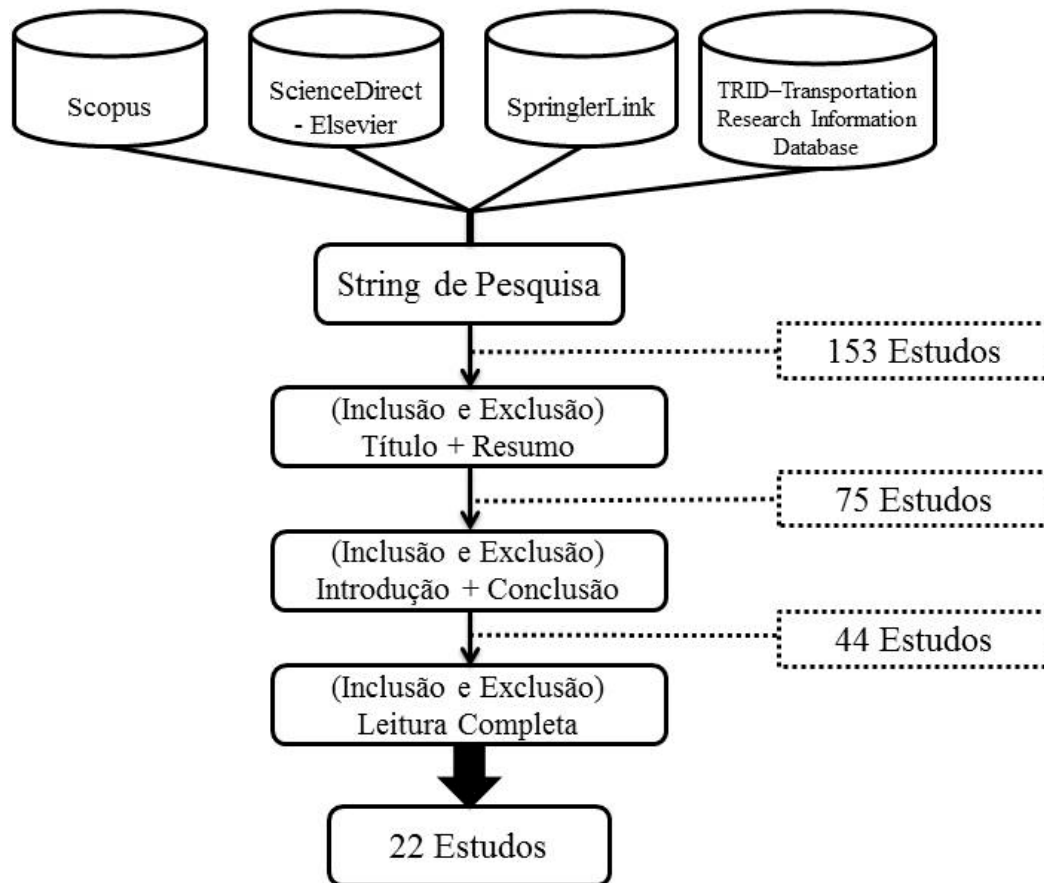


Figura 1: Processo de filtragem dos trabalhos pesquisados.

Os 22 estudos analisados nesta revisão são apresentados a seguir. Cada referência é precedida pela sigla ES (Estudo Selecionado).

- [ES 01] ABDEL-ATY, Mohamed; DILMORE, Jeremy; DHINDSA, Albinder. Evaluation of variable speed limits for real-time freeway safety improvement. *Accident Analysis and Prevention*, v. 38, n. 2, p. 335–45, mar. 2006.
- [ES 02] ABDEL-ATY, Mohamed; CUNNINGHAM, Ryan J.; GAYAH, Vikash; HSIA, Liang. Dynamic Variable Speed Limit Strategies for Real-Time Crash Risk Reduction on Freeways. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, v. 2078, p. 108–116, 1 dez. 2008.
- [ES 03] ALLABY, Peter; HELLINGA, Bruce; BULLOCK, Mara. Variable Speed Limits: Safety and Operational Impacts of a Candidate Control Strategy for Freeway Applications. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, v. 8, n. 4, p. 671–680, dez. 2007.
- [ES 04] FANG, Jie; HADIUZZAMAN, Mohamed; KARIM, Mohamed; LUO, Ying; QIU, Tony. A Novel VSL Control Strategy with Traffic State Prediction Based Collision Probability Assessments. *Transportation Research Board 93rd Annual Meeting*, p. 1–18, 2014.

