ELIAS NETO
ANA CAROLINA RENTES
VICTOR ROMÃO
VINÍCIUS SPRICIGO

RODOVIAS INTELIGENTES: CONTEXTUALIZAÇÃO, SIMULAÇÃO E ADEQUAÇÃO DO PROJETO GEOMÉTRICO

Projeto de Formatura apresentado à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, no âmbito do curso de Engenharia Civil

São Paulo
2016

ELIAS NETO
ANA CAROLINA RENTES
VICTOR ROMÃO
VINÍCIUS SPRICIGO

RODOVIAS INTELIGENTES: CONTEXTUALIZAÇÃO, SIMULAÇÃO E ADEQUAÇÃO DO PROJETO GEOMÉTRICO

Projeto de Formatura apresentado à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, no âmbito do curso de Engenharia Civil

Orientador:
Prof. Dr. Claudio Luiz Marte

São Paulo
2016

Catalogação-na-publicação

Neto, Elias
Rodovias inteligentes: Contextualização, simulação e adequação do projeto geométrico / E. Neto, A. C. Rentes, V. Romão, V. Spricigo -- São Paulo, 2016.
163 p.

Trabalho de Formatura - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Transportes.

1.Sistemas Inteligentes de Transportes 2.Tecnologia 3.Rodovias (Projeto) 4.Tráfego Rodoviário (Simulação) I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Transportes II.t. III.Rentes, Ana Carolina IV.Romão, Victor V.Spricigo, Vinícius

Dedicamos este trabalho aos nossos pais, familiares, companheiros de curso e demais colegas, pois é um dos marcos finais da conclusão de nossa graduação. Essas pessoas foram fundamentais ao longo do curso de Engenharia Civil.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos, primeiramente, as famílias de todos os integrantes do grupo, pelo apoio e pelo suporte em todos os momentos, nos encorajando todos os dias a buscar nossos objetivos.

A todos os professores da Escola Politécnica, que formam excelentes profissionais ao longo dos anos, preparados para brilhantes carreiras.

Ao nosso professor orientador Dr. Claudio Luiz Marte, pela enorme paciência demonstrada, desde as primeiras conversas. Agradecemos pela disposição e dedicação a nós prestadas em todas etapas, principalmente pela vontade sempre de nos ensinar e nos orientar para os melhores caminhos. Somos profundamente gratos e nos orgulhamos por termos sido orientados por um exímio professor.

Por fim, o agradecimento à sociedade paulista, por nos propiciar e financiar a graduação na Universidade de São Paulo.

“Nunca ande pelo caminho traçado, pois ele conduz somente até onde os outros já foram.”

(Alexander Graham Bell)

RESUMO

As Rodovias Inteligentes representam uma revolução no transporte rodoviário de cargas e pessoas, solucionando problemas diários enfrentados por toda a sociedade, relativos a congestionamentos, emissões de poluentes e acidentes de trânsito.

Este trabalho objetiva estudar algumas das mais inovadoras iniciativas de implantação de Sistemas Inteligentes de Transporte (ITS) em rodovias e avaliar o impacto do desenvolvimento das tecnologias sobre diversos aspectos da operação rodoviária.

Europa, EUA e Japão são as regiões mais desenvolvidas no segmento e concentram as principais iniciativas. Porquanto, foram estudados os seguintes projetos no mundo: Corredor Cooperativo Roterdã-Viena, Iniciativas no Sudeste de Michigan, ITS *Spot Services* e CITI *Project*.

A análise das iniciativas torna possível a identificação de tendências no desenvolvimento tecnológico. O cenário presumido aponta a integração das comunicações entre veículos (V2V) e entre veículo e infraestrutura (V2I/I2V), baseadas na tecnologia *Dedicated Short Range Communication* (DSRC), como precursora na regulamentação e consolidação do ITS no mundo. As seguintes tecnologias deverão ser introduzidas ao mercado automotivo: controle de cruzeiro, alinhamento horizontal do veículo, alerta para condições adversas da via e sistema automático de frenagem. As projeções apontam para veículos autoguiados e plenamente conectados, presentes no mercado no prazo de até duas décadas.

O estudo da operação autônoma no contexto rodoviário pode ser realizado sob duas óticas: o impacto da admissão de um sistema inteligente sobre o projeto geométrico de novas rodovias e o estudo das capacidades viárias resultantes da operação mista entre veículos autônomos e comuns.

A avalição criteriosa dos elementos de projeto utilizados atualmente leva a crer que a imposição de uma velocidade de projeto fixa, condicionando todas as características geométricas da via, pode resultar em dificuldades construtivas e custos elevados de implantação em muitas situações.

Propõe-se uma adequação no procedimento de projeto, objetivando a construção de rodovias mais baratas e menos danosas ao ambiente, a partir da flexibilização na escolha do traçado proporcionada pela instalação de um sistema

autônomo. Para tanto, os veículos autônomos deverão trafegar sobre uma velocidade operacional variável sobre cada trecho percorrido, sofrendo redução na aproximação de curvas horizontais e verticais, considerando condições desfavoráveis de clima. As distâncias entre veículos devem ser reduzidas proporcionalmente às velocidades, para garantir fluxos equivalentes nos trechos críticos. Adicionalmente, as novas condições de visibilidade requeridas permitem a construção de curvas ainda mais acentuadas.

A segunda frente consiste no estudo do impacto da implantação de um Sistema Inteligente de Transportes sobre a capacidade de uma rodovia pré-existente por meio de simulações no *software* Vissim. São analisados os parâmetros comportamentais adotados para os motoristas e definidos novos valores que possam reproduzir a operação de um veículo autônomo. Após a construção desse veículo ITS, são feitas simulações sobre as formas de implantação das tecnologias, através da operação dispersa em meio aos veículos comuns ou com a utilização de faixas exclusivas. Como resultado obtém-se um possível regime a ser utilizado, dividido em fases de implantação, conforme as porcentagens prevalecentes de veículos autônomos.

Palavras-chave: Sistemas Inteligentes de Transportes. Tecnologia. Rodovias (Projeto). Tráfego Rodoviário (Simulação).

ABSTRACT

Smart Highways represent a revolution in roadway transportation of cargo and people, solving daily problems faced by the whole society, related to traffic jams, pollution and traffic collisions.

This work intends to study the most groundbreaking cases of implantation of Intelligent Transportation Systems (ITS), focusing on the communication between vehicles and infrastructure, and evaluate the impact of technology development over several aspects of the roadway operation.

Europe, U.S.A. and Japan are the most developed regions in the segment and concentrate the main deployments. Therefore, the following projects were studied: Rotterdam-Vienna Cooperative Corridor, Southeast Michigan Deployments, ITS Spot Services and CITI Project.

The analysis of the deployments allows identification of tendencies in the technologic development. The presumed scenario points to the integration of V2V and V2I/I2V communications, based on the Dedicated Short Range Communication (DSRC) technology, as a forerunner on the regulation and setting of ITS in the world. It will be introduced to the market, between many others, the following technologies: cruise control; horizontal alignment of the vehicle; warning over bad road conditions; automatic breaking system. The projections point to self-driving vehicles, available in the market in up to two decades.

The study of the autonomous operation in the highway context can be done throughout two perspectives: the impact of the admission of an intelligent system over the geometric design of new highways and the study of the road capacities resulting of blended operation of autonomous and common vehicles.

The solid analysis of the design elements currently employed leads to the conclusion that the imposition of a set design speed, conditioning all of the geometric features of the road, can result in highly expensive design alignments, due to the great amounts of earthmoving involved.

An adequacy on the design procedure is then proposed, aiming the construction of cheaper and less hurtful to the environment highways, from the flexibility on choosing the layout provided by the installation of an autonomous system. To do so, the autonomous vehicles must traffic with an operational velocity in each segment traveled, experiencing a reduction on the approximation in horizontal and vertical

curves, considering adverse climate conditions. The distance between vehicles must be reduced proportionally to the speed, in order to guarantee equal flows in critical segments. Additionally, the new conditions of visibility required allow the construction of even sharper curves.

The second approach consists on the study of the impact due to the implantation of an Intelligent Transportation System over the capacity of a pre-existing highway through simulations in the software Vissim. The behavioral parameters assigned to the drivers are analyzed and new values are defined to reproduce the operation of an autonomous vehicle. After the conception of this ITS vehicle, simulations are made over the forms of the technologies implementation, through the disperse operation in between the common vehicles or using of exclusive lanes. As a result, it is acquired a possible regime to adopt, divided in phases of implantations, accordingly to the prevailing percentage of autonomous vehicles.

Keywords: Intelligent Transportation Systems. Technology. Highways (Design). Highway Traffic (Simulation).

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Emissão de poluentes por setor econômico (1990-2013)..... 16
Figura 2 – Corredor ITS Roterdã - Frankfurt - Viena 35
Figura 3 – Fases de implantação do Corredor Roterdã-Viena. 39
Figura 4 – Tecnologia da empresa Tass International para o projeto DITCM 41
Figura 5 – Cronograma do projeto ECo-AT..... 41
Figura 6 – Arquitetura do sistema de comunicação..... 42
Figura 7 – Fase inicial de implantação nas rodovias I-96 e I-696..... 46
Figura 8 – Dados de velocidade processados 50
Figura 9 – Exemplo de aviso do Assisting Safety Driving 51
Figura 10 – Trecho do corredor na Austrália..... 54
Figura 11 – Esquema de comunicaçào em uma rede veicular..... 69
Figura 12 – Gabarito de giro de caminhões e ônibus convencionais (CO) 83
Figura 13 – Elementos presentes na determinação da DVU 89
Figura 14 – Verificação da visibilidade disponível no traçado..... 91
Figura 15 – Limites utilizados no VISSIM e comportamentos esperados 136
Figura 16 – Modelo simulado no Vissim 139
Figura 17 – Estreitamento de pista ampliado.....139
Figura 18 – Cenário 1: Veículos ITS dispersos em meio aos veículos comuns.....150
Figura 19 – Cenário 2: Faixa exclusiva para veículos ITS com uma pista.....151
Figura 20 – Cenário 3: Faixa exclusiva para veículos ITS com duas pistas 151

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Benefícios esperados da implantação do Corredor Roterdã-Viena..... 36
Tabela 2 – Serviços previstos para a fase inicial..... 40
Tabela 3 – Algumas tecnologias presentes no *System Architecture* do *ITS Spot Services* 52
Tabela 4 – Quadro-resumo das aplicações de cada iniciativa 59
Tabela 5 – Características de aplicações veiculares..... 70
Tabela 6 – Correlação de iniciativas e tempos de comunicação..... 71
Tabela 7 – Classificação técnica, sistemas funcionais e características de projeto . 77
Tabela 8 – Velocidade de projeto para novos traçados..... 78
Tabela 9 – Influência das características físicas e operacionais dos veículos no dimensionamento geométrico e estrutural da rodovia 81
Tabela 10 – Principais dimensões básicas dos veículos de projeto (m)..... 82
Tabela 11 – Distâncias de visibilidade de parada desejável (em metros)..... 86
Tabela 12 – Distâncias de visibilidade para tomada de decisão (em metros)..... 87
Tabela 13 – Distâncias de visibilidade de ultrapassagem (em metros) 90
Tabela 14 – Raios mín. para valores máximos de superelevação e fator de atrito .. 93
Tabela 15 – Rampas máximas em rodovias rurais..... 97
Tabela 16 – Rampas máximas em rodovias urbanas..... 97
Tabela 17 – Valores de $\boldsymbol{Kmín}$ para as condições de visibilidade (de parada).....100
Tabela 18 – Largura das faixas de rolamento em tangente (em metros).....103
Tabela 19 – Valores de DVPs para veículos autônomos ($\boldsymbol{tr = 1,0\ s}$).....114
Tabela 20 – Comprimentos mín. de curva vertical convexa para veículos comum e autônomo 117
Tabela 21 – Comprimentos mín. de curva vertical côncava para veículos comum e autônomo 119
Tabela 22 – Possíveis valores dos parâmetros do Vissim 140
Tabela 23 – Valores utilizados nas simulações do modelo.....140
Tabela 24 – Capacidades obtidas para cada valor de parâmetro simulado.....147
Tabela 25 – Veículos ITS possíveis.....148
Tabela 26 – Capacidades medidas para cada veículo ITS proposto.....148
Tabela 27 – Comparação entre os valores dos parâmetros default e do veículo V11 149

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

AASHTO	American Association of State Highway and Transportation Officials
ACC	Adaptive Cruise Control
AG	Amsterdam Group
ASTM	American Society for Testing and Materials
DER	Departamento de Estradas de Rodagem
DNER	Departamento Nacional de Estradas de Rodagem
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
DSRC	Dedicated Short Range Communication
DVP	Distância de Visibilidade de Parada
DVTD	Distância de Visibilidade de Tomada de Decisão
DVU	Distância de Visibilidade de Ultrapassagem
EC	European Comission
ETC	Electronic Toll Collection
ITS	Intelligent Transportation Systems
IVI	In-Vehicle Information
I2V	Infrastructure-to-Vehicle
MDOT	Michigan Department of Transportation
MLIT	Ministry of Land, Infrastructure, Transportation and Tourism
MTC	Mobility Transformation Center
NHTSA	National Highway Traffic Safety Administration
NS	Nível de Serviço
OBU	Onboard Unit
RSU	Roadside Unit
TRB	Transportation Research Board
USDOT	United States Department of Transportation
V2I	Vehicle-to-Infrastructure
V2V	Vehicle-to-Vehicle
V2X	Vehicle-to-Everything

SUMÁRIO

1 Introdução 15
1.1 Caracterização do Problema 15
1.2 Objetivos 19
1.3 Metodologia 19
2 *Intelligent Transportation Systems* 23
2.1 Conceitos de Comunicação 23
2.2 Tipos de Aplicação 24
2.3 Panorama Geral 30
3 Estudo das Principais Iniciativas 33
3.1 *Cooperative ITS Corridor - Joint Deployment* 35
3.2 *Southeast Michigan Connected Vehicle Deployment* 43
3.3 *ITS Spot Services* 49
3.4 *Cooperative Intelligent Transport System Initiative - CITI Project* 54
4 Tendências e Proposta de Antevisão de Cenário Futuro 59
4.1 Identificação de Tendências 59
4.2. Proposta de Antevisão de Cenário Futuro 66
4.3. Considerações Finais 72
5 Adequação do Projeto Rodoviário 73
5.1 Elementos de Projeto e Parâmetros Geométricos 74
5.1.1 Classificação Rodoviária 75
5.1.2 Velocidade de Projeto 78
5.1.3 Veículo de Projeto 80
5.1.4 Distâncias de Visibilidade 84
5.1.4.1 Distância de Visibilidade de Parada (DVP) 85
5.1.4.2 Distância de Visibilidade de Tomada de Decisão (DVTD) 86
5.1.4.3 Distância de Visibilidade de Ultrapassagem (DVU) 87
5.1.4.4 Verificação das Condições de Visibilidade ao Longo da Rodovia 90
5.1.5 Alinhamento Horizontal 92
5.1.5.1 Raio de Curvatura Horizontal 92
5.1.5.2 Superelevação 95
5.1.6 Alinhamento Vertical 96
5.1.6.1 Declividade de Rampa 96

5.1.6.2 Curvas Verticais 98
5.1.7 Largura das Faixas de Rolamento 103
5.2 Estudo de Adequação Integrada dos Parâmetros 104
5.2.1 Premissas e Hipóteses 105
5.2.2 Traçado, Geometria e Velocidade Operacional Variável 107
5.2.3 Definição e Manutenção da Capacidade Viária 109
5.2.4 Novas Condições de Visibilidade 112
5.2.5 Valores Limites para Alinhamento Vertical 116
5.2.6 Valores Limites para Alinhamento Horizontal 123
5.2.7 Redução das Larguras da Seção Transversal 124
5.2.8 Aspectos Ligados ao Tráfego de Veículos Comuns 125
5.2.9 Questões em Aberto no Desenvolvimento do Método 127
5.3 Considerações Finais 129
6 Simulação de Tráfego 131
6.1 Introdução 131
6.2 Simulação com *Software* 132
6.2.1 *Software* Vissim 132
6.2.2 Premissas e Lógica para as Simulações 138
6.2.3 Concepção do Veículo ITS 142
6.2.4 Simulação dos Cenários de Implantação 150
6.3 Resultados 152
6.4 Considerações Finais 154
7 Conclusão 155
8 Bibliografia 159

1 INTRODUÇÃO

1.1 Caracterização do Problema

No decorrer do Século XX, em simultâneo à expansão desordenada que se pode observar nas grandes cidades, a indústria automobilística também registrou um crescimento acelerado. No Brasil, a frota de veículos terrestres, que iniciou o século passado na casa das dezenas, já ultrapassa a marca dos 88 milhões – com quase 50 milhões de carros – segundo relatório divulgado pelo Departamento Nacional de Trânsito (DENATRAN, 2015).

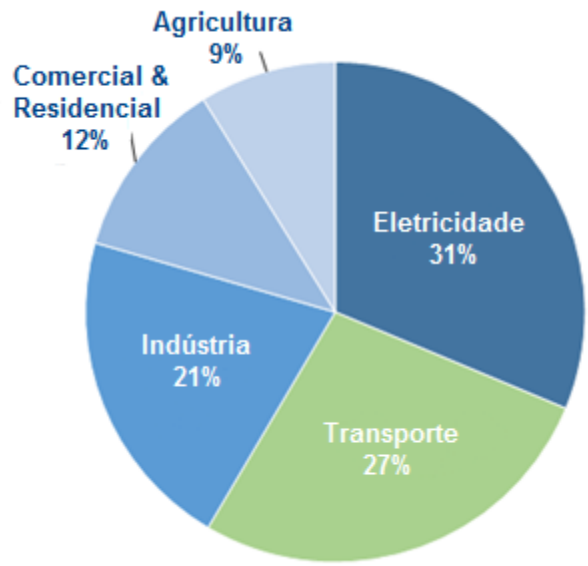
Esse crescimento pode ser observado por todo o mundo. A Bélgica, por exemplo, chegou em 2011 a uma frota de 7 milhões de veículos para uma população de 11 milhões de habitantes. Isto representa uma taxa de aproximadamente 620 carros a cada 1000 habitantes, a 25ª maior do mundo (EUROPEAN TRAFFIC POLICE NETWORK, 2014). As más condições de planejamento urbano, entretanto, com malhas rodoviárias mal desenhadas, poucas alternativas de transporte e zonas residenciais distantes dos principais centros comerciais, colocam a Bélgica como o país mais congestionado dentre todos os países europeus e norte-americanas, segundo um estudo atualizado da INRIX (2015).