- [ES 05] HABTEMICHAEL, Filmon G; SANTOS, Luis de Picado. Safety and Operational Benefits of VSL Under Different Traffic Conditions and Driver Compliance Levels. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, n. 2386, p. 7–15, 2013.
- [ES 06] HADIUZZAMAN, M.; FANG, J.; KARIM, M. A.; LUO, Y.; QIU, T. Z. Modeling Driver Compliance to VSL and Quantifying Impacts of Compliance Levels and Control Strategy in Mobility and Safety. *Transportation Research Board 93rd Annual Meeting*, 1–17. 2014.
- [ES 07] ISLAM, M.; HADIUZZAMAN, M.; FANG, J.; QIU, T. Z.; EL-BASYOUNY, K. Assessing Mobility and Safety Impacts of a Variable Speed Limit Control Strategy. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, n. 2364, p. 1–11, 1 dez. 2013.
- [ES 08] JIANG, Xuan; PAN, Liu; LI, Zhibin; WAN, Jingjing. Evaluating the Control Strategies for Freeway Variable Speed Limit Systems in PARAMICS: Selection of the Optimal Posted Speed Limit. *Proceedings of ICCTP 2011*, p. 210–218, 2011.
- [ES 09] LEE, Chris; HELLINGA, Bruce; SACCOMANNO, Frank. Assessing Safety Benefits of Variable Speed Limits. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, n. 1897, p. 183–190, 2004.
- [ES 10] LEE, Chris; HELLINGA, Bruce; SACCOMANNO, Frank. Evaluation of variable speed limits to improve traffic safety. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, v. 14, n. 3, p. 213–228, jun. 2006.
- [ES 11] LEE, Jinwoo Brian; QIAN, Gongbin; CHUNG, Edward. Using Variable Speed Limits for Motorway Off-ramp Queue Protection. *Transportation Research Board 92rd Annual Meeting*, p. 1–20, 2013.
- [ES 12] LI, Zhibin; LIU, Pan; LI, Ye; et al. Development of a Variable Speed Limit Strategy based on Car Following Behaviors for Improving Freeway Safety under Severe Weathers. *Transportation Research Board 93rd Annual Meeting*, v. 288, p. 1–18, 2014.
- [ES 13] LI, Zhibin; LIU, Pan; WANG, Wei; et al. Development of a Control Strategy of Variable Speed Limits to Reduce Rear-End Collision Risks Near Freeway Recurrent Bottlenecks. *IEEE Transactions in Intelligent Transportation Systems*, v. 15, n. 2, p. 866–877, abr. 2014.
- [ES 14] NEZAMUDDIN, N et al. Active traffic management strategies: implications for freeway operations and traffic safety. *Transportation Research Board 90st Annual Meeting*, 2011.
- [ES 15] PHAM, Minh-Hai; DUMONT, André-Gilles. Evaluation of Variable Speed Limits in a Risk-Sensitive Traffic Management System. *IEEE Forum on Integrated and Sustainable Transportation Systems*, p. 289–294, 2011.
- [ES 16] PIAO, J.; MCDONALD, M. Safety Impacts of Variable Speed Limits - A Simulation Study. *Proceedings of the 11th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems*, p. 833–837, out. 2008.

- [ES 17] SAHA, Promotes; YOUNG, Rhonda Kae. Weather-Based Safety Analysis for the Effectiveness of Rural VSL Corridors. Transportation Research Board 93rd Annual Meeting, p. 1–12, 2014.
- [ES 18] SAMIMI, Amir; HELLINGA, Bruce. Sensitivity of a real-time freeway crash prediction model to calibration optimality. European Transport Research Review, v. 4, n. 3, p. 167–174, 18 jan. 2012.
- [ES 19] TALEBPOUR, Alireza; MAHMASSANI, Hani S; HAMDAR, Samer H. Speed Harmonization : Effectiveness Evaluation under Congested Conditions. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, n. 2391, p. 69–79, 2013.
- [ES 20] VADDE, Ramakrishna et al. A simulation study of using active traffic management strategies on congested freeways. Journal of Modern Transportation, v. 20, n. 3, p. 178–184, 27 set. 2012.
- [ES 21] YANG, Yanni et al. Optimizing Variable Speed Limits For Efficient, Safe and Sustainable Mobility. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 1 e 2, n. 2333, p. 37–45, 2013.
- [ES 22] YU, Rongjie; ABDEL-ATY, Mohamed. An optimal variable speed limits system to ameliorate traffic safety risk. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, v. 46, p. 235–246, set. 2014.

A Tabela 1 apresenta a aplicação dos sete critérios escolhidos para avaliar a qualidade dos estudos, com os símbolos (✓) indicando "sim" e (✗) indicando "não". A lista de critérios é descrita na Seção 4.1.4. Mais detalhes sobre os estudos selecionados podem ser encontrados na seção de Discussão deste capítulo.

Tabela 1: Avaliação de qualidade

Ref.	O estudo relatou pesquisas empíricas ou foi apenas um relatório de “lições aprendidas” baseado na opinião de especialistas?	Os objetivos foram claramente relatados?	Houve uma descrição adequada do contexto em que a pesquisa foi realizada?	Foram utilizados e descritos métodos adequados de coleta de dados?	O estudo apresentou um novo modelo matemático ou foi baseado em modelos anteriores?	A pesquisa foi baseada em simulação computacional?	O estudo forneceu conclusões claras, com resultados críveis e conclusões justificadas?
[ES 01]	✓	✓	✓	✓	✗	✓	✓
[ES 02]	✓	✗	✓	✓	✗	✓	✓
[ES 03]	✗	✓	✓	✓	✗	✓	✗
[ES 04]	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
[ES 05]	✗	✓	✓	✓	✗	✓	✓
[ES 06]	✓	✓	✓	✓	✗	✓	✓
[ES 07]	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
[ES 08]	✗	✗	✓	✗	✗	✓	✗
[ES 09]	✓	✓	✓	✓	✗	✓	✓
[ES 10]	✓	✗	✓	✓	✓	✓	✓
[ES 11]	✓	✓	✓	✓	✗	✓	✓
[ES 12]	✓	✓	✗	✓	✓	✓	✓
[ES 13]	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
[ES 14]	✓	✓	✓	✓	✗	✓	✓
[ES 15]	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
[ES 16]	✓	✓	✓	✗	✗	✓	✗
[ES 17]	✓	✓	✓	✓	✓	✗	✓
[ES 18]	✓	✓	✓	✓	✗	✓	✓
[ES 19]	✓	✓	✓	✗	✗	✓	✓
[ES 20]	✗	✓	✓	✓	✗	✓	✗
[ES 21]	✓	✓	✗	✓	✗	✓	✗
[ES 22]	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓

Conforme indicado na seção 4.1.4, a presente revisão sistemática aplicou essas questões para organizar os trabalhos e orientar a interpretação dos resultados para análise e síntese. Essas questões permitiram classificar os estudos que apresentam pesquisa original e que se baseiam em trabalhos anteriores. Artigos com novo modelo matemático puderam ser separados daqueles que foram baseados em modelos anteriores. Além disso, características técnicas, tais como: objetivos claramente relatados, apropriada coleta de dados, se a pesquisa foi baseada em simulação por computador, e se os estudos fornecem resultados claros, permitiram uma melhor organização da análise dos trabalhos.

1.3 DISCUSSÃO

Esta seção analisa e discute os conteúdos e características dos 22 estudos selecionados nesta revisão sistemática. Esta análise foi feita para extrair informações relevantes e responder às questões de pesquisa propostas.

A revisão mostrou tanto os estudos que aplicam modelos de previsão de colisões como entrada para sistemas L.V.V., e estudos que empregaram apenas os impactos de segurança como uma ferramenta para avaliar a eficácia dos sistemas L.V.V. após a sua implementação. A análise evidenciou que o L.V.V. traz resultados positivos quanto à segurança em ambos os casos. Através dos modelos e sistemas discutidos, os resultados sempre apontam para o L.V.V. harmonizando o fluxo de tráfego e reduzindo conflitos e acidentes, aumentando assim a segurança.

Enquanto alguns estudos apresentam novos modelos matemáticos para abordar a segurança, outros aplicam modelos de segurança apresentados em pesquisas anteriores. Alguns destes trabalhos são baseados no modelo apresentado por Lee, Hellinga e Saccomanno (2003), e servem como precursor de potenciais de colisão. Este modelo aplica características de fluxo de tráfego para explicar os efeitos do desempenho do tráfego na ocorrência de acidentes, refletida por “precursores de colisão”. Precursores de colisão são condições de tráfego existentes antes da ocorrência de colisões. O modelo expressa a frequência de colisão em função de uma variedade de características ambientais e de tráfego, como segue:

$$\textit{Crash frequency} = f(\textit{crash precursors, external control factors, exposure}) \quad (1)$$

Através desta relação funcional, o modelo de simulação é calibrado usando dados reais de colisão e os efeitos de precursores de colisão no potencial de colisão podem ser examinados.

Os precursores usados para representar as condições de fluxo de tráfego antes da ocorrência de colisão são: (i) variação média de velocidade em cada pista (CVS1); (ii) variação média da diferença de velocidade entre pistas adjacentes (CVS2) – para avaliar mudanças de faixa; e (iii) densidade de tráfego (D). A variação das velocidades é medida pelo coeficiente de variação da velocidade (CVS) (= desvio padrão da velocidade / velocidade média) calculado ao longo do tempo de duração da observação. A expressão matemática destes três precursores está descrita em (LEE; SACCOMANNO; HELLINGA, 2002). Se houver uma velocidade significativamente menor a jusante, os motoristas devem reagir prontamente para ajustar sua velocidade. Estas condições são susceptíveis para aumentar o potencial de colisão.

Lee, Hellinga e Saccomanno (2003) também desenvolveram um modelo log-linear agregado para analisar os efeitos de precursores de colisão e fatores externos no potencial de colisão. Este modelo permite investigar a natureza da relação entre os precursores selecionados e a frequência de colisões ajustada pelo nível de exposição adequado. Assim, a taxa de colisão pode ser descrita da seguinte forma:

$$Crash\ Rate = \frac{F}{EXP^\beta} = f(\theta \cdot \lambda_{CVS(i)} \cdot \lambda_{D(j)} \cdot \lambda_{Q(k)} \cdot \lambda_{R(l)} \cdot \lambda_{P(m)}) \quad (2)$$

Onde: F é o número esperado de colisões durante o período de análise; EXP é a exposição em veículos-quilômetro de viagem; β é o parâmetro de exposição; θ é uma constante; $\lambda_{CVS(i)}$ é o efeito da variável precursora de colisão CVS (variação média da velocidade) com i níveis; $\lambda_{D(j)}$ é o efeito da variável precursora D com j níveis; $\lambda_{Q(k)}$ é o efeito da variável precursora de colisão Q com k níveis; $\lambda_{R(l)}$ é o efeito da geometria da rodovia com l níveis; $\lambda_{P(m)}$ é o efeito da hora do dia com m níveis.

As seções seguintes (4.3.1 e 4.3.2) apresentam os resultados da revisão sistemática quanto às duas questões de pesquisa, visando avaliar com o L.V.V. é empregado para melhorar a segurança. Os sistemas L.V.V. propostos nos trabalhos analisados são apresentados e as características dos modelos empregados para avaliar os impactos de segurança são descritos. Destaca-se que dos 22 estudos a serem discutidos, apenas o estudo de [ES 17 – Saha e Young (2014)] não emprega simulação.

1.3.1 Como o L.V.V. é empregado para melhorar a segurança nas rodovias?

Esta subseção apresenta os resultados da revisão sistemática quanto a primeira questão de pesquisa, que visa relacionar como L.V.V. é implantado para melhorar a segurança. Os sistemas L.V.V. propostos nos estudos são apresentados, e as características dos modelos empregados para avaliar os impactos de segurança são descritas.

Para todos os trabalhos, a rede em estudo é segmentada em diferentes seções, geralmente delimitadas pela posição dos contadores de tráfego (laços indutivos). Os pórticos e os sinais de mensagem utilizados para exibir os limites de velocidade são geralmente posicionados no mesmo lugar que os contadores. A ativação do sistema L.V.V. é controlada por dados de tráfego em tempo real e o período de tempo de uso da estratégia é fixo {[ES 01 – Abdel-Aty, Dilmore e Dhindsa (2006)], [ES 02 – Abdel-Aty, Cunningham, Gayah e Hsia (2008)], [ES 08 – Jiang, Liu , Li e Wan (2011)], [ES 09 – Lee, Hellinga e Saccomanno (2004)], [ES 10 – Lee, Hellinga e Saccomanno (2006)], [ES 13 – Li, Liu e Wang (2014)], [ES 15 – Pham e Dumont (2011)] e [ES 22 – Yu e Abdel-Aty (2014)]} ou variável [ES 04 – Fang, Hadiuzzaman, Karim, Luo e Qiu (2014)]; A duração da intervenção (ou período de utilização) representa o período em que a intervenção está em vigor, bem como a frequência do período de decisão.

O sistema L.V.V. pode ser implantado no “espaço” {[ES 01 – Abdel-Aty, Dilmore e Dhindsa (2006)], [ES 02 – Abdel-Aty, Cunningham, Gayah e Hsia (2008)], [ES 04 – Fang, Hadiuzzaman, Karim, Luo e Qiu (2014)], [ES 08 – Jiang, Liu , Li e Wan (2011)], [ES 09 – Lee, Hellinga e Saccomanno (2004)], [ES 10 – Lee, Hellinga e Saccomanno (2006)], [ES 13 – Li, Liu e Wang (2014)], [ES 15 – Pham e Dumont (2011)] e [ES 22 – Yu e Abdel-Aty (2014)]} ou no “tempo” {[ES 04 – Fang, Hadiuzzaman, Karim, Luo e Qiu (2014)] e [ES 13 – Li, Liu e Wang (2014)]} em torno da área de um gargalo; “Tempo” de implantação corresponde a reduzir gradualmente os limites de velocidade até que a velocidade alvo seja alcançada de modo a evitar a queda abrupta da velocidade; A distribuição no “espacial” corresponde a reduzir gradualmente as velocidades ao longo das seções, até atingir a velocidade alvo na seção onde há um gargalo.

Os valores de limite de velocidade apresentados pelo sistema L.V.V. dependem inteiramente das características da rede. Os valores podem ser: atribuídos dinamicamente {[ES 04 – Fang, Hadiuzzaman, Karim, Luo e Qiu (2014)], [ES 08 – Jiang, Liu , Li e Wan (2011)], [ES 09 – Lee, Hellinga e Saccomanno (2004)], [ES 10 – Lee, Hellinga e Saccomanno

(2006)], [ES 15 – Pham e Dumont (2011)] e [ES 22 – Yu e Abdel-Aty (2014)]}, onde os valores são calculados através do modelo de controle para produzir um limite de velocidade ótimo para a seção seguinte; ou arbitrariamente determinados {[ES 01 – Abdel-Aty, Dilmore e Dhindsa (2006)], [ES 02 – Abdel-Aty, Cunningham, Gayah e Hsia (2008)], [ES 04 – Fang, Hadiuzzaman, Karim, Luo e Qiu (2014)], [ES 08 – Jiang, Liu , Li e Wan (2011)], [ES 10 – Lee, Hellinga e Saccomanno (2006)] e [ES 13 – Li, Liu e Wang (2014)]}, onde um valor é predeterminado para ser implementado no caso de ativação do sistema, ou a taxa de redução do limite atual é predeterminada em cada passo de tempo (*time step*).

{[ES 01 – Abdel-Aty, Dilmore e Dhindsa (2006)], [ES 02 – Abdel-Aty, Cunningham, Gayah e Hsia (2008)]} investigaram um sistema L.V.V. baseado em uma implantação espacial com período de tempo fixo de ativação (5 e 10 min). As velocidades médias são medidas em cada localização (localização do contador de tráfego) ao longo da rede a cada 5 min e, em seguida, as diferenças de velocidade entre duas seções consecutivas são analisadas no mesmo período de tempo. Estudos foram conduzidos para determinar a diferença de velocidade crítica na qual o L.V.V. deve ser implementado, de acordo com seu efeito sobre o risco de colisão. Como resultados, uma diferença de velocidade de 7 mph foi usada como limite para a ativação do sistema L.V.V. Nesses casos de estudo, os limites de velocidade para testes foram escolhidos arbitrariamente: (i) reduzindo a velocidade na seção a montante da localização do gargalo em 10 mph; (ii) reduzindo a velocidade na seção a montante da localização do gargalo em 5 mph; e (iii) reduzindo a velocidade a montante por 5 mph e aumente a jusante por 5 mph.