O estudo indica que cada cidadão da capital Bruxelas gasta uma média de 83 horas de um ano parado no trânsito, levando em conta até os que não possuem veículos automotores. Este mesmo tempo é gasto pelo cidadão médio da cidade de Londres. Apesar de a pesquisa não apresentar dados sobre o Brasil, quem utiliza o carro diariamente como forma de transporte em cidades como São Paulo e Rio de Janeiro sabe que a situação aqui não é muito diferente.

Outro estudo realizado pela INRIX (2013) coloca em perspectiva o custos associados à falta de eficiência no tráfego de veículos. Estima-se que só nos Estados Unidos haverá um desperdício de 2,8 trilhões de dólares, entre 2013 e 2030, devido aos congestionamentos.

Os congestionamentos ainda são responsáveis por agravar os problemas ambientais. A emissão de poluentes provenientes do transporte rodoviário já atingiu a segunda colocação no ranking das principais fontes de emissões nos EUA, perdendo apenas para o setor de geração de energia (Figura 1). No ano de 2013 foram emitidos mais de 6,5 milhões de toneladas de CO2 na atmosfera do país (EPA, 2014).

Figura 1 – Emissão de poluentes por setor econômico (1990-2013)



Fonte: *EPA* (2014)

Os problemas ocasionados pelo tráfego também envolvem a saúde das pessoas. Em relatório publicado pela Organização Mundial de Saúde (OMS, 2013) consta o dado de que no ano de 2013 foram provocadas aproximadamente 1,24 milhões de mortes por acidentes de trânsito, sendo essa a oitava principal causa de mortalidades no mundo. Para a população jovem a situação é ainda pior: os acidentes são a principal causa de óbitos na faixa etária de 15-29 anos. A maior parte destes acidentes foi ocasionada por irresponsabilidade humana, como direção alcoolizada, em alta velocidade ou desrespeitando a legislação de trânsito regional.

Este relatório ainda aponta que, em um país em desenvolvimento como o Brasil, que possui uma renda média familiar intermediária, o gasto anual para socorrer e tratar as vítimas de acidentes rodoviários atinge valores de 1-2% do Produto Interno Bruto nacional. Ou seja, para um PIB de 2,246 trilhões de dólares (valores atualizados em Junho/2015), o custo total pode chegar a cerca de 45 bilhões de dólares no período de um ano.

Os problemas envolvendo o tráfego rodoviário são de extrema relevância no mundo e já se pode dizer que eles afetam a vida de bilhões de pessoas. Com efeito, o número de veículos no mundo já ultrapassa a casa do bilhão (para uma população de pouco mais de 7 bilhões) e vem crescendo de forma assustadora, em uma taxa superior à populacional. O Brasil mais que dobrou o número total de veículos nos

últimos 10 anos, o que só deve agravar cada um dos problemas citados. (DENATRAN, 2015)

Examinando estes e tantos outros dados, fica clara a dimensão do problema e a necessidade do desenvolvimento de soluções. É nesse cenário que ocorre o investimento nos *Intelligent Transportation Systems* (ITS), que podem ser os grandes responsáveis pela revolução necessária.

Os Sistemas Inteligentes de Transporte são aplicações avançadas de tecnologias de informação e comunicação nos sistemas de transporte para aprimorar a mobilidade e a segurança do transporte de carga e pessoas. São combinações de computadores, controles, sensores, detectores e outros equipamentos que objetivam garantir maior quantidade e qualidade de informação sobre as condições de tráfego e permitir melhores tomadas de decisões pelos usuários ou por sistemas inteligentes de tomada de decisão presentes nos veículos, ao mesmo passo em que reduzem os danos ambientais. O conceito abrange todos os modais de transporte, no entanto, estão contemplados no presente trabalho apenas os sistemas aplicados sobre o setor rodoviário, que ganha destaque na definição fornecida na diretriz legal da União Europeia 2010/40/EU (2010):

> Sistemas Inteligentes de Transporte (ITS) são aplicações avançadas que, sem serem dotadas de inteligência em si, visam proporcionar serviços inovadores em relação aos diferentes modos de transporte e de gestão do tráfego, permitindo que os usuários estejam melhor informados e tomem decisões mais seguras, coordenadas e 'inteligentes' quanto a rede de transportes [...] [Considera-se que] os avanços no campo de aplicação de tecnologias de informação e comunicação a outros meios de transporte devem ser [primeiramente] refletidos no desenvolvimento do setor de transporte rodoviário. (OFFICE JOURNAL OF THE EUROPEAN UNION, 2010, p1, tradução nossa)

Assim, delimita-se o escopo deste trabalho aos Sistemas Inteligentes de Transporte aplicados no setor rodoviário, incluindo infraestrutura, veículos, usuários e o gerenciamento de tráfico e mobilidade.

Com a visão de um caminho possível para se solucionar os problemas relacionados ao tráfego, especialistas do *Institute of Electrical and Electronics Engineers* (IEEE), uma das mais respeitadas organizações internacionais dedicadas ao avanço da tecnologia, colocam o veículo plenamente autônomo como a forma mais promissora de transporte para o futuro. Eles estimam que em meados do ano de 2040 mais de 75% dos veículos nas vias do mundo deverão se autodirigir. (IEEE, 2012)

Mas o caminho a traçar até se chegar a este cenário presumido é longo e depende da aplicação gradual de diversas tecnologias, até que possa ocorrer uma integração das mesmas e se desenvolva um sistema de auto direção.

A boa notícia é que já existem diversas organizações ao redor do mundo que se dedicam à pesquisa e implantação de sistemas ITS, os quais compreendem das mais simples tecnologias até as mais inovadoras. Estas organizações possuem os mesmos objetivos:

a) Reduzir os **congestionamentos e emissões de poluentes** para níveis aceitáveis;
b) Reduzir drasticamente o **gasto dos Estados** e o tempo despendido com o tráfego em geral;
c) Minimizar as **mortes por acidentes** rodoviários no mundo.

Desta forma, ficam claros os motivos e a relevância do desenvolvimento de sistemas ITS. Mary Barra, CEO da GM, foi responsável pelo discurso de abertura do 21º Congresso Mundial de ITS, sediado na cidade de Detroit, em Setembro de 2014. Ela fez as seguintes considerações:

> [...] o que eles [motoristas pelo mundo] querem é nítido: eles querem mobilidade pessoal sem restrições. Mais especificamente, eles esperam que nós ajudemos a atenuar, se não eliminar, o congestionamento, a poluição e os acidentes rodoviários, que são os inconvenientes do uso de automóveis. Para mim estas não são causas nobres - elas são imperativas! (BARRA, 2014, tradução nossa).

Fica evidente que as soluções de ITS desempenharão um papel fundamental na resolução de problemas diários enfrentados por bilhões de pessoas ao redor do mundo. Mas levando em consideração a quantidade de diferentes tecnologias sendo estudadas e implantadas, quais delas devem realmente ser responsáveis por tais mudanças? Indo um pouco além, qual o impacto dessas mudanças na forma como se vê a engenharia de tráfego nos dias atuais? Este trabalho se propõe a estudar esse cenário futuro.

1.2 Objetivos

O presente trabalho busca, como objetivo principal, compreender o cenário atual e como deve ser a evolução das tecnologias enquadradas nos Sistemas Inteligentes de Transporte. Ademais, busca-se compreender qual impacto que deve recair sobre diversos aspectos da Engenharia de Tráfego com o advento tecnológico. Dessa maneira, o estudo foi dividido em dois focos.

O primeiro propósito corresponde à identificação e caracterização das organizações, aplicações e iniciativas relativas ao ITS no mundo, buscando identificar tendências futuras no segmento do transporte rodoviário, que possibilitem a antevisão de um cenário futuro com as tecnologias consolidadas.

A partir daí, pode-se buscar o segundo propósito, que consiste na avaliação do impacto ocasionado pelo avanço das tecnologias sobre a operação e o projeto geométrico rodoviário. Em adição, também foi visado mensurar os benefícios trazidos à rodovia e à população, de forma geral.

1.3 Metodologia

Para que os objetivos estabelecidos possam ser satisfeitos, o primeiro passo consiste em uma contextualização geral do que é o ITS, quais as tecnologias que o definem e como ele está organizado no mundo. Feito isso, pode-se partir para o levantamento e a análise dos principais projetos envolvendo a implantação de tecnologias de Sistemas Inteligentes de Transportes nos dias atuais, por meio de intensiva pesquisa.

Como o domínio de ITS é muito amplo e envolve uma quantidade enorme de tecnologias e sistemas sendo implementados, percebe-se a necessidade de direcionar a pesquisa. Procurou-se então por iniciativas notáveis ao redor do mundo que se enquadram no escopo do trabalho. Estas devem apresentar as seguintes características:

a) Sistemas com **comunicação entre veículos e infraestrutura (V2I/I2V)**. A comunicação entre veículos (V2V) também pode estar presente, porém sua presença não é obrigatória;
b) Instalação de equipamentos em **rodovias**, em oposição à aparelhagem no

ambiente urbano;

c) Iniciativas em fase de **planejamento, construção ou operação**. Este último desde que haja a intenção de manter o projeto em constante atualização tecnológica.

A escolha do estudo de iniciativas que envolvem a aplicação de sistemas sobre rodovias como cerne desse trabalho, ao invés de sistemas instalados sobre o ambiente urbano, se baseia na hipótese de que as tecnologias mais inovadoras devem ser desenvolvidas inicialmente para o ambiente rodoviário, já que este apresenta um tipo de operação de tráfego muito mais simples do que o tráfego no ambiente urbano. Isso porque o tráfego de veículos sobre o ambiente urbano apresenta uma complexidade muito maior, com um elevado número de interferências à operação básica (como intersecções, faixas de pedestres, tráfego de bicicletas, etc.), e portanto requer uma quantidade muito maior de equipamentos instalados e um sistema inteligente mais complexo, no geral. Assim, considerou-se que o ambiente rodoviário oferece condições mais favoráveis para a evolução das tecnologias e, consequentemente, as iniciativas que envolvem o ambiente rodoviário devem constituir um quadro de tecnologias mais avançado.

A definição das iniciativas para estudo não é uma tarefa fácil, já que depende da catalogação dos incontáveis empreendimentos em andamento pelo mundo – foram identificados desenvolvimentos de menor relevância em Hong Kong, em Virginia, na Coréia do Sul, em Cingapura, na Pensilvânia, na Califórnia, na Nova Zelândia, entre outros diversos locais. Após serem definidos os projetos, suas análises podem encontrar a confidencialidade dos mesmos como significativo obstáculo. Para superar esta dificuldade, é necessário realizar uma busca dirigida, baseada na comunicação direta com contatos internos das instituições responsáveis, através de e-mails ou ligações telefônicas.

O próximo passo é a execução da análise das iniciativas, ponderando a relevância de cada empreendimento para o estudo. Novamente, dada a amplitude da área dos Sistemas Inteligentes de Transporte, uma avaliação completa desses projetos pode levar meses e não agrega tanto valor ao trabalho em questão. Sendo assim, é importante manter a credibilidade da avaliação, direcionando a análise para aumentar a eficiência e garantir os melhores resultados. As principais áreas

analisadas recaem sobre a operação de tráfego, com ênfase especial em tecnologia, segurança e sustentabilidade.

Dessa forma, pode-se realizar um mapeamento do ITS no mundo, identificando sistemas, tecnologias, equipamentos, estruturas de gestão e iniciativas inovadoras. Considerando todos esses detalhes, o próximo passo do trabalho é encontrar o direcionamento dos Sistemas Inteligentes de Transporte.

A identificação das tendências em tecnologia permite a antevisão de um cenário futuro para o setor rodoviário e, com todas as informações já levantadas, parte-se para a análise de como podem ser afetados os parâmetros geométricos de projetos viários hoje utilizados. Tais parâmetros devem ser estudados e definidos a partir do contato com profissionais da área e da análise criteriosa de materiais como o conhecido "*Green Book*", da *American Association of State Highway and Transportation Oficials* (AASHTO, 2011) e o "Manual de Projeto Geométrico de Travessias Urbanas" do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT, 2010).

A partir dessa análise e de outras bibliografias, compreende-se melhor de que forma a inserção de tecnologias ITS pode mudar o desenvolvimento dos projetos geométricos de rodovias. Este estudo consiste em uma avaliação criteriosa dos parâmetros associados ao projeto rodoviário e expõe a complexidade no cálculo e a influência que os parâmetros exercem uns sobre os outros de forma a avaliar o impacto gerado pelas tecnologias ITS.

A concepção de um cenário futuro também pode ser utilizada em uma segunda análise, dos impactos da implantação de um sistema ITS em sobre a operação de uma rodovia. Primeiramente, se estabelece um cenário de referência, ou seja, uma situação livre de tecnologia, sem equipamentos ITS. O cenário futuro presumido, utilizado na comparação com o original, se baseia nas tendências e análises realizadas previamente no trabalho. Essas comparações, que constituem um estudo de caso, são realizadas através de simulações de tráfego realizadas no software VISSIM. Variando os parâmetros do modelo de acordo com as aplicações inseridas, pode-se observar as capacidades viárias resultantes de cada situação imposta.

2 *INTELLIGENT TRANSPORTATION SYSTEMS*

2.1 Conceitos de Comunicação

São fornecidas algumas definições nesta subseção, para ambientar o leitor aos principais conceitos associados aos Sistemas Inteligentes de Transporte. As terminologias aqui descritas são usualmente encontradas no decorrer do texto, pois possuem frequente utilização no segmento.

- V2V:

A sigla, que abrevia o termo *Vehicle-to-Vehicle,* se refere à comunicação de veículo para veículo, ou seja, é a troca de informações entre veículos. Essas informações podem conter dados quanto à localização e à velocidade, por exemplo, permitindo que algumas medidas sejam tomadas. Dependendo do sistema, pode ser gerado um alerta ao motorista em uma situação de perigo ou o próprio veículo pode realizar uma ação preventiva, como o acionamento automático dos freios.

- V2I/I2V:

V2I e I2V se referem à transmissão de dados do veículo para a infraestrutura ou da infraestrutura para o veículo. A infraestrutura pode funcionar como um intermédio para a comunicação entre veículos, auxiliando a transmissão de dados quando as distâncias são maiores, ou então realizar a gestão de tráfego, processando os dados coletados pelos veículos ou pelos equipamentos instalados nas vias, e retornando informações aos veículos. Como exemplo, o monitoramento de uma via por esse tipo de comunicação pode permitir a imposição de uma velocidade limite variável para permitir um maior fluxo de veículos.

- V2X:

A interface V2X engloba as comunicações V2V e V2I/I2V e ainda inclui outros agentes como, por exemplo, os pedestres. Pode-se definir então a comunicação V2X como a conexão entre o veículo e qualquer outro elemento do sistema. Por esse motivo, às vezes ela é referida no segmento como *Vehicle-to-Everything*.

- *Dedicated Short Range Communication* (DSRC):

DSCR é uma tecnologia de comunicação, que se utiliza de uma ou duas vias de transmissão de dados e faixa curta ou média sem fio, projetada para uso automobilístico. Desde o ano de 1999, a Comissão Federal de Comunicações nos EUA alocou 75 MHz de frequência dentro da banda de 5,9GHz, para ser usada pelos Sistemas Inteligentes de Transporte. Além disso, os aparelhos DSRC apresentam um alcance baixo, geralmente inferior a 1.000 metros.

- *Probe Vehicle Data*:

São os dados enviados pelos veículos tendo a infraestrutura como destinatário principal (comunicação V2I). Estes indicam parâmetros como a velocidade, posição, taxa de aceleração ou desaceleração e velocidade angular do veículo equipado.

2.2 Tipos de Aplicação

Seguem abaixo alguns exemplos que ilustram algumas das tecnologias e possibilidades de aplicação dos sistemas. Várias das funcionalidades descritas não estão consolidadas no mercado, mas já estão em fase de pesquisa e devem ser introduzidas gradualmente ao longo das próximas décadas.

- Sistema de alerta de cansaço:

Ainda está sendo desenvolvido, mas a ideia é produzir um alerta para o motorista caso sejam verificados sinais de fadiga que podem interferir na condução segura do veículo. Ainda se estuda como essa verificação poderia ser feita, mas estudos indicam que os movimentos do olho, número e velocidade de piscadas e micro movimentos oculares sejam um bom indicativo quanto ao cansaço do motorista.

- Adaptação inteligente de velocidade:

É um sistema que utiliza uma base de dados de velocidades limites das pistas, contida no veículo ou obtida através de conexão wireless. Através da localização via GPS e dessa base de dados, o sistema pode intervir ativamente na direção do veículo, para que as velocidade sejam respeitadas.

- Sinalização de velocidade limite variável:

Esta aplicação sinaliza ao motorista a variação na velocidade limite da via, de acordo com 2 fatores principais: as condições de tráfego da via e as condições meteorológicas. O sistema pode ter uma velocidade variável dependendo do horário e dia da semana, prevendo horários de pico, regiões com escola e outros, ou até intervir diretamente, conforme as informações das condições de tráfego em tempo real. Nesse caso, um sistema de medidas de fluxo através de sensores ópticos ou instalados na pista permite a maximização do fluxo, através da imposição de uma nova velocidade limite. Em relação às condições meteorológicas, o objetivo da variação na velocidade limite é o respeito às adversidades e a garantia da segurança.

- Visão noturna melhorada:

Objetiva a utilização de sensores infravermelhos para criar uma imagem reproduzida em um painel central que auxilia o motorista durante a noite, em condições de baixa visibilidade. Além da identificação de obstáculos comuns, esse tipo de captação por infravermelho pode ser de grande auxílio na detecção de pedestres ou animais, devido ao calor que seus corpos liberam.

- Proteção para pedestres e ciclistas em cruzamentos:

Essa tecnologia também usa sensores infravermelhos para detectar a presença de pedestres em cruzamentos, podendo tanto eliminar a fase do farol destinada à travessia de pedestres caso não seja detectada a presença dos mesmos, quanto ampliar ou reduzir essa fase caso os pedestres em questão demorem mais ou menos para cruzar a via. Dessa forma, pode-se otimizar o fluxo de veículos no cruzamento, ao mesmo tempo que fica garantida a segurança dos pedestres.

- Sistema de aviso de colisão:

Através da utilização de radares, sensores a laser ou câmeras o sistema do veículo identifica a aproximação de um obstáculo e pode agir de duas formas, passivamente ou ativamente. No modo passivo, o sistema avisa o motorista e ajusta os sistemas de segurança do veículo para a colisão (ajusta a posição do encosto de cabeça e do assento, pré-tensiona o cinto de segurança, etc.), mas não intervém para tomar o controle do veículo. Já no modo ativo, o sistema aciona o sistema de frenagem do veículo, de modo a evitar o acidente ou diminuir o impacto.