[ES 08 – Jiang, Liu , Li e Wan (2011)] testou um sistema L.V.V. baseado em uma implantação espacial fixa (fixa porque o local de implantação não varia) e com um período de ativação fixo (5, 10 e 15 min). O sistema aplica o modelo de previsão de colisões em tempo real desenvolvido por Lee, Hellinga e Saccomanno (2003) para identificar a ligação entre o controle dinâmico da velocidade e a redução do potencial de colisão. O modelo leva ao cálculo de um potencial de colisão dependente de dados de tráfego em tempo real, tais como: desvio padrão da velocidade; velocidades médias; diferença de velocidade entre seções a montante e a jusante; e densidade a montante. O limite do potencial de colisão (CP) é ajustado também de acordo com o modelo de (LEE; HELLINGA; SACCOMANNO, 2003). CP é calculado a cada 30 segundos e o valor médio para o período de tempo é comparado com o limiar. Quando CP está acima do limiar, o limite de velocidade é definido para um novo valor; e se o potencial de colisão no último período de tempo estiver abaixo do limiar, o limite de velocidade retornará à

velocidade padrão. Os limites de velocidade aplicados neste experimento são arbitrariamente determinados e calculados dinamicamente de acordo com a média das velocidades observadas nas secções em torno de um gargalo.

[ES 09 – Lee, Hellinga e Saccomanno (2004)] analisou um sistema L.V.V. baseado em uma implantação espacial fixa, com período de ativação fixo (2, 5 e 10 min, e todo o tempo de simulação). O sistema também aplica o modelo de previsão de colisão em tempo real desenvolvido por Lee, Hellinga e Saccomanno (2003). Os dados de tráfego em tempo real (desvio padrão da velocidade; diferença de velocidade entre secções a montante e a jusante; e covariância da diferença de volume entre secções a jusante e a montante em faixas adjacentes) servem para calcular o valor precursor de colisão usado como entrada para o modelo de previsão de colisão, afim de estimar CP. Se o CP atual exceder um limite especificado, os limites de velocidade atuais são reduzidos para um limite reduzido, especificado para o período de tempo de intervenção. Caso contrário, os limites de velocidade atuais são mantidos. O deslocamento de tempo para o cálculo de precursores de colisão é definido igual à duração da intervenção. No caso da duração definida igual a todo o tempo de simulação, um único limite de velocidade é imposto durante a simulação. Os limites de velocidade aplicados nesta experiência são atribuídos dinamicamente de acordo com a média de velocidade observada, e podem ter 7 valores (limite de velocidade de fluxo livre e 6 valores pré-determinados).

[ES 21 – Yang et al. (2013)] propõe um algoritmo L.V.V. controlado e simulado apenas em Matlab. O algoritmo possui uma função objetivo que soma o acidente esperado em todos os *links* da rede, estimados por um modelo de previsão de acidentes.

Adicionalmente ao sistema de controle L.V.V. com foco na segurança, os estudos a seguir propuseram um novo modelo matemático para avaliar os impactos de segurança.

[ES 04 – Fang, Hadiuzzaman, Karim, Luo e Qiu (2014)] apresenta um sistema L.V.V. baseado em uma implantação espacial (à frente do gargalo, mas o número de secções sob influência pode variar de acordo com restrições definidas) e tempo de implantação variável com período dinâmico de ativação. O sistema propõe um modelo de previsão de probabilidade de colisão para o sistema de controle L.V.V. Os dados de tráfego em tempo real em cada passo de tempo (*time step*) servem para prever futuras variáveis de estado de tráfego e, em seguida, são usados como entrada do modelo para calcular o limite de velocidade para o próximo passo de tempo. As características de tráfego (velocidade, ocupação e fluxo) antes de um evento de

colisão e um correspondente evento sem colisão foram consideradas como variáveis explicativas do modelo. Além disso, algumas restrições ao modelo são: a velocidade é arredondada para um múltiplo de 10 km/h; O limite superior foi ajustado para o limite de velocidade de fluxo livre; A diferença de limites de velocidade entre dois passos de tempo sucessivos é limitada a 10 km/h (distribuição de tempo variável); A diferença de limites de velocidade entre duas seções adjacentes é limitada a menos de 20 km/h (a distribuição espacial pode influenciar mais de uma seção).

[ES 10 – Lee, Hellinga e Saccomanno (2006)] desenvolveu um modelo de previsão de colisões em tempo real para estimar o potencial de colisão com base na variação das características de tráfego a curto prazo: coeficiente de variação da velocidade a montante; densidade média; e diferença de velocidade média entre a jusante e a montante. O sistema L.V.V. controlado por este modelo é baseado em uma implantação espacial fixa com tempo de ativação fixo (2, 5, 10 e 15 min). Foram consideradas três estratégias: (i) sete limites de velocidade fixo; (ii) um limite de velocidade estabelecido igual à velocidade média a jusante da localização do estrangulamento; e (iii) o limite de velocidade é ajustado igual às velocidades médias a montante e a jusante do gargalo. O modelo foi desenvolvido usando um modelo log-linear que permite investigar a natureza da relação entre os precursores de colisão selecionados e a frequência de colisões ajustada pelo nível apropriado de exposição, conforme apresentado em Lee, Hellinga e Saccomanno (2003) e [ES 09 – Lee, Hellinga e Saccomanno (2004)].