- Aviso de desvio em relação à faixa ou à rodovia:

Essa tecnologia tem por objetivo evitar que os veículos saiam da faixa em que trafegam e sofram acidentes por esse desvio. Através de sensores ou câmeras, o sistema identifica a posição da faixa em relação à direção que o veículo está se movimentando e, caso este esteja se locomovendo de forma a sair do traçado da rodovia, gera um aviso sonoro para alertar o motorista sobre a condição de perigo. Alguns sistemas utilizam avisos através de vibrações no volante e outros até intervém ativamente no controle lateral e direcionamento dos veículos.

- Sinais de velocidade aconselhável para caminhões:

Um caminhão que se aproxima de uma curva em alta velocidade apresenta um risco mais elevado de tombamento, devido ao seu centro de gravidade estar mais distante do solo, se comparado a um carro comum. Visando reduzir esse risco o sistema em questão se utiliza de tecnologias para pesagem em movimento, identificação do tipo de veículo e medida de altura, de forma a calcular qual a velocidade limite para o veículo não tombar. Utilizando essa velocidade limite calculada e a velocidade em que o veículo se encontra pode-se gerar avisos ao motorista, seja para informar que ele está acima da velocidade aconselhada ou para avisá-lo o quão próximo ele se encontra dela.

- Alertas quanto às condições meteorológicas:

Esse tipo de sistema se utiliza de diversos sensores para identificar e avaliar condições climáticas distintas como quantidade de vapor d'água, temperatura da pista, presença de gelo, névoa, chuva, entre outros. Através desses dados o sistema pode gerar alertas aos centros de gestão de tráfego quanto à necessidade de alguma intervenção, uma necessidade de degelo, por exemplo. O sistema ainda pode gerar alertas aos motoristas quanto à má condição do tempo, modificar as velocidades limites da pista para garantir a segurança em condições adversas ou até mesmo reduzir diretamente as velocidades dos veículos.

- Controle adaptativo da velocidade de cruzeiro:

Do inglês *adaptive cruise control* (ACC), esta tecnologia embarcada nos veículos se baseia na manutenção de uma distância segura em relação ao veículo da frente enquanto o sistema tenta manter uma velocidade de cruzeiro pré-estabelecida

pelo motorista. O funcionamento envolve um radar ou um laser que mede a distância entre os veículos e interfere caso essa distância atinja valores muito baixos relativos à velocidade em que o veículo se encontra. O sistema é capaz de reconhecer diferenças de declividade, alterando a aceleração para manter a velocidade, e aconselhar a mudança de faixa para uma menos congestionada. O sistema pode interferir tanto no motor quanto nos freios.

- Sistema de assistência em caso de acidente:

O sistema funciona através de um sensor de colisão, GPS e celular. Caso seja verificado um grande impacto pelo sensor de colisão, a emergência é automaticamente acionada através de uma mensagem contendo a localização do acidente via GPS do veículo. O centro de emergência faz contato via celular e identifica a real necessidade da emergência, que tipo de socorro deve ser solicitado e a gravidade do acidente. Caso não se verifique resposta dos passageiros o socorro é imediatamente encaminhado ao local indicado.

- Avisos sobre eventos na pista:

São avisos sobre eventos como acidentes, condições climáticas adversas ou obras na pista, a partir de 1.000 metros de distância. Independem do sistema do veículo, ou seja, são mensagens produzidas e disponibilizadas pela central da infraestrutura. A forma do aviso pode variar, ele pode ser transmitido por paíneis de mensagens variáveis, trailers estrategicamente posicionados, ou até em forma de mensagens da infraestrutura diretamente para o painel do veículo, por meio de comunicação I2V com DSRC.

- *In-Vehicle Information:*

A tecnologia permite uma apresentação contínua das informações de tráfego no painel do veículo, ao invés de apenas nos breves momentos em que o motorista passa por sinais de trânsito tradicionais e por eles obtém informações. Consiste na apresentação direta de informações como: velocidade limite da pista, direções de cidades, indicações de entradas e de saídas nas rodovias, entre outros. As informações são transmitidas no formato IVI, correspondente à tecnologia *In-Vehicle Information*.

Um diferencial dessa tecnologia é a especificação de caso a caso. Os dados que serão transmitidos para um veículo serão compatíveis com suas necessidades, de forma que informações sobre a pesagem de caminhões não devem aparecer para os automóveis comuns, por exemplo. Ou então, um alerta sobre obras em uma determinada rodovia não deve ser transmitido para veículos que não incluem esta rodovia como parte de sua rota. Assim, é possível se refinar a informação fornecida e aumentar a eficiência do sistema.

- Segurança em intersecções:

Nesta aplicação, o sistema identifica veículos que estão se aproximando de um semáforo com a intenção de se realizar uma manobra permitida (virar à direita, virar à esquerda ou mesmo seguir reto) e, após o processamento dos dados por parte da infraestrutura, fornece ao veículo informações de assistência para a manobra, como por exemplo, o tempo restante para realizar a passagem pelo semáforo verde com sucesso. Essa aplicação é focada na comunicação do tipo V2X, baseada na transmissão de mensagens contendo informações sobre semáforos controlados em cruzamentos e o mapa de topologia da infraestrutura. O formato da mensagem para o veículo é Signal Phase and Timing (SPAT) e Crossing Topology (MAPdata). O primeiro relaciona-se à temporização dos semáforos e o segundo relaciona-se à topografia da rodovia. Ou seja, o sistema da infraestrutura recebe informações de localização e velocidade dos veículos e, integrando as informações de temporização de semáforos e da topografia da via, é possível fornecer um resultado ao veículo para que o sistema reaja ou para que o usuário possa agir.

- Mensagens Cooperativas:

Através de mensagens do tipo *Probe Vehicle Data*, é possível reunir informações sobre as velocidades dos veículos, suas localizações, suas direções, suas utilizações (capacidades dos veículos), condições do clima, condições da rodovia (buracos, pista escorregadia) e informações sobre veículos vizinhos (mensagem específica do tipo DENM). A aplicação recebe esse nome em razão das mensagens serem de teor cooperativo, ou seja, são trocadas periodicamente entre os agentes envolvidos.

- *Electronic Toll Collection (ETC)*

É um sistema eletrônico e automático de coleta de algumas taxas, como pedágios, de forma que o veículo não precise parar em uma cabine para efetuar um pagamento, apenas passar pelo sensor fixo com uma velocidade reduzida. Dessa maneira, o número de paradas e gargalos é minimizado.

- Rota dinâmica:

O conceito da tecnologia se baseia no processamento, por parte da infraestrutura, das informações recebidas sobre as condições de tráfego (Probe Vehicle Data) e a seleção da melhor rota, seja ela a mais rápida ou mais curta, diminuindo o tempo gasto em congestionamentos e, consequentemente, a emissão de CO2.

2.3 Panorama Geral

O conceito de Sistemas Inteligentes de Transportes não é novo. Ele vem sendo discutido desde os anos 80, quando grupos de profissionais da área dos transportes perceberam o impacto que poderia ter a aplicação das tecnologias que vinham surgindo no campo da computação e comunicação no setor em que trabalhavam. Daí surgiram os *Intelligent Vehicle/Highway Systems*, como foram nomeados na época.

Desde então a evolução dos sistemas inteligentes acompanha o desenvolvimento de outras tecnologias, de forma que atualmente há uma quantidade expressiva de tecnologias ITS em operação pelo mundo. A maioria dos sistemas não é de alta complexidade, envolvendo geralmente equipamentos de detecção que dependem da atuação humana e comunicação direta com o usuário. Um exemplo é a instalação de câmeras ao longo das rodovias, permitindo que operadores de trânsito identifiquem obstruções na via e alertem os motoristas por meio de painéis eletrônicos.

Há também inúmeras instituições que se propõem a tratar do tema ao redor do mundo, sendo que as que merecem maior destaque estão localizadas nos Estados Unidos, na Europa e no Japão. Em cada uma destas regiões existem instituições que integram o governo, a indústria, a academia e a sociedade civil para discorrer sobre o futuro das tecnologias, estabelecer metas, aproximar os setores para o desenvolvimento das iniciativas de trabalho, entre outras atividades.

Nos Estados Unidos a entidade que exerce essa função é a *ITS America*, à qual estão associados a GM, a *Google*, a *Siemens* e diversos Departamentos de Trânsito Estaduais. No Japão a instituição é a *ITS Japan*, que se estrutura de forma muito semelhante, com membros como a *Toyota*, a *Honda* e alguns ministérios. Já na Europa há mais de uma instituição com esse papel, sendo que a principal delas é a *Ertico*, uma parceria internacional com mais de 100 organizações associadas. As três instituições listadas são responsáveis pela realização do Congresso Mundial de ITS que acontece anualmente e é sediado de forma intercalada nas três regiões. No ano de 2015, o evento ocorreu nos dias 5 a 9 de Outubro, na cidade de Bordeaux, França.

Além das instituições já citadas, existem as entidades governamentais que são responsáveis pela regulamentação dos sistemas e frequentemente se envolvem em projetos de pesquisa na área de ITS. Para estas três regiões já destacadas as entidades responsáveis são o *United States Department of Transportation* (USDOT), o *Ministery of Land, Infrastructure, Transport and Tourism* (MLIT), no Japão, e a

European Comission (EC), da qual participam diversos países europeus. Estas três instituições mantém um acordo de cooperação trilateral do ITS, com o objetivo de compartilhar o conhecimento adquirido em pesquisas em cada uma das regiões e realizar projetos conjuntos de implantação.

Existe hoje uma forte cobrança sobre estes órgãos, especialmente por parte da indústria automobilística, para que se acelere o processo de criação de legislação no que se refere às diretrizes para implantação das tecnologias e à regulamentação das parcerias público-privadas (PPPs). Algumas empresas americanas têm demonstrado grande insatisfação com o Congresso Americano e o Departamento dos Transportes, reivindicando que o atraso no desenvolvimento tecnológico do país tem como principal motivo a demora na tramitação da legislação dos sistemas ITS no Congresso.

Acredita-se, porém, que o ano de 2015 representou um *turning point* no processo evolutivo do ITS. O *Massachusetts Institute of Technology* (MIT) classificou a comunicação V2V como uma das 10 principais revoluções tecnológicas do ano, com um horizonte de disponibilidade da tecnologia no mercado de apenas 1-2 anos. De fato, as tecnologias parecem finalmente deixar o espaço das ideias e os campos de testes para chegar ao mercado automobilístico.

Os mais inovadores sistemas que estão em desenvolvimento no momento caminham em duas direções distintas: por um lado temos os projetos com comunicação V2V exclusiva, somente entre veículos; por outro há os projetos que incorporam, além da comunicação entre veículos, a interface V2I/I2V, na qual também ocorre a comunicação entre o veículo e a infraestrutura. Pode-se caracterizar esta segunda tecnologia como V2X. Paralelamente a estas iniciativas existem duas correntes de pensamento:

- A primeira considera que a comunicação V2V, se associada a outros elementos de tecnologia como o georreferenciamento ou sistemas de sensoriamento, é capaz de suprir as necessidades futuras;
- A segunda linha trabalha sob a crença de que há uma necessidade real de integração com a infraestrutura, que neste caso serviria como referência fixa para o posicionamento e movimentação do veículo, além de permitir um maior processamento para auxiliar na gestão do tráfego.

Parte importante deste trabalho consiste na verificação da validade destes argumentos. A partir da identificação de tendências tecnológicas, pode-se discorrer sobre a real necessidade de ocorrer a integração com a infraestrutura e, caso se julgue necessário, de que forma pode se dar esta integração.

O primeiro tipo de projeto parece ser o foco principal das empresas do setor automobilístico, como a Volvo, a BMW, a Mercedes e a Tesla. São diversos os desenvolvimentos com esta premissa. Além da tecnologia de comunicação, os veículos ainda dispõem de sensores e outros sistemas de detecção para auxiliar na operação.

Talvez em função do alto número de instituições envolvidas (em comparação aos projetos com V2V exclusivo), os projetos com V2X são mais raros de ser encontrados. Enquanto muito se pesquisa sobre o assunto em diversas universidades do mundo e até foram construídas pistas de testes para estudar sua aplicação, são poucos os projetos que realmente saíram do papel e já estão sendo implantados ou em operação.

Há ainda projetos que consideram não ser necessária a utilização de nenhuma forma de comunicação, como é o conceito do Google Car, pela Google. O veículo promete se autodirigir por meio de um sistema de georreferenciamento e sensores que são capazes de identificar as delimitações das vias, os veículos e obstáculos ao redor.

Entretanto, após uma pesquisa inicial feita pelo grupo foi percebida a relevância dos projetos que utilizam tecnologias V2X em rodovias. Apesar de serem mais raros, quando encontrados envolvem grandes iniciativas, com a participação, como já citado, dos governos, da indústria e da academia, englobando um maior número de especialistas e caracterizando um melhor indicativo do que pode se esperar do desempenho dessas tecnologias. Além disso, pelo fato de o tráfego no ambiente rodoviário se mostrar muito mais simples do que o tráfego no ambiente

Na intenção de avaliar se a tecnologia será responsável por encaminhar a evolução dos sistemas ITS ao longo dos próximos anos, decidiu-se por utilizar como foco de estudo a implantação das tecnologias V2X em rodovias pelo mundo.

3 ESTUDO DAS PRINCIPAIS INICIATIVAS

A Comissão Europeia define o uso de sistemas inteligentes cooperativos no tráfego rodoviário da seguinte forma:

> Operadores de tráfego, infraestrutura, veículos, seus motoristas e outros usuários da rodovia vão cooperar para oferecer a mais eficiente, segura e confortável jornada. Os sistemas cooperativos veículo-veículo e veículo-infraestrutura vão contribuir para estes objetivos além dos avanços alcançáveis por sistemas independentes. (EC, 2004, tradução nossa).

As iniciativas procuradas utilizam um conceito mais restritivo que a definição dada pela EC. Busca-se por projetos específicos nos quais a comunicação ocorre ou ocorrerá diretamente entre a infraestrutura e o veículo inteligente, ou ao menos dependa deste tipo de comunicação.

Um exemplo de aplicação seria um alerta de aproximação de veículo na intersecção, no qual os veículos emitem dados quanto ao posicionamento, velocidade e a aceleração (*Probe Vehicle Data*). A central de tráfego da infraestrutura capta essas informações, as processa e retorna um alerta para o veículo, que será mostrado no painel, caso exista risco de colisão. Neste caso, podem ser observadas as comunicações V2I e I2V, além da participação ativa do usuário que recebe o alerta e toma as providências necessárias para evitar a colisão. Nota-se que esta tecnologia não requer a intervenção humana na emissão do alerta.

Durante o estágio de identificação de iniciativas para análise, por meio de pesquisa intensiva, foram poucos os empreendimentos identificados que se adequam aos critérios adotados, porém a maior parte deles tratam de grandes desenvolvimentos, com alta representatividade dentro do campo do ITS.

Assim, cada uma das principais regiões (Europa, EUA e Japão) teve um projeto principal selecionado e mais um projeto relevante na Austrália foi escolhido. As iniciativas escolhidas são os seguintes:

a) Europa – *Cooperative ITS Corridor - Joint Deployment*;
b) EUA – *Southeast Michigan Connected Vehicle Deployment*;
c) Japão – *ITS Spot Services*;
d) Austrália – *Cooperative Intelligent Transport System Initiative - CITI Project*.

Outras iniciativas pelo mundo foram detectadas e avaliadas. De fato, existem muitas, que abrangem uma gama enorme de cenários e tecnologias. Alguns casos valem ser mencionados como ilustração de desenvolvimento de tecnologias.

Cingapura é um país que, devido ao crescimento populacional e econômico extremamente rápido, foi induzido a investir em sistemas de transporte. Seus desenvolvimentos tecnológicos se destacam na área da informação em tempo real, desde 1998, melhorando o tráfego e a gestão do sistema. Seus principais investimentos são direcionados ao transporte público.

Outros países também fundamentam sua evolução na área de ITS na expansão da informação em tempo real. Um deles é a Coréia do Sul, que desde 2000 objetiva a criação de uma rede nacional conectada para todas as cidades do país – cada uma com seu subsistema. Seus principais incentivos são concentrados no progresso do sistema de transporte público e, no caso de rodovias, na coleta eletrônica de pedágios conforme nível de uso da via, ou seja, o pedágio é precificado conforme o tráfego. Essa última ação é encontrada em outros países no mundo, como forma de manipular o tráfego e melhorar a eficiência das vias, como na Suécia.

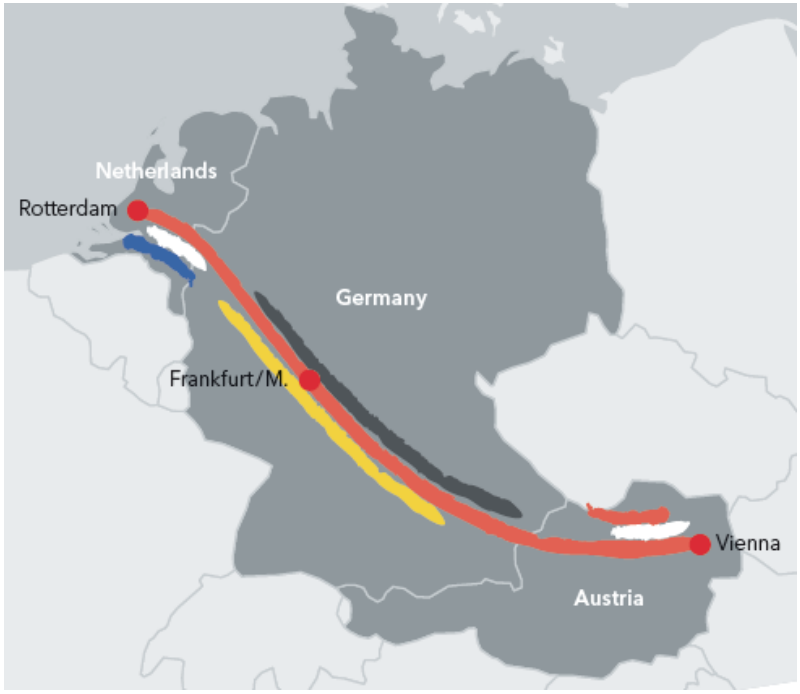
Avaliando mais países europeus, destaca-se um projeto internacional para desenvolvimento tecnológico, chamado DRIVE C2X. Esta iniciativa consiste na estruturação do desenvolvimento de tecnologias por organizações espalhadas por todo o continente, realizando estudos e testes que podem servir de suporte para uma futura implantação em rodovias europeias.

O presente trabalho, no entanto, focará apenas nos primeiros quatro projetos mencionados, que melhor se enquadram ao escopo. Claro que outras iniciativas são significativas para o avanço de sistemas inteligentes de transporte e devem ser consideradas para um estudo mais abrangente, porém a avaliação crítica destas iniciativas, que envolvem a instalação de equipamentos sobre rodovias, já satisfazem o objetivo do trabalho. Como mencionado, esse estudo dos desenvolvimentos tecnológicos pelo mundo é essencial para um entendimento completo da trajetória do ITS. Porém, não se deve ignorar o fato de que sistemas inteligentes de transporte englobam inúmeras categorias de tecnologias e aplicações, sendo assim necessário avaliar quais são as informações mais relevantes para nossa análise, quais os países mais avançados na área. Assim, finalmente, será possível a maturação do conhecimento de sistemas ITS e conjecturar possibilidades futuras para a área.

3.1 *Cooperative ITS Corridor - Joint Deployment*

Este projeto consiste na instalação de um sistema inteligente sobre um corredor que interliga algumas rodovias europeias, passando pelas cidades de Rotterdam (Holanda), Frankfurt (Alemanha) e Viena (Áustria). A proposta do corredor, cuja extensão é de 1.200 quilômetros (Figura 2), é empregar tecnologias ITS ao longo dessas rodovias e equipar veículos com dispositivos de comunicação, para promover a integração e comunicação em tempo real entre os veículos e entre os veículos e a infraestrutura.

Figura 2 – Corredor ITS Roterdã - Frankfurt - Viena



Fonte: BMVI (2014)

Segundo a primeira versão do relatório – *"Roadmap between automotive industry and infrastructure organisations on initial deployment of Cooperative ITS in Europe"* (AMSTERDAM GROUP, 2013) esse compartilhamento de informação no corredor permite:

- Melhorar a segurança e a confiabilidade do sistema rodoviário;
- Aumentar a efetividade do uso do corredor;
- Reduzir as emissões, ou seja, tornar a viagem ambientalmente sustentável;

- Aumentar a integração entre monitoramento e autoridade;
- Reunir informações do tráfego para gestores das rodovias;
- Influenciar nas decisões de investimentos de autoridades e gestores de rodovias em sistemas cooperativos;
- Oferecer serviços inovadores aos usuários, que podem mudar hábitos e comportamentos nesses corredores;
- Aumentar o desenvolvimento econômico das indústrias e dos fornecedores de serviços.

Além dos principais objetivos da implantação do corredor, listados acima, há também uma série de benefícios esperados, relacionados na Tabela 1.

Tabela 1 – Benefícios esperados da implantação do Corredor Roterdã-Viena

Agentes	Benefícios esperados
Usuário	Aumento da segurança do tráfego Aumento do conforto ao dirigir Redução do consumo de combustíveis Redução dos tempos de viagem (redução dos congestionamentos) Redução dos valores das apólices de seguro
Indústria automotiva / Fabricante Original de Equipamentos (OEM[1])	Contribuição para suprimento de serviços de mobilidade Elevação do valor agregado dos veículos produzidos Intensificação do relacionamento com os consumidores Obtenção de dados a partir das comunicações veículo – infraestrutura Possibilidade de fornecer informações de qualidade para os motoristas Produto mais seguro Valor comercial dos dados coletados
Autoridades viárias	Fornecimento de condições para monitoramento Gerenciamento e informação do tráfego mais eficazes e eficientes Incremento da produtividade dos trabalhadores por redução da ausência Informações de maior qualidade para os motoristas Otimização da capacidade viária Potencialidade para redução dos investimentos em infraestrutura Redução das ocorrências de incidentes e acidentes Redução dos custos de coleta de dados do tráfego

/continua

[1] OEM, ou *Original Equipment Manufacturer*, é o termo designado para descrever o Fabricante Original de Equipamentos, os quais são revendidos por um cliente como se fosse de manufatura própria, geralmente com design customizado.

/continuação

Operadores de vias (comercial)	Incremento da aceitação por parte dos usuários Incremento da segurança percebida pelos usuários Otimização do projeto de infraestrutura Redução dos custos de implantação e manutenção de infraestrutura Redução dos impactos ambientais – inclusive consumo de energia
Cidades	Fornecimento de condições para monitoramento Maior integração entre o tráfego e o meio ambiente Potencialidade para redução dos investimentos em infraestrutura Redução dos congestionamentos na malha viária urbana Tráfego mais seguro nas cidades

Fonte: *Amsterdam Group* (2013)

Por diversos anos, ações foram tomadas pela indústria automotiva e por operadores de rodovias para se lançar serviços e sistemas cooperativos no mercado. No entanto, sempre houve muita dificuldade na implantação em razão da falta de coordenação, já que não havia estratégia para o desenvolvimento em conjunto. No dia 10 de Junho de 2013, surgiu a esperança de se mudar tal cenário: foi assinado o Memorando de Entendimento do projeto *Cooperative ITS Corridor – Joint Deployment*, pelos ministros, que representavam a Alemanha (Ministério Federal de Transporte, Construção e Desenvolvimento Urbano - BMVBS), a Áustria (Ministério de Transporte, Inovação e Tecnologia - BMVIT) e a Holanda (Ministério de Infraestrutura e Meio Ambiente). Esse evento representou o início oficial do empreendimento, extremamente ambicioso, cujos objetivos e benefícios mencionados ressaltam sua tamanha importância e suas dificuldades de desenvolvimento e implantação. Isso foi possível graças à criação de uma aliança estratégica, com o principal objetivo de promover a implantação do sistema cooperativo ITS na Europa, a *Amsterdam Group* (AG). Esse grupo reúne as seguintes organizações:

- ASECAP - associação europeia profissional dos operadores de infraestruturas rodoviárias;
- CEDR - organização europeia dos administradores das rodovias nacionais;
- POLIS - Rede de cidades e regiões europeias que trabalha conjuntamente para desenvolver tecnologias e regulamentações para o trânsito local;
- CAR2CAR - *Communication Consortium* - organização europeia de pesquisadores e fabricantes de equipamentos de veículos.

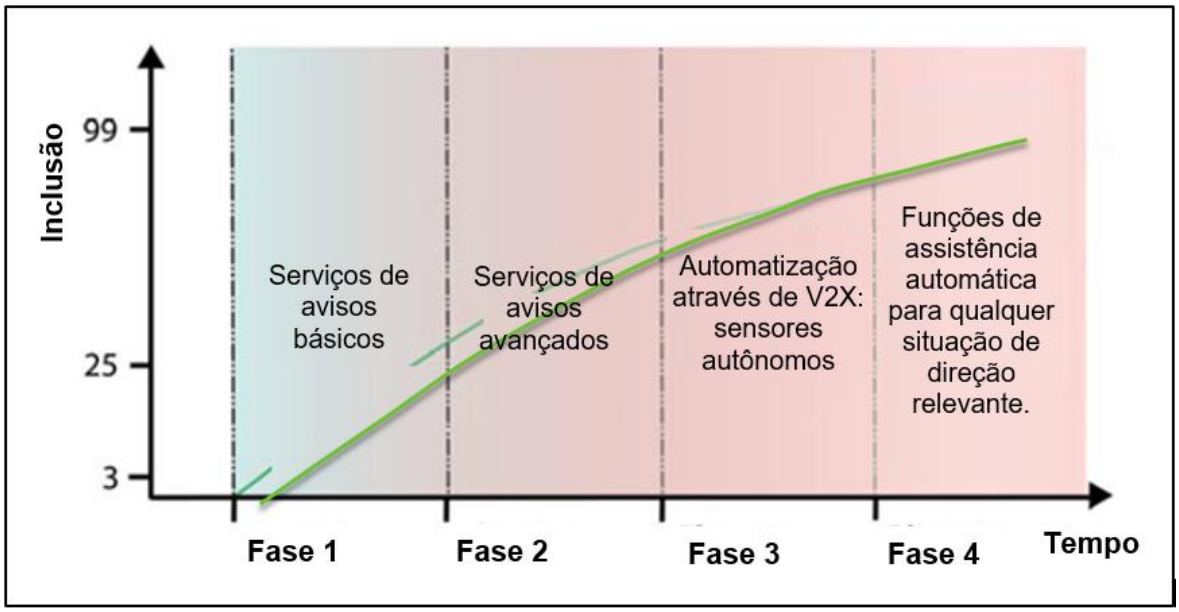
A associação foi criada para: facilitar os diálogos a respeito das necessidades e resultados de implantações; criar uma interface de comunicação integrada entre os membros; realizar trocas de experiências entre projetos; manter contato com a Comissão Europeia; vencer barreiras para implantações; estabelecer as especificações padronizadas do corredor. Apesar disso, Pellegrini (2014) comenta que a existência de um grande número de agentes envolvidos no projeto acarreta em uma série de desafios a serem enfrentados para a implantação do corredor:

- Custos mais elevados de implantação e operação;
- Atratividade em relação às tecnologias utilizadas atualmente;
- Novos requisitos para operação;
- Necessidade de padronização e normatização para ser possível compatibilizar a operação;
- Necessidade de compatibilização entre as diversas comunicações e aplicações;
- Dificuldades em relação à confiabilidade, possíveis desconfianças sobre a efetividade dos benefícios da implantação;
- Dúvidas sobre a possibilidade de se estender os serviços prestados aos usuários não motorizados.

Diante dessas questões, o Corredor Roterdã-Viena será implantado seguindo etapas de instalação em diversos lugares. A iniciativa é dividida em quatro fases, ilustradas na Figura 3, sendo a fase inicial composta por simples serviços, basicamente de comunicação, até mesmo com limitações de equipamentos ITS em veículos e nas rodovias (Hot Spots[2]), a partir dos quais será possível alcançar os benefícios mencionados na Tabela 1. Nas próximas fases serão implantados serviços mais complexos, com veículos equipados com dispositivos ITS que permitem uma melhor assistência na direção dos mesmos e uma infraestrutura integrada e de grande cobertura da rede. Por final, é visada uma infraestrutura rodoviária completamente integrada com a capacidade cooperativa dos veículos para reunir diversos serviços cooperativos.

[2] *Hot Spots* são postes, dispostos nos canteiros ao longo de uma rodovia, equipados com dispositivos ITS para comunicação.

Figura 3 – Fases de implantação do Corredor Roterdã-Viena.



Fonte: *Amsterdam Group* (2013).

A inclusão de novas tecnologias é um processo lento, no qual as necessidades do mercado e os planos de negócios devem ser levados em consideração, além dos altos investimentos necessários. O desenvolvimento e a implantação do Corredor serão apoiados por um *retrofit*[3] de equipamento, independente da evolução da tecnologia. Essa questão é questionável, pois necessita profundos estudos. No momento, a associação segue o desenvolvimento técnico e de regulamentações dos Estados Unidos. A implantação será impulsionada pelas preferências do mercado.

Na fase inicial, os serviços implantados constituem *Day One Services*[4], que correspondem a um sistema tecnicamente interoperável e baseado em acordos e padrões. Algumas das tecnologias previstas para a fase inicial estão dispostas na Tabela 2.

[3] "*Retrofit* é um termo utilizado principalmente em engenharia para designar o processo de modernização de algum equipamento já considerado ultrapassado ou fora de norma.
[4] *Day One Services* consiste no conjunto de serviços implantados na fase inicial do Corredor Roterdã-Viena, termo designado pela associação *Amsterdam Group*, responsável pelo projeto.

Tabela 2 – Serviços previstos para a fase inicial

Comunicação V2V	Comunicação V2I/I2V
Aviso de localização de perigo	Avisos de trabalhos/reformas na pista
Aviso de veículo lento	*In-Vehicle Information*
Aviso de congestionamento à frente	Segurança nas Intersecções
Aviso de veículo parado	*Probe Vehicle Data*
Luz de emergência de freio	
Aviso de emergência do veículo	
Indicação de motocicleta se aproximando	

Fonte: *Amsterdam Group* (2013)

Para seguir essas etapas, os países envolvidos no desenvolvimento e implantação do corredor trabalham com projetos que impulsionam um sistema cooperativo de transporte inteligente e que servem de experiência do que será implantado no corredor. São exemplos: projetos rodoviários na Holanda (DITCM) e na Áustria (*Testfeld Telematik*).

O projeto *Dutch Integrated Testsite for Cooperative Mobility* (DITCM) [Figura 4] envolve vinte companhias, autoridades rodoviárias e instituições de ensino. O objetivo é, juntamente, desenvolver, programar, testar e investir nas soluções de gestão do tráfego e em ITS, reduzindo custos e aumentando as oportunidades para indústrias. As instalações do projeto estão espalhadas pelo país, como por exemplo, as rodovias holandesas A270 e N270: instalação teste completamente equipada para um sistema cooperativo, 2 quilômetros urbanos e 6 quilômetros de rodovia equipados com 56 câmeras fixas de alta resolução (monitoramento em tempo real, para reconhecimento e rastreamento), 11 câmeras *Dome* [5], 1 sala de controle operacional, sistema complexo de simulação, laboratório, 20 postes de comunicação da infraestrutura (ITS G5 - comunicação Wi-Fi ou 3G, na frequência 5.9 GHz).

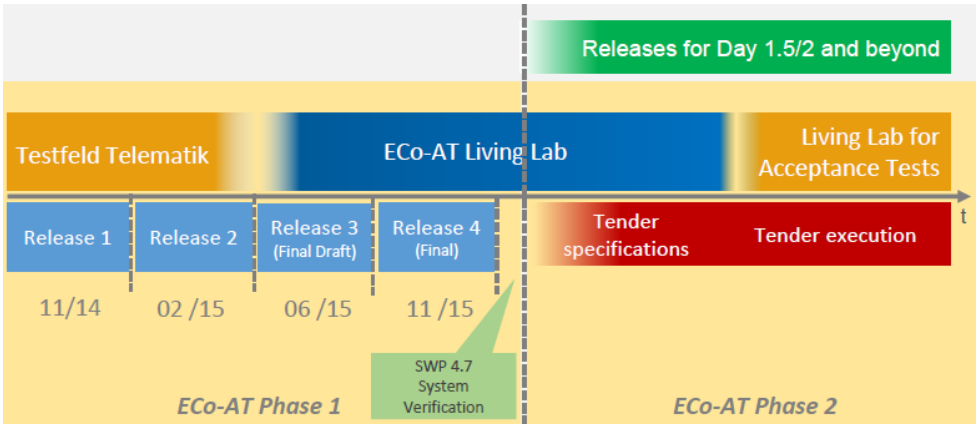
[5] Câmeras *Dome* são câmeras de monitoramento, especialmente produzidas para serem instaladas em nível mais alto do que objetiva filmar. São protegidas por vidro externo e podem ser equipadas com visão noturna e iluminadores infravermelho.

Figura 4 – Tecnologia da empresa Tass International para o projeto DITCM

Fonte: *Dutch Integrated Testsite for Cooperative Mobility* (2014)

O projeto da Áustria (*Testfeld Telematik)* é semelhante ao projeto holandês, funcionando também como um laboratório vivo. Dentro do projeto *European Corridor – Austrian Testbed for Cooperative Systems* (Eco-AT) [Figura 5], *Testfeld telematik* constitui as primeiras atividades da primeira fase do projeto austríaco, ou seja, é a etapa em que sistemas e serviços cooperativos são especificados e soluções são testadas por indústrias, cidades e operadores de rodovias. Na segunda fase, sistemas e serviços cooperativos são realizados pela implantação da operação final.

Figura 5 – Cronograma do projeto ECo-AT.



Fonte: ECo-AT (2015)

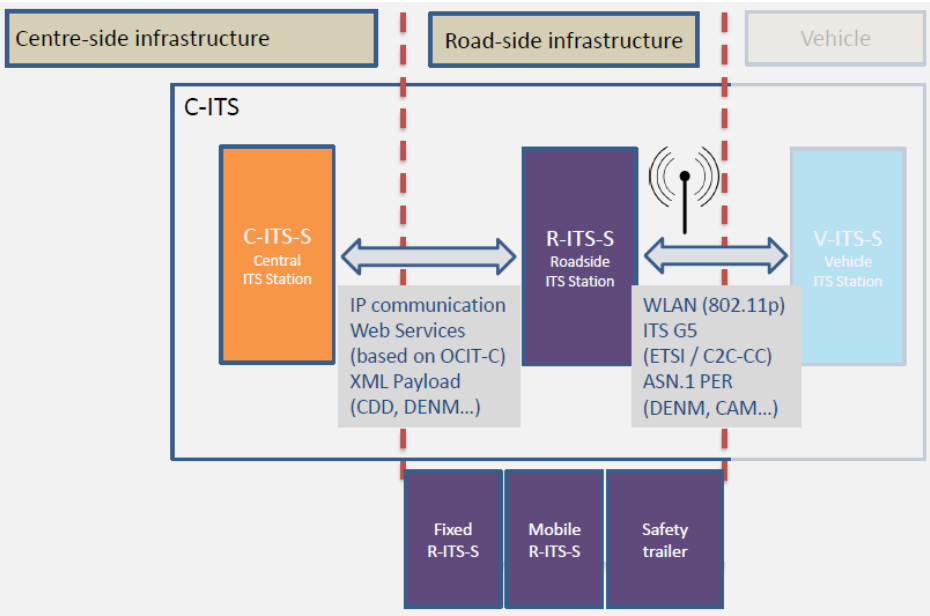
O projeto teve início em 2014 e os primeiros resultados de testes foram fornecidos ao público na forma de e-mail, conforme requisição. A fase 1 é constituída

por uma especificação completa do sistema de corredor ITS, testado pelos parceiros industriais do projeto ECo-AT. Na fase 2, a maior empresa operadora de vias será a única parceira no projeto, para, após testes, desenvolver propostas de especificações do sistema. Os testes que são realizados seguem uma ordem geral de etapas: teste dos componentes realizados pelos parceiros, testes de integração entre os componentes para reconhecer e eliminar erros, e testes de sistema, como etapa final.

Após desenvolvimento, testes e análise dos projetos apontados, as principais aplicações na primeira fase do Corredor Roterdã Viena são: avisos sobre eventos na pista, *In-Vehicle Information*, segurança em intersecção e mensagens cooperativas.

Conforme já mencionado, estabelecer uma comunicação padronizada e interoperável no continente era uma das dificuldades e necessidades do projeto. Dentro de cada aplicação, a forma de comunicação respectiva é a ITS G-5, uma padronização na União Europeia e do Instituto Europeu de Padrões de Telecomunicações. A comunicação WLAN (802.11p) ITS G5 é a comunicação padronizada, do tipo Wi-Fi. O espectro de funcionamento da frequência dos equipamentos é de 5,875 – 5,905 GHz e as unidades dispostas nos canteiros das rodovias devem estar espaçadas de 200 a 800 metros (capacidade máxima de transmissão da antena). A comunicação entre os veículos e a infraestrutura é realizada por mensagens do tipo *CAM* ou *DENM* e entre a infraestrutura e a central através de mensagens do tipo *DENM*. A Figura 6 ilustra as relações de comunicação.