[ES 13 – Li, Liu e Wang (2014)] teve como principal objetivo desenvolver uma estratégia de controle L.V.V. para reduzir os riscos de colisão traseira perto de gargalos. Os riscos de colisão traseira foram estimados usando um modelo de previsão de risco de acidente que é desenvolvido especificamente para colisões traseiras em áreas de estrangulamento de rodovias. O sistema L.V.V. baseia-se em uma implantação espacial (antes do gargalo) e na implantação do tempo (cinco níveis de taxas de mudança de velocidade foram testados), com um período de ativação fixo (não especificado). A estratégia de controle L.V.V. é composta por um índice de risco de colisão traseira (RCRI) que considerou as características das trajetórias de desaceleração dos veículos que atingiram as ondas cinemáticas oriundas de gargalos, e de dados de tráfego em tempo real (desvio padrão de velocidade, fluxo e ocupação a jusante e a montante).

[ES 15 – Pham e Dumont (2011)] propôs um sistema L.V.V. como uma medida preventiva. O sistema L.V.V. é implantado no espaço (na seção de estudo e a montante) com

um período de tempo fixo de ativação (5 min). O modelo de controle L.V.V. foi desenvolvido com Matlab para ativar ou desativar uma redução de velocidade. O modelo aplica dados de tráfego em tempo real como entradas para identificar uma situação de risco de colisão durante os últimos três intervalos. No caso do alarme ser ativado, o limite de velocidade é diminuído em 20 km/h para o intervalo seguinte e, se nenhum alarme for ativado, o limite de velocidade é aumentado em 20 km/h (limite inferior de 60 km/h e limite superior de 120 km/h são definidos e não podem ser excedidos).

[ES 22 – Yu e Abdel-Aty (2014)] apresentou um sistema L.V.V. implantado no espaço (três seções a jusante e uma a montante do gargalo) com um período de tempo fixo de ativação (5 min). O modelo de controle L.V.V. é baseado no modelo METANET pré-existente – apresentado por Messmer e Papageorgiou (1990) – e um modelo de risco de colisão (CR) desenvolvido em seu estudo. O modelo CR utiliza um modelo de regressão logística para medir o risco de colisão com dados históricos de colisão e dados de tráfego em tempo real combinados com cada caso de colisão. As entradas do modelo de controle são os parâmetros de fluxo de tráfego (densidade, velocidade média e volume) e as taxas L.V.V. atuais e as taxas L.V.V. ótimas para o próximo passo são as únicas saídas, o que significa que os limites de velocidade são atribuídos dinamicamente. Além disso, existem algumas restrições ao modelo: a diferença máxima entre dois limites de velocidade vizinhos é de 10 mph (restrição espacial); e a diferença máxima entre dois passos de tempo consecutivos é de 10 mph (restrição temporal).

Como conclusões entre os dez estudos discutidos nesta subseção, nove apresentam como o sistema L.V.V. é implementado na rodovia em estudo. A maioria deles emprega uma implementação de espaço (7) com um período de ativação fixo (8). Quanto aos valores dos limites de velocidade, são atribuídos dinamicamente (3) ou arbitrários (3) e alguns estudos testam ambas as técnicas (3). Metade dos estudos aplicou um modelo pré-existente, e a outra metade desenvolveu o seu próprio. No entanto, todos os estudos usam um indicador de colisão (previsão de colisão, risco de colisão e potencial de colisão) como entrada para o modelo de controle L.V.V. Este indicador de colisão é sempre calculado de acordo com dados de tráfego em tempo real, tais como: volume, velocidade média, desvio padrão da velocidade, diferença de velocidade entre seções, diferença de velocidade entre faixas adjacentes, ocupação e desvio padrão de ocupação.

1.3.2 Quais são os impactos de segurança do L.V.V. em rodovias?

Esta subseção apresenta os resultados da revisão sistemática com relação à segunda questão de pesquisa, trazendo os resultados apontados nos artigos que aplicam algum indicador de colisão como entrada para o sistema L.V.V.

[ES 01 – Abdel-Aty, Dilmore e Dhindsa (2006)] e [ES 02 – Abdel-Aty, Cunningham, Gayah e Hsia (2008)] concluem que o L.V.V. pode ser empregado para reduzir efetivamente os riscos de mudança de faixa e colisões traseiras em condições de tráfego de baixo volume. Estes estudos também concluíram que usando L.V.V. em condições fora do pico, o tempo de viagem também é positivamente afetado. Eles recomendam que o L.V.V. deve ter velocidades introduzidas gradualmente, com mudanças no tempo próximo de 5 mph a cada 10 min. Nesses estudos, nenhum tratamento foi encontrado para reduzir com êxito os riscos de colisão traseira e de mudança de faixa na condição de tráfego congestionado. Isso é atribuído ao fato de que, em estado congestionado, a velocidade dos veículos está sujeita às condições de tráfego circundantes e não ao limite de velocidade declarado. Portanto, nestes estudos, alterar o limite de velocidade padrão não afeta a velocidade dos veículos de uma forma desejável nesta condição.