Figura 6 – Arquitetura do sistema de comunicação



Fonte: Hitachi Europe SAS (2013)

3.2 *Southeast Michigan Connected Vehicle Deployment*

O Estado de Michigan, EUA, liderado pelo *Michigan Department of Transportation* (MDOT), é uma das grandes referências em inovação e tecnologia na área dos transportes. Em 1995, foram instalados equipamentos em 148 milhas (238 quilômetros) de rodovias da região Sudeste de Michigan, incluindo a região metropolitana de Detroit, que a tornaram, na época, o maior campo de testes de ITS no mundo. O sistema expandido incluía um total de 180 milhas (290 quilômetros) de rodovias equipadas, 156 câmeras de circuito fechado de televisão, 59 painéis de mensagens variáveis, 61 *ramp meters*[6], 2.260 laços de indução[7] e 11 rádios de alertas rodoviários.

Todos estes equipamentos continuam presentes na operação das rodovias e sofreram alguma evolução, porém eles pertencem a uma categoria de sistemas com tecnologias menos desenvolvidas, mais dependente da participação do usuário. Atualmente, o foco das instituições recai sobre o desenvolvimento de sistemas que mais inovadores, que se baseiam na comunicação V2X.

No ano de 2012, o *Mobility Transformation Center,* ou *MTC*, um quadro de pesquisas da Universidade de Michigan, iniciou um programa de duração de 3 anos e custo total de 31 milhões de dólares, que consistia na realização de testes com 2.836 veículos equipados com equipamentos com comunicação *wireless* por DSRC de 5,9 GHz, em uma área geográfica concentrada em Ann Arbor, na região metropolitana de Detroit.

Foi realizada uma coleta de dados, do tipo *Probe Vehicle Data*, em um total de 19 intersecções, 3 trechos de curva e 3 trechos de rodovias, de forma que a quantidade de dados coletada foi gigantesca: 70 bilhões aproximadamente, para um total de 4 milhões de viagens e 25 milhões de milhas percorridas.

No campo da comunicação V2V, foram operadas as seguintes funcionalidades: alerta de colisão frontal, luz de freio eletrônica emergencial, alerta para ponto cego/mudança de faixa, alerta de ultrapassagem, assistência na intersecção e

---

[6] *Ramp meters* são semáforos modificados que regulam a quantidade de carros permitidos em um acesso em um específico intervalo de tempo, utilizando apenas luzes verdes e vermelhas.

[7] Laços de indução são equipamentos que se utilizam de imãs móveis para induzir corrente elétrica em cabos, sendo assim capaz de identificar peças de metal se movimentando nas proximidades. No transporte rodoviário, são instalados sob o pavimento para indicar a passagem de um veículo e são usualmente encontrados em operação conjunta com radares fixos de velocidade ou semáforo.

assistência no contorno à esquerda. Quanto à comunicação com a infraestrutura foram realizados os seguintes testes: alerta de velocidade na curva, alerta de violação de farol vermelho, assistência para sinal de parada, unidades *Roadside* e alerta de trânsito de pedestre.

Esse teste foi precursor para o desenvolvimento de uma Plataforma de Inovação por parte da instituição, baseada em três pilares sequenciais. O principal enfoque nessa análise de iniciativa recai sobre o segundo pilar, que se mostra mais inovador que o primeiro e dispõe de mais informações concretas, em comparação ao terceiro. Os três pilares são os seguintes:

a) Ann Arbor Connected Vehicle Test Environment (2015+);
b) Southeast Michigan Connected Vehicle Deployment (2016+);
c) Ann Arbor Automated Vehicle Field Operational Test (2017+).

O primeiro pilar consiste na realização de testes muito semelhantes aos que foram feitos a partir de 2012, porém, em uma escala consideravelmente maior. Pretende-se equipar um total de 9.000 veículos (entre estes carros, ônibus, motos e até conexões com pedestres), testando-os em 60 intersecções, 3 curvas e 12 trechos de rodovias. O resultado não deve ser muito diferente do que se atingiu na primeira vez, mas a pesquisa tem importância em relação ao aspecto da validação dos sistemas ITS, a partir da coleta ampla de dados.

O segundo pilar, foco principal deste estudo, consiste na implantação de um sistema ITS integrado em alguns trechos de rodovias selecionados na região metropolitana de Detroit, com comunicação V2X. O empreendimento, que deve ter início no ano de 2016 e conclusão prevista para o ano de 2019, deve incluir os seguintes elementos, segundo o *MTC*:

- Por volta de 20.000 veículos integrados, dentre os quais a maioria será de posse de empresas e dirigidos por seus funcionários;
- Até 500 nós de infraestrutura, que podem ser as chamadas *Roadside Units*[8] ou centros de controle, como o já operante *Southeast Michigan Transportation*

[8] *Roadside* Units são equipamentos instalados ao longo das vias que recebem e enviam mensagens de segurança, de forma a se comunicar com os sistemas de controle de tráfego.

Operations Center (SEMTOC). Estão localizados próximos a instalações de OEMs, já que muitos dos fabricantes do setor automobilístico estão localizados na própria cidade de Detroit;

- Até 5.000 equipamentos de segurança distribuídos e instalados, estes subdivididos nas categorias de equipamentos de segurança de *aftermaket, retrofit* e *pedestrian*;
- Um sistema de segurança tecnológica e patrimonial totalmente funcional.

A participação da *General Motors* neste projeto foi anunciada pela CEO da empresa, Mary Barra, em setembro de 2014, em discurso no Congresso Mundial de ITS, sediado na própria cidade de Detroit (BARRA, 2014). Além da GM e da Universidade de Michigan, estão envolvidas diretamente no projeto a *Ford Motors Co.* e o MDOT.

A operação do sistema dependerá de uma parceria público privada, de forma que o Departamento dos Transportes estatal ficará em cargo da operação da rodovia, ao mesmo tempo que a indústria automobilística terá responsabilidade sobre os equipamentos de comunicação e detecção nos carros, garantindo a compatibilidade com os equipamentos instalados na infraestrutura.

Em seu discurso, Barra comentou também sobre a importância da regulamentação das PPPs[9] e do estabelecimento de normatização para aplicação de sistemas ITS, como forma de incentivo para o desenvolvimento de iniciativas na área. O comentário foi feito como uma forma de cobrança ao congresso americano (BARRA, 2014). O USDOT afirma que já está em desenvolvimento legislação que obriga os fabricantes americanos a incluir equipamentos de comunicação V2V em todos os novos veículos produzidos.

Em relação à iniciativa, efetivamente, o corredor cooperativo inicial a ser equipado está localizado nas rodovias *Interstates* 96 e 696, no trecho entre a cidade de Brighton e a rodovia Interstate 94 em St. Clair Shores (Figura 7). O trecho inicial tem um comprimento total de 50 milhas (80 quilômetros) e foi escolhido por possuir um dos maiores volumes de tráfego do Estado.

[9] PPP - Parcerias Público-Privadas

Figura 7 – Fase inicial de implantação nas rodovias I-96 e I-696

Fonte: MDOT (2014)

As próximas fases de implantação consistem na criação de corredores conectados em trechos de outras rodovias de trânsito carregado: a Rodovia Federal US-23 e as Interstates I-94 e I-75.

A comunicação neste caso também deve ser realizada por equipamentos de tecnologia de comunicação DSRC de 5,9 GHz, sendo que estes serão instalados tanto no interior dos veículos, como *Onboard Units* (OBUs[10]), quanto nas unidades da infraestrutura, como *Roadside Units (*RSUs*)*.

Acredita-se que as funcionalidades operadas no sistema – o mesmo serve para o primeiro pilar – serão muito semelhantes ou iguais àquelas operadas no teste precursor, na cidade de Ann Harbor. Trata-se de uma crença e não uma certeza, pois apesar de a mesma equipe ser responsável pelos projetos, nenhuma bibliografia foi encontrada a respeito. Outra possibilidade é de que a operação ainda não tenha sido definida, já que o projeto ainda não teve sua instalação iniciada, ou que a falta de informações concretas seja fruto da busca por manter a confidencialidade do projeto.

[10] *Onboard Units* são os equipamentos auxiliares instalados no interior dos veículos, que enviam e recebem informações de outros aparelhos ou sistemas.

Apesar de ainda estar em fase de planejamento, o projeto é de grande relevância, como aponta a fala de Barra - *"[...] quando finalizado, este deve ser o maior desenvolvimento da tecnologia V2I nos Estados Unidos e um dos maiores do mundo!"* (BARRA, 2014, tradução nossa).

O terceiro pilar da Plataforma do MTC se baseia na automatização completa de uma cidade simulada no interior de Ann Arbor, cidade adjacente à Detroit. Esta região, de aproximadamente 27 milhas quadradas (70 quilômetros quadrados), será denominada *Mobility Transformation Facility* (MTF), e será densamente povoada por veículos de diversos tipos, equipamentos de comunicação e equipamentos de sensoriamento e filmagem. O objetivo é criar um ambiente urbano único para testes de sistemas ITS.

A consolidação das informações acima leva a crer que o *Mobility Transformation Center,* da Universidade de Michigan é o maior idealizador das iniciativas de ITS no Estado de Michigan, senão em todos os Estados Unidos. A própria organização se descreve como *"uma parceria pública privada de pesquisa e desenvolvimento, que deve liderar uma revolução na área da mobilidade e estabelecer a fundação para um ecossistema comercialmente viável de veículos conectados e automatizados"*. A organização ainda promete criar um sistema completo de transporte conectado e automatizado nas ruas da região Sudeste de Michigan até o ano de 2021, o que deve ocorrer com a conclusão do terceiro pilar do planejamento estabelecido.

Os projetos descritos acima exigiram um investimento inicial compartilhado de aproximadamente 100 milhões de dólares, dos quais 25% partiram diretamente da Universidade de Michigan. O plano completo, que teve início em Agosto de 2012, tem duração de 8 anos. O primeiro teste com veículo integralmente autoguiado foi realizado em Novembro de 2015, sendo após um mês realizado o teste do mesmo em condições de neve. Infelizmente, as tecnologias envolvidas nesses testes não foram disponibilizadas.

Além dos projetos já detalhados, ainda há outros que merecem ser citados. Por exemplo, a GM trabalha em paralelo no desenvolvimento do novo modelo do *Cadillac CTS*, que pode se tornar o primeiro veículo nos EUA a incluir equipamentos compatíveis com a tecnologia V2X. A previsão é que o automóvel chegue às ruas já em 2017.

Este modelo incluirá uma funcionalidade denominada *Super Cruise* que pode ser ativada pelo motorista em trechos retos de rodovia - em ambas as situações de fluxo livre e congestionamento - e é capaz de conduzir o veículo de forma semiautônoma, se utilizando de sensores que identificam os veículos ao redor e as delimitações da via. O veículo incluirá 18 dos chamados “olhos eletrônicos”. Entretanto, o exercício do *Super Cruise* é restrito a apenas esta aplicação em rodovias. O desafio de auto direção em trechos urbanos, em que é necessário desviar de todo tipo de imprevisto, só deve encontrar solução nas décadas futuras.

A integração com a infraestrutura tem o objetivo de garantir que o *Cadillac CTS,* e outros modelos que possam vir a surgir, não fiquem isolados por não terem outros veículos para se comunicar durante a evolução dos sistemas ITS e, assim, potencializar os avanços tecnológicos no segmento industrial.

Apenas para contextualizar o importante papel que os desenvolvimentos acima podem desempenhar, o USDOT realizou um estudo que indica que 70-80% dos acidentes rodoviários podem ser evitados a partir da utilização das tecnologias de comunicação V2V, resultando em uma redução de custo no país de aproximadamente 870 bilhões de dólares anuais (WASHINGTON POST, 2014). Enquanto isso, o MDOT trabalha com a meta de erradicar as fatalidades em seu território de controle a partir do incentivo à aplicação dos novos sistemas.

3.3 *ITS Spot Services*

Dentre as principais iniciativas ao redor do mundo, as implantações de ITS no Japão são as que se encontram no estágio mais avançado. Enquanto na Europa e nos Estados Unidos muitas das tecnologias encontram-se em desenvolvimento ou no início de sua implantação, no país asiático, muitas tecnologias já vêm sendo aplicadas há algum tempo, como é o caso do *Vehicle Information and Communication Systems* (VICS) e o *Electronic Toll Collection* (ETC), iniciados em 1996 e 1997, respectivamente.

O VICS constitui-se de um sistema de informações sobre o tráfego, exibido nas telas de navegação dos carros com o propósito de auxiliar o motorista a evitar rotas congestionadas. As informações são coletadas através de dispositivos e sensores fixos na rodovia ou até dispositivos em movimento, como telefones celulares. As informações são reunidas em uma central de controle que libera a informação para o sistema de navegação do veículo, em três formas: textos, gráficos ou mapas. Esse sistema se equipara ao recurso de *In-Vehicle Information*, no entanto, no caso japonês as mensagens não são contínuas, elas são fornecidas em apenas pontos específicos ao longo da infraestrutura. Essas informações são transmitidas quando um veículo passa por uma torre de rádio (com varredura de 200km), por torre de infravermelho (com varredura de 30km) ou por radiodifusão FM (ampla difusão pelo país). Em 2009, o VICS encontrava-se instalado em cerca de 35 milhões de veículos e estima-se que tenha causado uma redução de 2,4 milhões de toneladas na emissão de CO2 no ano em questão.

Paralelamente, estima-se que o sistema de ETC, instalado em 39 milhões de veículos, tenha causado uma redução de 30% de todos os congestionamentos em estradas e uma consequente redução de 210.000 toneladas de CO_2 emitidas por ano.

Além disso, no ano de 2011 já encontravam-se instalados 1.600 *ITS spots*, um tipo de sensor e transmissor que troca informações utilizando tecnologia DSRC, via 5,8 GHz. Esses sensores são instalados com um intervalo de 10 a 15 km em estradas rurais e 4 km em estradas próximas a regiões urbanas, coletando e transmitindo informações ao veículo.

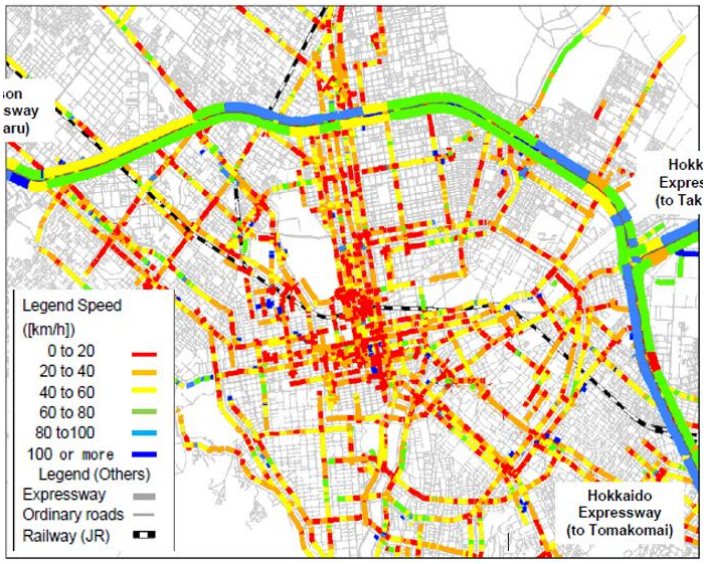
Dois tipos de dados são coletados, de deslocamento (tempo, localização e velocidade) e comportamentais (tempo, aceleração em todos os sentidos e a velocidade angular de mudança de direção). Os dados apresentam uma política de

privacidade na qual nem o motorista nem o veículo devem ser identificados e onde o motorista pode escolher compartilhar ou não os dados. Além disso, os dados têm uso limitado ao avanço na gestão rodoviária, desenvolvimento de produtos manufaturados e pesquisa.

Esses dados são transmitidos aos *ITS spots*, retransmitidos a um servidor e posteriormente a uma central administrativa, onde a informação é processada de diversas maneiras e enviadas de volta às *OnBoard Units*. Ao todo são 16 fábricas que produzem OBUs compatíveis com os *ITS spots*, sendo algumas delas a Audi, a Toyota, a Nissan e a Mercedes Benz. Segundo o MLIT (2011), esperava-se um total de 10 milhões de OBUs vendidas de 2011 a 2016.

São muitas as possibilidades de aplicação para essas tecnologias, mas destacam-se 3 serviços básicos fornecidos pelo *ITS Spot Services*, são eles o Rota Dinâmica, Segurança em Intersecções e o ETC. A Figura 8 é um exemplo de mapa com os dados de velocidade processados na tecnologia de Rota Dinâmica.

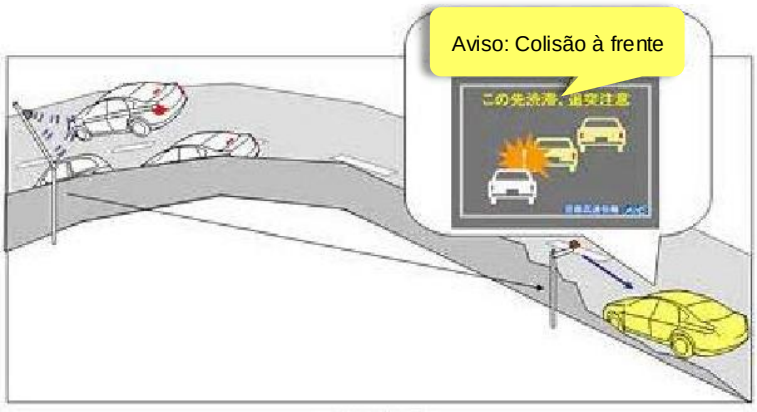
Figura 8 – Dados de velocidade processados



Fonte: MLIT (2012)

Segurança em Intersecções é um serviço que visa orientar o motorista de forma a garantir uma maior segurança na condução. Ele se utiliza dos diversos *ITS spots* para avisar sobre a existência de congestionamentos a frente, objetos na via, condições climáticas que possam afetar a dirigibilidade, entre outros. Apenas para ilustrar a importância desses sistemas, dados mostram uma redução de 60% dos acidentes desde o início do uso em uma curva chamada Sangubashi (MLIT, 2011).

Figura 9 – Exemplo de aviso do Assisting Safety Driving



Fonte: *International Survey of Best Practices in CV and AV Technologies* (2014)

Essas tecnologias podem ser utilizadas de diversas outras maneiras, como para prever quais vias continuam em operação em caso de terremotos, facilitando as medidas de emergência, como transporte de suplementos, por exemplo. Podem ser utilizadas para facilitar o monitoramento de veículos transportando mercadorias ou até para pedir comida em um *drive-through*, sendo o pedido e o pagamento realizados pelo sistema do carro e ocorrendo apenas a retirada no local, mas a utilização de destaque é o de controle adaptativo da velocidade de cruzeiro (ACC), que atua ativamente na condução do veículo.

Além dessa promissora tecnologia, um sistema de frenagem prévia para evitar acidentes e um sistema de assistência para se manter na faixa já se encontram implementados no Japão. Os próximos passos previstos são o desenvolvimento de tecnologias que auxiliem na condução do veículo lateralmente, e em conjunto com o ACC, auxílio longitudinal, a expectativa é que seja criado um “piloto automático inteligente” no início da próxima década.

Para o desenvolvimento dessas novas tecnologias o Japão conta com 4 ministérios envolvidos, o MLIT, a *National Police Agency* (NAP), o *Ministry of International Affairs and Communication* (MIC) e o *Ministry of Economy, Trade and Industry* (METI), um comitê de padronização, *o ITS Standardization Comittee*, e ainda a organização *ITS Japan*, responsável pelo incentivo nas indústrias e na academia, reunindo pessoas com alto conhecimento sobre o assunto e permitindo a troca de informações.

Além da estrutura organizacional responsável pela promoção do ITS, as novas tecnologias encontram-se divididas entre áreas de desenvolvimento. A Tabela 3

mostra essas áreas e alguns exemplos das tecnologias que já foram desenvolvidas ou encontram-se em desenvolvimento.

Tabela 3 – Algumas tecnologias presentes no *System Architecture* do *ITS Spot Services*

Área de Desenvolvimento	Serviço específico destinado ao usuário
Avanços em sistemas de navegação	Informa sobre as condições meteorológicas nas áreas de serviço
	Fornecimento de informações sobre a melhor rota
	Guia ao longo da rota escolhida
	Fornece informações sobre a disponibilidade de vagas em estacionamentos e as reserva
Coleta eletrônica de taxas	Coleta eletrônica de pedágio
	Coleta eletrônica de taxas relativas ao estacionamento de veículos
Auxílio para uma direção segura	Fornece informações sobre as condições da superfície da rodovia
	Aviso de perigo e assistência ao motorista devido a veículos à frente ou atrás
	Informações sobre veículos ultrapassando em outras faixas
	Fornece informações em cruzamentos com a linha de trem
	Aviso de perigo devido a mudança de faixas
	Aviso caso o veículo saia da pista
	Aviso de perigo e assistência ao motorista em cruzamentos
	Aviso de perigo e assistência ao motorista devido ao alinhamento da rodovia
	Auxilia o motorista a manter a distância em relação ao veículo da frente e a manter a velocidade especificada
	Ajuda a parar os veículos durante paradas de emergência
	Auxilia o motorista a mudar de faixa
	Assume uma velocidade de cruzeiro mais baixa caso se verifique a incidência de neve
Otimização da gestão de tráfego	Auxilia no planejamento da gestão de tráfego
	Controla o tráfego para manter as condições do meio ambiente ao longo da rodovia
	Melhora a gestão dos veículos de polícia e auxilia nas ações policiais
	Melhora as condições de condução após os procedimentos devido a um acidente
	Controle de faixa reversível
	Gere o tráfego em condições adversas, quando desastres correm e devido às más condições meteorológicas

/continua

/continuação

Aumento da eficiência na gestão de rodovias	Fornece informações sobre a manutenção da rodovia
	Auxilia na coleta de dados quando desastres concorrem
	Monitora a operação de veículos sobrecarregados
Aumento da eficiência na operação de veículos comerciais	Fornece informações sobre a operação de veículos comerciais
Suporte ao pedestre	Aviso aos pedestres sobre veículos se aproximando e restringe a velocidade dos veículos devido a presença de pedestres
Suporte para a operação de veículos de emergência	Notifica sobre desastres e acidentes
	Controla a sinalização de trânsito para dar prioridade aos veículos de emergência
	Informa os veículos sobre a aproximação de um veículo de emergência

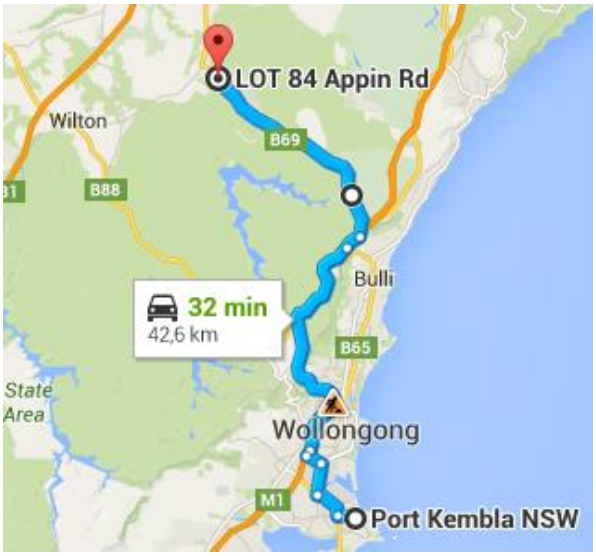
Fonte: MLIT (2011)

O Japão ainda conta com alianças com os Estados Unidos e com a União Europeia. Na aliança com os EUA, se encontram em desenvolvimento estudos sobre ferramentas de acesso e métodos e dados obtidos, enquanto na aliança com a Europa há troca de informações sobre as iniciativas de ITS, com demonstrações do ITS spots e Workshops entre os setores públicos e privados envolvidos.

3.4 *Cooperative Intelligent Transport System Initiative - CITI Project*

O Projeto CITI é um dos principais sistemas cooperativos inteligentes que será testado nas rodovias australianas. Começando a ser implantado no segundo semestre de 2014, seu objetivo é transformar 42 quilômetros de uma rodovia, usada principalmente para transporte de cargas, em um corredor ITS. Conforme ilustrado na Figura 10, a rota interliga a região do Porto de Kembla, sul de Wollongong, até a intersecção com a rodovia Hume Highway-Picton, no Estado de New South Wales (Sydney).

Figura 10 – Trecho do corredor na Austrália



Fonte: Google Maps (2015)

O principal diferencial apresentado por esta iniciativa consiste no fato de que ela é focada na comunicação entre infraestrutura e veículos pesados. Utilizando-se da tecnologia DSRC, o projeto é um dos poucos ao redor do mundo que realiza testes com esse tipo de veículo diretamente na rodovia, com condições reais. Ele foi motivado pelo crescimento do porto de Kembla, um dos maiores portos do país, e, consequentemente, pela grande frota de caminhões que transita por esta rodovia. Os veículos pesados estiveram envolvidos em 69% das mortes em acidentes rodoviários neste trecho em um período de três anos, até Setembro de 2011. Nesse mesmo período, estes acidentes acarretaram um custo estimado para a comunidade que excedeu 45,5 milhões de dólares (*Transport for New South Wales*, 2012).

De acordo com a chefe do escritório executivo do *Intelligent Transportation System Australia*, Susan Harri:

> A segurança e a produtividade da indústria de rodovias para transporte de cargas da Austrália são críticas para a competividade internacional e padrão de vida da nação. C-ITS são os maiores próximos passos em direção à melhoria da performance do nosso sistema de transporte em relação à segurança, meio ambiente e economia. (ITS AUSTRALIA, 2013, tradução nossa).

Além disso, a rodovia do projeto é viabiliza o transporte de imensa quantidade de minérios. É de suma importância que a segurança neste trecho rodoviário possa ser melhorada, evitando bloqueios de pistas, devido à redução de possíveis tombamentos de cargas de caminhões com tais componentes. Esse fato foi ressaltado pelo seguinte trecho do *Journal of Integrated Coastal Zone Management*, evidenciando a importância do Porto de Kembla para a Austrália:

> No Porto de Kembla [...] ocorrem altos valores de Cr, Cu e Zn. Este porto é considerado o nono maior porto do país com a média de 25 milhões de toneladas de cargas movidas anualmente, com fluxo de aproximadamente de 1300 embarcações. (ZHIJIA et al., 2001).

Notada a necessidade de melhoria do sistema rodoviário e o progresso de tecnologias ITS, foi desenvolvido o Projeto CITI no ano de 2013, pelo Governo Federal da Austrália, *Transport for New South Wales* e NICTA (*National Information Communications Technology Australia*). A gestão do projeto é realizada por um departamento específico da *Transport for NSW*, o Centro de Segurança da Rodovia. As operações do dia-a-dia são responsabilidade do setor de Tecnologia de Segurança da Rodovia. Uma pesquisa foi conduzida pela NICTA para estabelecer quais as principais empresas que visitam o porto com frequência. Como resultado, essas empresas foram contatadas para se questionar se haveria interesse em participar do projeto CITI e significativo número respondeu positivamente, incluindo grandes companhias como *Toll Holdings*, *Scotts* e *Ceva Logistics*. Além dessa relação, também se estabeleceu harmoniosa relação com os gestores do porto Kembla, para se melhorar o acesso nas remediações do porto.

A primeira fase do projeto propõe a inserção de dispositivos de comunicação (rádio com computador, GPS, antenas, tela de exibição) dentro dos veículos que realizam o trajeto da rodovia regularmente. O número de veículos equipados é

aproximadamente 60 e a tecnologia utilizada é do tipo DSRC. Simultaneamente, pontos estratégicos na rodovia recebem equipamentos para comunicação utilizando se tecnologia DSRC com os veículos de teste.

As fases seguintes da iniciativa ainda não estão exatamente definidas, no entanto, é sabido que o projeto tem grandes visões para o futuro do ITS, querendo introduzir outras aplicações e podendo possivelmente expandir o trecho. A princípio, está confirmada a expansão da frota equipada no ano de 2016, com incremento de 120 veículos pesados e extensão das tecnologias para ônibus e veículos leves que se deslocam regularmente no trecho sul da rota.

As principais funcionalidades do sistema inicial são:

- Mensagens cooperativas: Alerta de velocidade reduzida para ônibus e caminhões de 40km/h em uma determinada seção da estrada (*Mount Ousley Road*), visto que em seguida há uma descida com inclinação de 12%;
- Alerta quanto às condições meteorológicas;
- Segurança em intersecções;
- Aviso de freada brusca à frente – comunicação V2V;
- Sistema de aviso de colisão – comunicação V2V.

Todas as aplicações mencionadas acima são desenvolvidas com comunicação do tipo V2I. Há apenas duas delas que são caracterizadas por utilizarem uma comunicação do tipo V2V, pois representam a transmissão de informações entre eles para que seja possível se emitir um aviso com o objetivo de se evitar uma calculada colisão.

Para o desenvolvimento e implantação desse corredor, o projeto recebeu um financiamento de 1,4 milhões de dólares, sendo 33% deste valor proveniente do programa de Segurança de Rodovia do governo de NSW e 50 % proveniente do programa federal de Produtividade e Segurança de Veículos Pesados. Uma contribuição da NICTA de cerca de 250 mil dólares foi fornecida ao projeto, representando os restantes 17% do valor total.

Adicionalmente, o Programa de Produtividade e Segurança de Veículos Pesados, que financia o Projeto CITI, também financia o Projeto de Área de Descanso Conectado, que interage ao corredor CITI, de forma a fornecer mensagens aos

motoristas nessa rodovia para que eles possam parar e descansar em segurança, sem comprometer o transporte de cargas.

A iniciativa *Cooperative Intelligent Transport System Initiative* (CITI) possui imenso potencial de melhorar significativamente a segurança rodoviária, reduzir a emissão de poluentes e melhorar a eficiência da rede. O aperfeiçoamento da qualidade e a confiabilidade das informações que são trocadas na rodovia, entre veículos e entre veículos e infraestrutura, podem ter consequências muito mais amplas do que apenas no trecho rodoviário equipado. Essa questão impulsiona cada vez mais essa e outras iniciativas no mundo.

Em relação à segurança, Wall e Tyler (2014) fazem a seguinte análise estatística sobre os números de acidentes em estradas australianas e a potencial redução neste número, caso seja implantada a tecnologia DSCR:

> Austroads conduziu um estudo acerca do potencial benefício da comunicação V2V por DSRC na segurança rodoviária, em Setembro de 2011. O relatório concluiu que o total de aproximadamente 29.000 causalidades sérias anuais poderiam ser reduzidas para um valor entre 18.500 e 21.500; uma redução de 25-35% (Austroads [11]2012). Uma casualidade séria inclui usuários da rodovia que falecem ou se ferem gravemente em razão de acidentes de trânsito. (WALL; TYLER, 2014, p. 2, tradução nossa).

Uma das tecnologias mencionadas neste projeto é a de alerta de sinal vermelho à frente para fornecer tempo hábil para veículos pesados pararem, incluída na aplicação de “Segurança em intersecções”. Essa mensagem consiste no tipo de informação que é classificada como SPAT – *Signal phase and timing*. Tal aplicação é utilizada em outras iniciativas, como no projeto europeu *Cooperative ITS Corridor - Joint Deployment*. De acordo com relatório da Comissão Nacional de Transporte da Austrália, de 2011, a informação do tipo SPAT, enviada pelos sinais de trânsito para os veículos, pode prover uma economia de consumo de combustível de aproximadamente 15% bem como benefícios associados em termos de emissões de gases de efeito estufa.

Uma referência interessante utilizada pela equipe do projeto CITI é resultado de um estudo da Universidade de Columbia, dos pesquisadores Tientrakool, Ya-Chi e Maxemchuk (2011). Conforme este relatório, é possível mensurar o aumento da capacidade de uma via que utiliza a tecnologia DSRC. O aumento na capacidade da

[11] *Austroads* é a associação de agências de transporte rodoviário e de trânsito Australásia.

via é uma função matemática da porcentagem de veículos que utilizam DSRC. Quando todos os veículos utilizam a tecnologia com a comunicação V2V o aumento de capacidade da via é de 43%. Se a utilização passar a ser entre todos sensores e via (V2I) o aumento de eficiência será de 243%.

Em relação à contribuição com o projeto por parte do Porto de Kembla não foi encontrada nenhuma literatura de referência. Sabe-se que a implantação da tecnologia agilizará atividades comerciais de acessos chegando ou partindo do Porto.

4 TENDÊNCIAS E PROPOSTA DE ANTEVISÃO DE CENÁRIO FUTURO

4.1 Identificação de Tendências

O desenvolvimento de tecnologias para Sistemas Inteligentes de Transportes recebe diversos incentivos, em mais países até do que os já mencionados no presente trabalho, tendo em visto tantos benefícios alcançáveis. A importância e trajetória do tema são claramente relevantes. A partir da análise das iniciativas foi possível contextualizar as posições atuais de pesquisa e identificar a tendência e o possível caminhamento dos projetos.

A Tabela 4 representa uma síntese dos principais empreendimentos abordados. Cada projeto aborda uma área de ITS da melhor maneira para a região, não havendo uma total integração e padronização de tecnologias. O quadro abaixo correlaciona as principais aplicações de cada projeto, de acordo com sua função.

Tabela 4 – Quadro-resumo das aplicações de cada iniciativa

Aplicação	Europa	EUA	Japão	Austrália
Sistema de alerta de cansaço		X		
Adaptação inteligente de velocidade		X	X	
Sinalização de velocidade limite variável	X	X		
Visão noturna melhorada		X		
Proteção para pedestres e ciclistas em cruzamento		X		
Sistema de aviso de colisão	X	X	X	X
Aviso de desvio em relação à faixa ou à rodovia		X		
Sinais de velocidade aconselhável para caminhões		X		X
Alertas quanto às condições meteorológicas	X	X	X	X
Controle adaptativo da velocidade de cruzeiro		X	X	
Sistema de assistência em caso de acidente	X	X		
Electronic Toll Collection (ETC)			X	
Mensagens cooperativas	X	X	X	X
Segurança em interseções	X			X
In-Vehicle Information	X		X	
Avisos sobre eventos na pista	X		X	X
Rota dinâmica			X	
Comunicação DSRC	X	X	X	X

Após a análise das iniciativas no mundo, foi possível constatar que a principal forma de comunicação usada entre veículos e infraestrutura e entre veículos é o DSRC com frequência de 5,9 GHz (5,8 GHz apenas no caso do Japão). Isso se dá pelo fato dessa tecnologia apresentar uma adequada troca de informações em movimento, apesar de seu alcance ser curto, e apresentar flexibilidade, funcionando nos dois sentidos – da infraestrutura para o veículo e do veículo para infraestrutura.

Outro fato notado foi que, apesar de a iniciativa no Japão dar uma perspectiva um pouco mais ampla em relação às tendências e estar em um estágio mais avançado – visto as tecnologias em desenvolvimento e o objetivo de se desenvolver um veículo autônomo –, todos as iniciativas visavam os mesmos três objetivos.

O primeiro deles era a melhora da segurança no transporte rodoviário, caracterizada pela redução do número de acidentes e do número de mortes em rodovias. Estudos conduzidos pelo USDOT (Estados Unidos) apontam que entre 70% a 80% dos acidentes podem ser evitados através da utilização de tecnologias V2V, com uma economia para o país de 870 bilhões de dólares, cerca de 5% do PIB do país (WASHINGTON POST, 2014). Já estimativas da *Austroads* apontam para uma redução no número de acidentes entre 25% e 35% (*Austroads*, 2010), enquanto no Japão, há dados quanto à redução de 60% dos acidentes em uma curva famosa chamada *Sangubashi* (MLIT, 2011).

O que se percebe é que os números apresentados pelos estudos divergem muito, já que os dados apresentados são referentes apenas a locais específicos, não permitindo a extrapolação para casos gerais. Ainda assim, fica claro que o ITS pode proporcionar uma expressiva redução no número de acidentes, o que resultaria em uma economia considerável para os países, mesmo que ainda não seja possível estabelecer um valor percentual esperado para essa redução.

Outro objetivo em comum é a melhora nas condições de tráfego com a redução dos congestionamentos. Estudos conduzidos pela *Austroads* (Austrália) apontam para uma melhora da capacidade da via de 43% com a utilização de tecnologias V2V e de 243% com utilização de tecnologias V2I (TIENTRAKOOL; YA-CHI; MAXEMCHUK, 2011). Dados do programa ETC (programa de cobranças automáticas de taxas), no Japão, mostram uma redução de cerca de 30% de todo o congestionamento em rodovias com a inserção desta tecnologia. Novamente, é difícil estabelecer uma tendência de valores da redução, especialmente porque o grau de benefício esperado

depende muito da tecnologia aplicada, mas fica claro que ela ocorrerá e será significativa, representando um grande benefício econômico e social.