[ES 04 – Fang, Hadiuzzaman, Karim, Luo e Qiu (2014)], [ES 08 – Jiang, Liu, Li e Wan (2011)], [ES 09 – Lee, Hellinga e Saccomanno (2004)], [ES 10 – Lee, Hellinga e Saccomanno (2006)] e [ES 13 – Li, Liu e Wang (2014)] aplicaram um modelo de previsão de colisões em tempo real para estimar o potencial de colisão (CP) para as estratégias de controle L.V.V.

[ES 13 – Li, Liu e Wang (2014)] também aponta que os limites de velocidade devem ser gradualmente reduzidos para minimizar a diferença entre a velocidade do congestionamento e a de fluxo livre a montante. Ao alterar abruptamente os limites de velocidade, o sistema L.V.V. pode introduzir distúrbios no fluxo de tráfego, aumentando a probabilidade de colisão quando não empregado corretamente. Os resultados da simulação mostraram que as estratégias de controle L.V.V. propostas foram eficazes na redução de potenciais de colisão próximos a gargalos recorrentes de rodovias. Com a estratégia de controle proposta, o L.V.V. reduziu o potencial de colisão traseira em 69% para o cenário de alta demanda e em 81% para o cenário de demanda moderada. Este artigo sugeriu uma alteração dos limites de velocidade de forma rápida (10 a 15 mph em intervalos de 30 segundos).

Em contrapartida, [ES 08 – Jiang, Liu , Li e Wan (2011)] afirma que intervalos de 15 min de duração da intervenção leva a melhores resultados enquanto 5 min leva a pior: este fenômeno pode ser explicado devido à instabilidade do tráfego provenientes de frequentes distúrbios causados pelo limite de velocidade muitas vezes alterado. A instabilidade pode aumentar o potencial de colisão, o que é consistente com os resultados de [ES 10 – Lee, Hellinga e Saccomanno (2006)]. O estudo também afirma que o L.V.V. reduz o potencial de colisões sem aumentar o tempo total de viagem.

[ES 10 – Lee, Hellinga e Saccomanno (2006)] encontrou intervalos dos limiares existentes e a duração de intervenção que reduzem tanto o potencial de colisão quanto o tempo de viagem total. Os maiores benefícios de segurança foram obtidos quando L.V.V. foi ajustado para empregar os limites de velocidade iguais as médias de velocidade a montante e a jusante (isto é, velocidade de transição). A partir dos resultados, o potencial de colisão geralmente diminui à medida que a duração da intervenção aumenta, e os limites de velocidade variáveis podem reduzir o potencial de colisão em 5-17%, ao reduzir temporariamente os limites de velocidade durante condições de tráfego adversas, quando o potencial de colisão excede o limiar pré-estabelecido.

No estudo de [ES 04 – Fang, Hadiuzzaman, Karim, Luo e Qiu (2014)], os resultados comprovam que o L.V.V. pode ser eficaz em reduzir a probabilidade de colisão em uma rede de tráfego congestionado. O algoritmo de controle L.V.V. proposto reduz efetivamente o potencial de colisão e o número de colisões relacionadas ao congestionamento pela previsão de estados de tráfego futuros, proporcionando um controle L.V.V. dinâmico e seguro. O sistema reduziu a probabilidade de colisão em 35% na área do gargalo e reduziu em 19% a probabilidade global de colisão.

[ES 09 – Lee, Hellinga e Saccomanno (2004)] descobriu que o L.V.V. pode reduzir o potencial total de colisões em aproximadamente 25% ao reduzir temporariamente os limites de velocidade durante condições de tráfego adversas. A curta duração da intervenção (2 min) resulta num aumento do potencial de colisão devido a alterações mais frequentes do limite de velocidade. Intervalos de 5 a 10 min são apontados como capazes de maximizar os benefícios de segurança para o segmento de rodovia em estudo, corroborando com [ES 01 – Abdel-Aty, Dilmore e Dhindsa (2006)], [ES 02 – Abdel-Aty, Cunningham, Gayah e Hsia (2008)], [ES 08 – Jiang, Liu , Li e Wan (2011)] e [ES 10 – Lee, Hellinga e Saccomanno (2006)], que alegam que a duração mais longa da intervenção resulta na diminuição dos potenciais de

colisão. Além disso, as reduções nos limites de velocidade podem aumentar o tempo de viagem do sistema. Portanto, existe uma compensação quantificável entre a diminuição do risco (potencial de colisão) e o aumento do tempo de deslocamento do sistema, e a redução do potencial de colisão é maior em locais de elevada turbulência do tráfego, tais como locais de gargalo ou de fusão do tráfego.

[ES 21 – Yang et al. (2013)] estudou o sistema L.V.V. em condições climáticas adversas. Ao reduzir os limites de velocidade em tais condições climáticas, L.V.V. melhora a segurança, mas piora o congestionamento e as emissões. O estudo aponta para uma diminuição de 19% no número de acidentes, mas 16% de aumento no tempo de viagem, e 3,70% de aumento nas emissões de gases de efeito estufa. Considerando que a segurança é uma preocupação primordial durante condições climáticas adversas, o trade-off entre segurança, tempo de viagem e emissões é razoável.

Ao estudar o nível de adesão do condutor com o sistema L.V.V., [ES 22 – Yu e Abdel-Aty (2014)] concluiu que o nível de adesão afeta diretamente os resultados de melhoria de segurança. Isto é, quanto maior o número de condutores que reduzem suas velocidades e aderem ao sistema, maior é o impacto positivo do sistema. O estudo demonstra que o sistema L.V.V. proposto poderia melhorar a segurança, diminuindo o risco de colisão e aumentando a homogeneidade das velocidades sob níveis de adesão altos e moderados. Já para o cenário de baixa adesão, o sistema L.V.V. não melhora significativamente a segurança do tráfego.