O último objetivo comum aos projetos estudados é a sustentabilidade, através da eficiência energética e da redução de emissão de CO_2 ao ambiente – gás responsável pelo efeito estufa. Com acelerações e frenagens mais suaves e com a redução de congestionamentos espera-se um grande benefício nessa área. Dados do Japão indicam uma redução de 2,4 milhões de toneladas na emissão de CO_2 devido ao sistema VICS (sistema que auxilia na seleção da melhor rota) [MLIT, 2011].

Uma forte percepção sobre o sistema de transporte inteligente, atualmente em fase de implantação, é em relação à importância da captação e do correto uso das informações geradas no tráfego. A comunicação entre veículo e infraestrutura possibilita uma formação de um banco de dados e essas informações têm poderosas utilidades.

Uma das aplicações, que pode muitas vezes ser esquecida por parecer trivial, é destinar as informações obtidas para o gerenciamento ativo do tráfego. Por exemplo, as informações das condições de velocidade na via em determinado momento podem propor alterações da velocidade máxima estabelecida, para menos se o fluxo for intenso e para mais se o fluxo estiver tranquilo.

Outra aplicação pode ser o uso da faixa de acostamento em casos de grandes congestionamentos, aliviando o trânsito e homogeneizando o fluxo. As condições das rodovias são, assim, monitoradas constantemente e podem ser modeladas, de maneira que se pode melhor orientar o comportamento dos veículos. A operação da rodovia pode, enfim, ser melhorada, aumentando a qualidade e eficiência da via.

Além disso, é possível o oferecimento de serviços de alerta no sistema rodoviário, como obstruções na pista, alerta de intersecções, pista molhada ou com gelo, veículo lento à frente, entre outros. Esses serviços são preliminares e são enxergados como estágio inicial do desenvolvimento de sistemas inteligentes de transporte.

Essas tecnologias de comunicação e compartilhamento de informação estão sendo desenvolvidas e são desejadas por inúmeros países. Além das funcionalidades mencionadas ao longo do trabalho, é perceptível o desenvolvimento de outros tipos de tecnologia. É o caso da elaboração do serviço de controle adaptativo de velocidade de cruzeiro, que inicia os estudos para a criação de um veículo autônomo.

Tal serviço já existe em alguns carros, de forma que o motorista consegue fixar uma velocidade e deixar de acelerar enquanto o carro realiza o controle e atinge a velocidade desejada. No entanto, o foco aqui é um sistema com informações fornecidas da infraestrutura, que associado ao desenvolvimento de sensores, câmeras e softwares é capaz de identificar sozinho a distância ótima, a velocidade adequada e impor automaticamente a melhor situação ao veículo, sem comando do motorista. Esses sensores e câmeras são responsáveis pela assistência da direção do veículo, evitando que o automóvel saia da pista e atinja objetos ou pedestres.

A empresa *Tesla* estima a produção de veículos autônomos para o mercado a partir de 2016. No ano de 2015, a empresa mostrou seu progresso na área e lançou o "Modelo S" que possui o recurso *Autopilot*[12].

No entanto, a tecnologia ainda está em processo de desenvolvimento e é clara a extensão do caminho a ser percorrida, vista a necessidade de supervisão humana. No caso do recurso lançado pela *Tesla*, há relatos de que durante uma viagem de aproximadamente 350 quilômetros em rodovias, foi necessário que o condutor interviesse mais de uma dúzia de vezes (FOLHA DE SÃO PAULO, 2016).

A *Ford Motor Co.* acredita que o lançamento desta tecnologia na maioria dos veículos ocorrerá no ano de 2019. Google e seu time de fornecedores estão acelerando esforços para lançar carros autônomos até 2020. *ABI*[13] prevê uma realidade de inserção da tecnologia no mercado para o ano de 2020. Outras empresas – como Nissan, Volvo, BMW, Mercedes-Benz, Volkswagen, Toyota, Lexus – estão nessa corrida tecnológica.

Os modelos em desenvolvimento visam o estabelecimento de veículos autônomos nos sistemas rodoviários. Esse fato é parte do cenário futuro ao qual os sistemas inteligentes de transporte se direcionam. De acordo com Anthony Foxx, ministro dos Transportes dos Estados Unidos:

> Veículos autônomos abrem possibilidades para salvar vidas, economizar tempo e combustível. […] Nós sabemos que 83% dos acidentes de carro são devido a erros humanos. O que aconteceria se o erro pudesse ser eliminado? Essa é uma possibilidade poderosa e digna de se perseguir. (*Roads and Bridges*, 2016, tradução nossa)

[12] Autopilot corresponde a aplicação de um piloto automático no veículo, caracterizando a condução sem necessidade de intervenção humana.
[13] *ABI*: Allied Business Intelligence é uma instituição de pesquisa na área de inovação.

Com essa visão, os EUA propuseram um plano de investimentos totalizando US$ 4 bilhões no período de 10 anos (2016-2026), para acelerar o desenvolvimento de veículos autônomos. Os modelos lançados até o presente, com tecnologia que permite o condutor de afastar as mãos do volante enquanto o sistema do veículo o guia com assistência de sensores e câmera, são avanços importantes.

No entanto, a necessidade de intervenção humana ainda é considerada um obstáculo, pois a transferência de controle é uma questão delicada e cuja melhor solução ainda não foi encontrada. Entre setembro de 2014 e novembro de 2015, em testes do Google, os engenheiros assumiram o controle do veículo autônomo 341 vezes, nas 423.000 milhas percorridas (680.753 km). Essas intervenções foram necessárias por dois motivos: instabilidade do sistema (falhas no sistema ou comunicação) ou decisões do sistema (quando o veículo autônomo toma uma má decisão) (FOLHA DE SÃO PAULO, 2016).

O intervalo de tempo entre o alerta do sistema e a tomada de controle do veículo pelo condutor foi de um segundo, de acordo com relatório de testes do Google. No entanto, em um teste da Volkswagen, foi reportado um caso em que a pessoa precisou de mais de 12 minutos para retomar o controle de um dos veículos de testes. Esse resultado expõe a dificuldade de se encontrar uma maneira eficiente de alertar o motorista distraído em caso de emergência (FOLHA DE SÃO PAULO, 2016).

O perigo estaria em se criar mais riscos conforme os seres humanos são induzidos a dedicar menos atenção ao volante e à condução do veículo. Visto que a intervenção humana tornaria o sistema menos seguro, as empresas ressaltam o esboço do cenário futuro, composto de veículos completamente autônomos, sem volantes ou pedais, sendo conduzidos apenas pelos seus próprios sistemas, auxiliados pela infraestrutura.

Uma questão muito delicada a respeito da operação de um carro autônomo relaciona-se à base de dados do seu sistema operacional. O ponto aqui ressaltado é o fato de que o sistema exige um posicionamento exato do veículo, dependendo do referencial fixo da infraestrutura, para a operação do sistema *Cruise*[14]. Para tanto,

[14] *Cruise*: Sistema no qual o veículo é determinado para realizar um roteiro e é capaz de se conduzir sozinho ao longo da via. É necessário que o sistema do veículo tenha acesso à base de dados de rodovias atualizada e, principalmente, que o veículo tenha seu posicionamento geográfico exato, para se começar o traçado da rota.

pode-se imaginar que esse dado pode ser obtido pelo contato do veículo com o ponto de comunicação mais próximo com a infraestrutura.

Esta base de dados tem formação possível apenas devido ao *Probe Vehicle Data*, devidamente processado pelos centros de gerenciamento, de forma a fornecer melhores alternativas aos veículos. Sendo assim, toca-se em um ponto relevante: a dependência do carro autônomo e dos sistemas ITS em relação à infraestrutura, extremamente necessária para um melhor funcionamento dos sistemas.

Outro assunto que deve ser abordado é a compatibilização, tanto de equipamentos, sistemas e softwares, quanto de responsabilidades das partes envolvidas. Como já mencionado, a tendência para o desenvolvimento de sistemas inteligentes de transporte é de associações, ou seja, de integração e cooperação em relação a conhecimentos e recursos financeiros.

Com a análise de alguns empreendimentos ao redor do mundo, é possível notar a criação de associações de empresas, universidades e departamentos governamentais para promover maiores êxitos nos projetos. São casos de parceiras público-privadas, com presença do governo, indústria e academia.

É fundamental atentar aos fatos de que essas associações delimitam nos mínimos detalhes as responsabilidades das partes envolvidas no projeto – através de documentos de registro como *Memorandum of Understandig*[15] e *Letter of Intention* – e, principalmente, estabelecem uma série de regras e normas. Isso para que as informações sejam, dentro das associações, transmitidas e recebidas com total compreensão do conteúdo, garantindo o bom funcionamento da associações e, consequentemente, o bom desenvolvimento dos projetos.

Atualmente, todas as partes envolvidas nos projetos do tema seguem regras e normas estabelecidas pelos órgãos supremos da região em questão. Por exemplo, o corredor Roterdã-Viena segue as regras de comunicação do sistema ITS G5, estabelecidas por *ETSI*[16].

Além disso, a necessidade de compatibilização, dentro do sistema de transporte, também deve ser relacionada aos equipamentos utilizados no sistema. A escolha dos dispositivos deve ser adequada ao sistema em questão e compatível com os objetivos estabelecidos. Ainda, deve se atentar ao fato de que os sistemas e

[15] *Memorandum of Understanding:* descrição de um acordo bilateral ou multilateral
[16] *ETSI: European Telecommunications Standards Institute* é o instituto europeu de padronização de telecomunicações

dispositivos devem coexistir, ou seja, é necessário considerar as operações simultâneas.

Tendo em vista as aplicações e tecnologias desenvolvidas – e em desenvolvimento – em cada iniciativa, é possível enxergar um trajeto futuro do desenvolvimento das tecnologias e, portanto, dos sistemas de transporte. É possível se imaginar um Sistema de Inteligente de Transportes completamente integrado – com comunicação nos dois sentidos V2I e I2V –, composto pelas tecnologias apresentadas para melhorar e aumentar a coleta de dados. Estas informações serão analisadas de forma mais rápida e eficiente, e através da rede estabelecida, será possível realizar – manualmente ou roboticamente – decisões ágeis e eficazes. De maneira otimista, o futuro imaginado é aquele que reúne o máximo de tecnologias inovadoras, para veículos e infraestrutura, a um longo prazo.

No entanto, é muito difícil se gerar e implementar um sistema ITS, sendo um processo de evolução gradual, dependendo do nível de maturidade dos modelos de governança e de gestão de transporte de cada cidade. Para auxiliar no desenho de sistemas, a IBM[17] desenvolveu um guia: "*Delivering Intelligent Transport Systems: Driving integration and innovation".* Este documento consiste no modelo "*Intelligent Transport Maturity Model"*, que permite situar uma cidade em um determinado nível de maturidade (Nível 1 a 5).

De forma lógica, o desenvolvimento de um sistema ITS deve ser baseado no que a cidade tem capacidade de implementar e gerenciar. Para cada cidade há uma maneira mais adequada de se desenvolver, de se traçar a arquitetura do sistema e escolher as respectivas tecnologias. Sendo assim, ficam claras a diversidade de sistemas e a adequação de cada um para a respectiva região.

[17] IBM: *International Business Machines* é uma empresa americana voltada para a área de informática, com um departamento de Sistemas Inteligentes de Transporte

4.2. Proposta de Antevisão de Cenário Futuro

Apesar dos obstáculos das iniciativas atuais dos Sistemas Inteligentes de Transportes, pode-se tentar antever um cenário para um prazo de 50 anos. Neste cenário à frente no tempo, todas as aplicações mencionadas e os tipos de informações transmitidos objetivam de forma conjunta a máxima eficiência da via, de forma que os veículos trafeguem da maneira mais segura possível – com auxílio da infraestrutura – e autônoma, restringindo ao máximo a necessidade de intervenção humana. As aplicações desenvolvidas ou em desenvolvimento, apresentadas na Tabela 4, farão parte do sistema para garantir a condução autônoma dos veículos.

Dessa forma, o sistema será composto de veículos autônomos equipados com computadores de bordo – *On Board Units* – que permitirão a comunicação nos dois sentidos, sensores ao redor do veículo (de longo alcance cobrem cerca de 250 metros e de curto alcance cobrem cerca de 70 metros) para detecção de outros veículos e objetos ao redor, sensores de infravermelho para detecção noturna e de objetos mais distantes. Os veículos também possuirão uma câmera frontal e uma traseira, radares e outros sensores (laser) que possibilitarão um entendimento muito mais detalhado de seus entornos do que o obtido por humanos.

A infraestrutura será constituída de torres de rádio 5,9 GHz – *Road Side Units* – em intervalos de 800 a 1000 metros, visto que o alcance desta tecnologia não é alto. A comunicação será estabelecida entre veículos e entre veículos e infraestrutura através da tecnologia DSRC, alternativamente 5G com aparelhos móveis.

Além do sistema de comunicação, a infraestrutura contará com o sistema de monitoramento, formado por câmeras de segurança ao longo de toda a extensão da rodovia, que poderão girar 360 graus e terão alcance aproximado de 5 quilômetros. Outros dispositivos espalhados pela rodovia serão os sensores infravermelhos, que podem reconhecer objetos na rodovia, com alcance máximo de 500 metros. Para organização da operação do sistema como um todo, será necessária a ação de uma central de operação da infraestrutura, que receberá todas as informações da rodovia e terá capacidade de processá-las e destiná-las com adequação. Essa central de atuará como um centro de controle da operação (CCO). A ideia é que o avanço nesta área promova uma maior automação desse centro, de forma que as informações sejam processadas de forma inteligente.

Para a melhor operação do sistema, supõe-se que o monitoramento da central será automático, de forma que não serão necessários funcionários assistindo imagens das câmeras 24 horas por dia para coletar informações. No entanto, as tarefas de alto escalão de gerenciamento, relacionadas a decisões de operação, deverão sim ser controladas por pessoas, para assegurar o funcionamento, credibilidade e, mais à frente abordada, a segurança do sistema.

Acredita-se que a central de infraestrutura interligará toda a rede, maximizando a eficiência da via, embora ela não seja responsável pela condução de cada veículo. Em outras palavras, a central organizará e irá manipular o tráfego, de maneira que será apresentada à frente. Ela apoiará os veículos na tomada de decisão apenas com informações, os sistemas veiculares processarão as informações recebidas e os computadores de bordo conduzirão os veículos de forma autônoma.

Por exemplo, no caso de condições meteorológicas adversas, como chuva forte, serem detectadas em determinado ponto por sensores da rodovia, a informação é processada pela central, que decide um intervalo de posições da rodovia nos quais os presentes veículos receberão informações em relação ao evento. Assim, o respectivo computador de bordo receberá as informações e, juntamente com suas informações da sua base de dados e de carros próximos, o sistema do carro tomará uma decisão (de mudar de faixa, mudar de rota ou continuar com trajeto e apenas diminuir velocidade). Essa tomada decisão deve depender da distância entre o veículo e o evento na via.

Por outro lado, o sistema do veículo também poderá operar de forma pura, sem o processamento de dados da infraestrutura. Por exemplo, ele pode dispor de um sistema de frenagem diretamente conectado ao computador de bordo, que identificando um perigo à frente ou recebendo uma informação de perigo proveniente de um veículo próximo, pode automaticamente acionar os freios, em um espaço de tempo muito curto.

Outro exemplo da autonomia do veículo que pode ser destacado é a identificação de faixas, realizada através de sensores infravermelho. O computador de bordo reconhece as limitações da faixa em que o veículo se encontra, guiando este de maneira a permanecer nela ou fornecendo assistência para o automóvel trocar de faixa (juntamente aos outros sensores e câmeras estudando a área que o cerca).

Ainda, uma possível situação seria uma interferência na pista, como um animal ou pessoa, por exemplo, os sensores do veículo podem detectá-la dentro do seu

intervalo de alcance e, processada essa informação, reagir com duas ações simultâneas. A primeira seria de frear, sem a autorização do condutor, e a outra seria de transmitir a informação do evento, localização, atitude do veículo – desaceleração – para outros veículos e para a infraestrutura. Dessa maneira, os veículos próximos receberiam a mensagem e seus computadores calculariam a significância ou não para tomada de atitude, e qual atitude tomar.

Após esse processo, a infraestrutura poderia, então, processar os dados e repassar as condições atuais para outros veículos nessa rota, que estão se aproximando do evento, com a possibilidade do sistema de outros veículos desacelerarem imediatamente ou apenas no momento e de forma mais adequadas, calculados pelo computador de bordo.

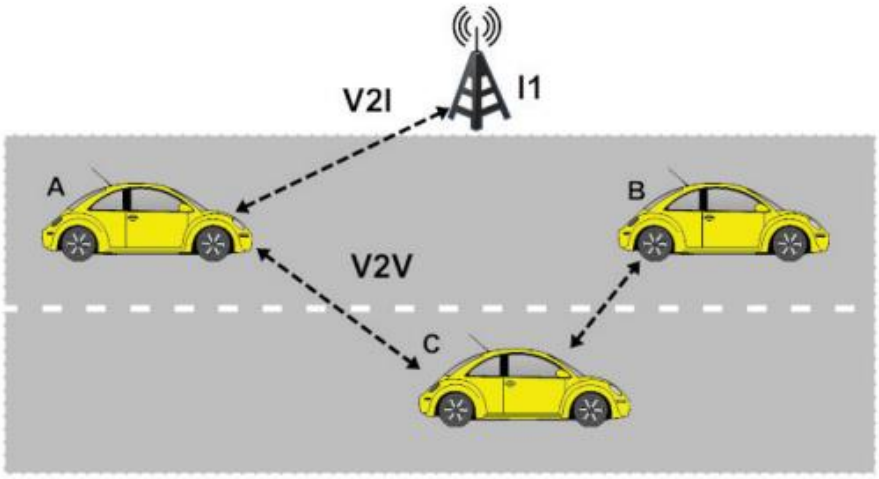
Analisando por outro lado, o evento também pode ser detectado pela infraestrutura, pelas suas câmeras ou sensores. Um animal ou uma pessoa devem poder ser detectados até mesmo antes de estar de fato na pista, como uma forma de manter o tráfego seguro. As câmeras podem fazer a identificação do objeto e os sensores infravermelhos ou até mesmo câmeras avançadas (utilizadas para identificação de placas e categoria de veículos) podem identificar qual o objeto presente – inanimado, como uma caixa de papelão, ou animado.

Dessa maneira, a infraestrutura processaria a informação detectada primeiramente e, em um intervalo de tempo determinado que seria afetado pelo evento, as informações seriam transmitidas diretamente para que os computadores de bordo recebam as informações exatas e tomem a devida atitude. Alternativamente, a central da infraestrutura também poderia manipular o tráfego, variando o limite de velocidade permitido na rodovia, para garantir a segurança do sistema.