1.3.3 Estudos que não empregam indicadores de colisão como entradas de sistemas L.V.V.

Embora os artigos nesta subseção não apliquem indicadores de colisão como entrada para sistemas L.V.V., a maioria deles usa indicadores de colisão para avaliar impactos de segurança do L.V.V., enquanto procura reduzir o congestionamento e melhorar a mobilidade.

{[ES 03 – Allaby, Hellinga e Bullock (2007)], [ES 06 – Hadiuzzaman et al. (2014)] e [Samimi e Hellinga (2014)]} empregaram o modelo de previsão de colisões apresentado por Lee, Hellinga e Saccomanno (2003), enquanto que [ES 16 – Piao e McDonald (2008)] aplicou eventos de tempo para colisão (TTC) para avaliar a segurança. {[ES 11 – Lee, Qian e Chung (2013)] e [ES 12 – Li, Liu e Wang (2014)]} também empregaram tempo de colisão (TTC) para quantificar os impactos do L.V.V. na segurança de tráfego.

[ES 19 – Talebpour, Mahmassani e Hamdar (2013)] empregou o modelo microscópico de Hamdar *et al.* (2008) para realizar o estudo. Este é um modelo de *car-following* baseado em risco, que considera as trocas de faixas e incidentes endogenamente. Os resultados revelam a importância do cumprimento dos limites de velocidade impostos (nível de adesão) para que os objetivos sejam alcançados. Quando a adesão é baixa, os riscos de conflitos tendem a aumentar.

{[ES 05 – Habtemichael e Santos (2013)], [ES 07 – Islam et al. (2013)] e [ES 17 – Saha e Young (2014)]} apresentam um novo modelo matemático para quantificar os impactos de segurança. No entanto, esses impactos são empregados apenas para avaliar as estratégias de controle L.V.V. em relação à segurança, e não são utilizados como entrada do sistema. Ambos {[ES 05 – Habtemichael e Santos (2013)] e [ES 14 – Nezamuddin et al. (2011)]} aplicam um modelo substituto de avaliação de segurança (surrogate safety assessment model – SSAM) para analisar os impactos de segurança em um modelo microscópico. A abordagem SSAM foi proposta por uma equipe de pesquisa da SIEMENS e foi patrocinada pela Federal Highway Administration (FHWA) dos Estados Unidos. Este modelo faz uso de arquivos de trajetória do espaço-tempo produzidos por modelos de simulação microscópica para realizar uma “análise de conflito”.

1.4 CONCLUSÕES SOBRE A REVISÃO SISTEMÁTICA APRESENTADA

Esta revisão concluiu que o L.V.V. leva a resultados positivos para a segurança quando corretamente implementado, independentemente de empregar ou não um modelo de previsão de colisões com entrada do sistema. Diversos modelos e sistemas foram apresentados e discutidos ao longo desta revisão, porém, eles têm globalmente os mesmos resultados: L.V.V. tende a harmonizar o fluxo de tráfego, reduzindo conflitos e, portanto, aumentando a segurança.

À medida que os limites de velocidade são reduzidos, há uma menor variação de velocidade entre os veículos, reduzindo as variações de velocidades também entre diferentes faixas da rodovia. Esta redução da variabilidade das velocidades reduz o número de mudanças de faixa, harmonizando o fluxo de tráfego como resultado. A maioria dos benefícios de segurança apresentados nos estudos foi realizada através da redução de turbulências dentro da corrente de tráfego, particularmente a redução da variabilidade das velocidades. A partir dos estudos experimentais, as diferenças de volume, velocidade e ocupação entre e dentro das faixas se tornaram menores e as variações também diminuíram quando os sistemas de controle L.V.V.

foram implementados. Por conseguinte, a harmonização do fluxo de tráfego através do L.V.V. conduz a uma rodovia mais segura.

De outro ângulo, experimentos dos estudos também concluíram que durações mais longas de intervenção do sistema L.V.V. são melhores, evitando quedas de velocidade abruptas. Experimentos relatam que as diferenças de velocidade entre dois passos de tempo sucessivos, ou seção consecutiva, deve ser de cerca de 10 mph. Maiores diferenças também levam a uma queda abrupta da velocidade. Essas alterações abruptas de velocidade iriam contra o conceito de harmonização do fluxo de tráfego visto antes.

Outro ponto a destacar é o impacto do L.V.V. quando se refere a adesão dos condutores quanto aos limites de velocidade impostos. Estudos apontam que as magnitudes dos benefícios de segurança são altamente dependentes dos níveis de adesão dos motoristas com o L.V.V. Junto com as diferenças quanto aos impactos nos tempos de viagem, os impactos de segurança apresentados por estudos nesta revisão diferem em magnitude. Essas diferenças são explicadas pela rede de simulação escolhida para avaliar sistemas de controle L.V.V. Todos os estudos usam redes diferentes, com geometrias distintas, composição do tráfego, níveis de adesão dos motoristas, etc. Portanto, é aconselhável não comparar a magnitude dos resultados, mas apenas suas conclusões.