A comunicação entre veículos e infraestrutura, como já mencionado, é estabelecida através da tecnologia DSRC, porém essa rede de comunicação tem duas possibilidades de desenvolvimento. A primeira seria uma rede completamente integrada, em que todos os veículos – limitados apenas ao alcance de seus dispositivos – podem receber e enviar informações para a infraestrutura e também entre si. A outra alternativa seria uma rede limitada, em que os veículos que passam na pista mais externa da rodovia, passam mais perto das torres de rádio e, portanto, recebem e enviam informações para a infraestrutura e posteriormente transmitem dados para os veículos da próxima faixa, que transmitem para aqueles da próxima

faixa e assim por diante. Ou seja, a comunicação é limitada, não ocorrendo diretamente entre os envolvidos, assim como é representado na Figura 11.

Figura 11 – Esquema de comunicaçào em uma rede veicular



Fonte: SBSeg (2014)

Tal tipo de comunicação tem suas vantagens como o baixo consumo de energia e menor potencial computacional necessário – logo maior capacidade de processamento e armazenamento dos dados do sistema. Porém, características específicas do ambiente podem interferir negativamente no desenvolvimento do sistema (Al-Sultan et al. 2014; Hartenstein e Laberteaux 2008; Mejri et al. 2014). Entre elas estão: densidade variável da rede, alta mobilidade comprometendo a conectividade, topologia dinâmica da rede, desconexões frequentes.

Até os dias atuais, a melhor alternativa para este esquema é a adoção da ideia de *Vehicular Adhoc Networks* (VANETs), usando tecnologias baratas das redes sem fio. No entanto, a reserva da faixa de comunicação dedicada de curto alcance (DSRC) representa o avanço da tecnologia da comunicação. A viabilidade da comunicação entre torres de rádio e veículos por DSRC demonstra a trajetória para troca de informações direta entre veículos.

Desde 2004, um grupo de trabalho da IEEE assumiu o papel iniciado pela ASTM e começou o desenvolvimento da emenda ao padrão de rede sem fio 802.11 para incluir as demandas das redes veiculares, conhecida como 802.11p (protocolo da IEEE correspondente a implementação de redes sem fio operando na frequência de 5,9 GHz). Como já mencionado, as aplicações neste tipo de comunicação estão em testes e em alguns casos já sendo implementados em rodovias cujo serviço será liberado brevemente, como por exemplo o caso no Corredor Roterdã-Viena.

Visto o progresso deste tema, para o cenário futuro, a comunicação entre os veículos será regida pela tecnologia de curta distância – DSRC – de forma livre, direta e dissipada entre os veículos equipados, sem a necessidade de veículos intermediários como responsáveis pela propagação de certas informações provindas da infraestrutura, todos os veículos poderão se comunicar com a infraestrutura, constituindo um corredor completamente conectado.

Com essas premissas, foram encontrados em bibliografia os tempos de processamento de acordo com o tipo de informação envolvida na comunicação. A Tabela 5 apresenta uma lista de algumas aplicações, relacionadas ao tipo de comunicação, ao tipo de mensagem, ao tempo da mensagem e latência (tempo de atraso máximo requerido pela aplicação). Ela pôde ser criada de acordo com Papadimitratos (2009).

Tabela 5 – Características de aplicações veiculares

Aplicações	Comunicação	Tipo	Tempo (ms)	Latência (ms)	Outros
Alerta de veículo lento	V2V	Broadcast permanente	500	100	Alcance: 300 m, prioridade alta
Alerta de colisão em cruzamento	V2V, V2I	Broadcast permanente	100	100	Posicionamento preciso em um mapa digital, prioridade alta
Alerta de pré-colisão	V2V	Broadcast periódico	100	50	Alcance 50 m, prioridade média/alta
Assistência em interseção	V2V, V2I	Broadcast periódico	1000	500	Precisão do posicionamento < 5 m
Download de mídia (mapas)	V2I	Broadcast sob demanda	1000	500	Alta dependência da infraestrutura
Assistência para direção ótima	V2V, V2I	Broadcast sob demanda	1000	500	Alta dependência da infraestrutura

A seguir, foi realizada uma correlação entre todas as aplicações levantadas e seus tempos de comunicação estimados, representada na Tabela 6. Essa estimativa foi possível de acordo com os valores encontrados na Tabela 5 e com a informação de que a comunicação DSRC permite a emissão de 10 mensagens por segundo (NHTSA, 2015). Nesta tabela, há aplicações que correspondem ao sistema veicular, sem necessitar da comunicação com outros veículos ou com a infraestrutura.

Tabela 6 – Correlação de iniciativas e tempos de comunicação

Aplicação	Tempo para comunicação (ms)
Sistema de alerta de cansaço	-
Adaptação inteligente de velocidade	-
Sinalização de velocidade limite variável	-
Visão noturna melhorada	-
Proteção para pedestres e ciclistas em cruzamento	-
Sistema de aviso de colisão	100
Aviso de desvio em relação à faixa ou à rodovia	-
Sinais de velocidade aconselhável para caminhões	100
Alertas quanto às condições meteorológicas	100
Controle adaptativo da velocidade de cruzeiro	1000
Sistema de assistência em caso de acidente	100
Electronic Toll Collection (ETC)	100
Mensagens cooperativas	100
Segurança em interseções	1000
In-Vehicle Information	100
Avisos sobre eventos na pista	100
Rota dinâmica	1000

Outro ponto importante que deve ser destacado é a segurança do sistema, ou seja, o sistema deve atender alguns requisitos de segurança interna para não comprometer o devido funcionamento. As principais exigências são de confidencialidade, integridade, autenticidade, disponibilidade e privacidade. A rede pode ter sua operação distorcida quando é atacada, de forma a criar problemas para outros usuários da rede, por exemplo, alterando o conteúdo das mensagens ou invadindo sua privacidade.

Há vários tipos de ameaças: interno ou externo, malicioso ou racional, ativo ou passivo, local ou estendido. Entretanto, o mais importante é estudar as características dos ataques que podem ocorrer, para que se possa ser criada uma arquitetura de segurança robusta. Os ataques podem ser contra: a disponibilidade, a autenticidade e a identificação, a integridade e a confiança dos dados, a confidencialidade e a privacidade.

Dessa forma, há também inúmeras contramedidas para proteger os sistemas. São elas: serviços de segurança (algoritmos de assinaturas digitais usando

criptografia, esquemas de cifragem[18]), serviços de processamento de segurança, serviços de gerenciamento de segurança (gestão de certificados e de provedores), mecanismos criptográficos e gerenciamento de chaves, mecanismos de autenticação e técnicas de anonimato.

4.3. Considerações Finais

Através dos estudos realizados foi possível perceber uma tendência quanto à necessidade de maior eficiência operacional e maior segurança para os usuários. É nesse contexto no qual os veículos ITS vêm sendo desenvolvidos ao redor do mundo. A partir da identificação e compreensão das tecnologias desenvolvidas em países europeus, EUA, Japão e Austrália, foi possível antever o futuro dos Sistemas Inteligentes de Transportes.

A análise detalhada das 4 iniciativas apresentadas permitiu a construção da Tabela 4, na qual é apresentada uma comparação entre as diversas aplicações encontradas em cada caso. Analisando-as, pode-se conjecturar uma infraestrutura composta por torres de rádio, câmeras e sensores, para monitoramento, controle do tráfego e comunicação. Para garantir a eficiência da operação, essa infraestrutura contará também com uma central de controle da operação (CCO) automatizada com alto poder de processamento de informações.

Para ter acesso a todas essas informações os veículos exercerão comunicação V2I/I2V, de forma a acessar essas informações e garantir a eficiência e segurança do tráfego. Além disso, esses veículos também serão fornecedores de dados, possibilitando interações ainda melhores.

É importante citar que as tendências apontam para veículos que utilizem tecnologias V2V, permitindo a comunicação entre os mesmos, e câmeras e sensores, que permitirão a identificação de veículos comuns ou obstáculos na pista, como animais ou pessoas. Outra tendência é que as comunicações, V2I/I2V ou V2V, deverão ser realizadas através de DSRC, conforme apontam todas as iniciativas.

Dessa forma, através da análise de todas essas tecnologias, pode se antever a existência de veículos autônomos completamente conectados que não necessitarão de condução humana, a menos em situações muito excepcionais.

[18] Cifragem é o processo de conversão de um texto claro para um código cifrado

5 ADEQUAÇÃO DO PROJETO RODOVIÁRIO

A evolução dos Sistemas Inteligentes de Transportes promete revolucionar por completo a forma como se realiza o transporte rodoviário nos tempos atuais e deve promover um processo de adequação dos procedimentos adotados para o cálculo ou determinação de parâmetros geométricos rodoviários. O próprio Departamento de Estradas e Rodagem de São Paulo (DER/SP), uma das mais respeitadas instituições voltadas ao estudo e regulamentação do tráfego rodoviário no Brasil, afirma em uma de suas publicações que as tecnologias ITS “têm o potencial de afetar de forma significativa o projeto geométrico de vias rurais e urbanas” (DER/SP, 2006).

Vale lembrar que os parâmetros utilizados no presente se encontram em constante atualização e já refletem uma ampla revisão procedimental que se deu no decorrer do último século. No início do século 20, os veículos de tração animal raramente excediam 13 km/h, de forma que a velocidade e as distâncias de visibilidades não eram consideradas como fatores de projeto importantes, as curvas eram projetadas como concordâncias bruscas entre longas tangentes, enquanto aclives longos e íngremes eram evitados. As principais considerações de projeto eram o comprimento e as características de mobilidade dos veículos, sobretudo nas curvas.

Com a invenção dos automóveis, surgiram os primeiros textos técnicos a tratar dos princípios fundamentais de projeto geométrico de vias de transporte, datados de 1912. Desde então, órgãos regulamentadores foram criados, manuais foram publicados, congressos foram realizados e diversos novos conceitos foram introduzidos ao redor do mundo. Tudo isso de forma sincronizada internacionalmente, com o objetivo de se estabelecer as diretrizes principais de projeto geométrico de vias e, em especial, garantir a segurança dos usuários e a eficiência operacional de tráfego.

Agora, com a tendência de automação completa do tráfego rodoviário, deve-se observar uma nova revolução, mesmo que de menor vulto, em conceitos já difundidos e a introdução de novos conceitos relacionados ao projeto rodoviário, especialmente em relação às características operacionais dos veículos, abordando desde a supressão dos fatores humanos da equação até a maior eficiência operacional dos chamados “veículos inteligentes”.

O projeto de novas rodovias no futuro deve levar em consideração o tipo de operação autônoma que a via deve apresentar, a presença de veículos comuns, a

interação entre veículos autônomos e veículos dirigidos, as dificuldades operacionais proporcionadas por veículos pesados, dentre várias outros fatores. De uma forma geral, antes de elaborar um projeto geométrico é necessário ter clareza sobre as condições operacionais que a via deverá apresentar. Ainda assim, os principais objetivos perseguidos na elaboração do projeto, que são a garantia da segurança dos usuários e a eficiência operacional do tráfego, devem ser mantidos.

Há ainda a possibilidade de uma redução nos custos de implantação, em razão de possíveis reduções nos gastos com movimentação de terra e matéria-prima, com o novo tipo de operação proporcionado. Pode ser que haja também uma redução nos custos com remediação de acidentes rodoviários, caso esses se tornem mais raros. Essas possíveis reduções devem ser balanceadas com os acréscimos nos custos de implantação e manutenção do sistema inteligente.

A subseção a seguir propõe-se a avaliar de que forma o projeto geométrico é concebido atualmente, precedendo um estudo de adequação deste processo que considera o advento das tecnologias e as novas características operacionais que devem surgir.

5.1 Elementos de Projeto e Parâmetros Geométricos

Inicialmente, é preciso apresentar alguns dos principais parâmetros e elementos de projeto que são classicamente utilizados no projeto geométrico. Todos esses estão muito bem fundamentados no livro da AASHTO, “A Policy on Geometric Design of Highways and Streets”, conhecido como “Green Book”, em sua 6ª edição, de 2011. A instituição em si, por meio de seus vários manuais e publicações, é vista como uma referência mundial no segmento dos Transportes, sendo que os procedimentos adotados no projeto geométrico no Brasil, assim como em vários outros países do mundo, se baseiam em grande parte nos princípios dispostos no referido livro.

O órgão brasileiro responsável pelo estabelecimento das principais diretrizes para o projeto de rodovias é o Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT), antigo Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (DNER), que é um órgão federal vinculado ao Ministério dos Transportes. São dois os documentos publicados que estabelecem regras diretamente orientadas para o projeto rodoviário: o “Manual de Projeto Geométrico de Rodovias Rurais”, publicado

em 1999 pelo DNER, e o “Manual de Projeto Geométrico de Travessias Urbanas”, publicado em 2009 pelo DNIT. Como os títulos já indicam o primeiro trata do projeto em trechos rurais e o segundo dita regras sobre o ambiente urbano.

Esses manuais são utilizados como guias para os órgãos estaduais que, por sua vez, publicam documentos de regulamentação para fomentar o desenvolvimento da infraestrutura nos Estados como são, por exemplo, as “Instruções de Projeto Geométrico”, do DER/SP (2005), outra referência bibliográfica utilizada no estudo. As notas técnicas que acompanham este documento também serviram de referência (DER/SP, 2006).

As definições e formas de obtenção dos mais relevantes elementos e parâmetros de projeto estão expostas a seguir, com a finalidade de se prover mais esclarecimento sobre como tais parâmetros podem ser eventualmente alterados. Buscou-se em cada caso apresentar os conceitos em sua forma mais atualizada, preferenciando porém, as regulamentações dispostas no código brasileiro. Nos casos em que os conceitos apresentam grande desatualização utilizou-se de referências da AASHTO (2011). Vale lembrar que se trata de uma introdução ao estudo e os parâmetros são apresentados da maneira como é realizado o projeto geométrico atualmente, não incorporando ainda qualquer aspecto relacionado à operação autônoma dos veículos.

5.1.1 Classificação Rodoviária

Há três tipos de classificação relativos às vias de tráfego:

- Classificação administrativa: indica os níveis de responsabilidade governamental sobre vias integrantes de uma rede ou sistema. Não possui relação direta com o projeto geométrico e depende muito mais de aspectos institucionais do que técnicos;
- Classificação funcional: corresponde a uma divisão em posições hierárquicas das funções ocupadas pelas vias no interior das redes viárias. Com base no volume de tráfego previsto, na ocupação do solo, na distância média de viagem e nos tipos predominantes de deslocamentos (acesso, captação, distribuição, transição e movimento principal) pode-se estabelecer o nível de acesso e mobilidade que determinada via deve apresentar e classificá-la em um dos

seguintes sistemas funcionais: sistema local, sistema coletor primário ou secundário e sistema arterial principal, primário ou secundário.

- Classificação técnica: enquadra a rodovia em uma das cinco classes de projeto, numeradas de 0 a IV, sendo que quanto mais baixa a numeração, mais elevados serão as exigências e o padrão de operação.

No caso das rodovias rurais, conforme estabelece o DNER (1999) a classificação funcional, que também está condicionada pelo volume de tráfego, influencia o projeto geométrico na medida em que exerce influência sobre a definição da classificação técnica. Porém, é o estabelecimento da classe de projeto da rodovia que condiciona e precede a determinação do restante dos parâmetros de projeto. As condições de tráfego e o relevo são os principais fatores considerados na classificação técnica de uma via.

Em relação ao tráfego, adota-se como critério geral o Nível de Serviço (NS) e o volume de tráfego a utilizar a via no 10º ano após sua inauguração. O volume de tráfego pode ser expresso pelo volume diário médio (VDM) e o volume horário de projeto (VHP), ambos bidirecionais. O conceito de Nível de Serviço corresponde a uma análise qualitativa das condições de operação resultantes, se relacionando diretamente com o volume de tráfego, a velocidade média de operação e o tempo em fila. De uma forma geral o Nível de Serviço, categorizado de A até F (sendo que A corresponde à melhor condição de operação), representa o grau de congestionamento enfrentado em um trecho viário.

No que se refere ao relevo, não é usual estabelecer um critério rígido e preciso para efetuar sua classificação, de forma que o enquadramento de um terreno natural em categorias pré-estabelecidas leva em conta não apenas as inclinações naturais do terreno, às quais estão associadas maiores ou menores dificuldades – e custos, essencialmente – de construção, mas também as condições de visibilidade que resultarão aos motoristas. A referência usualmente adotada pelos órgãos brasileiros provém da AASHTO (2011), que enquadra o relevo natural em uma das seguintes categorias:

- Terreno plano: condição em que as distâncias de visibilidade, resultantes das restrições horizontais e verticais, são em geral longas ou podem ser impostas para serem longas sem grandes dificuldades construtivas ou custos relevantes.

- Terreno ondulado: condição em que as variações predominantes do relevo alternam-se naturalmente para cima e para baixo do greide da via, onde apenas eventuais declividades íngremes oferecem alguma restrição aos alinhamentos horizontal e vertical normais da via.
- Terreno montanhoso: condição onde as alterações longitudinais e transversais do relevo em relação à via são abruptas, levando inclusive em muitos casos a escavações laterais para a obtenção de visibilidade a fim de que se obtenham alinhamentos horizontais e verticais aceitáveis.

Dadas as definições acima, é possível determinar a classe de projeto de uma rodovia conforme os critérios apresentados em resumo na Tabela 7. Também é apresentada a correlação existente entre as classificações técnica e funcional.

Tabela 7 – Classificação técnica, sistemas funcionais e características de projeto

Classe de projeto	Sistema Funcional	Características	Critérios de classificação técnica
0	Sistema arterial principal	Pista dupla, com elevado padrão técnico e controle total de acesso	Adotada quando os volumes de tráfego previstos para o horizonte de projeto correspondem a NS inferiores a C em terreno plano ou levemente ondulado e inferior a D em terreno fortemente ondulado ou montanhoso para pista simples
IA	Sistema arterial principal, primário ou secundário	Pista dupla, com controle parcial de acesso	Adotada quando os volumes de tráfego previstos para o horizonte de projeto correspondem a NS inferiores a C em uma via de pista simples
IB		Pista simples	Adotada para VHP de 200 veículos por hora ou VDM de 1400 veículos mistos
II	Sistema arterial secundário ou coletor primário	Pista simples	Adotada para VDM entre 700 e 1400 veículos mistos
III	Sistema coletor primário, secundário ou local	Pista simples	Adotada para VDM entre 300 e 700 veículos mistos
IV	Sistema coletor secundário ou local	Pista simples	Adotada para VDM inferior a 300 veículos mistos

Fonte: DER/SP (2005)

5.1.2 Velocidade de Projeto

A velocidade de projeto, frequentemente referida como velocidade diretriz, é aquela selecionada para fins de projeto de via que condiciona as principais características da mesma, como o raio de curvatura, a superelevação e as distâncias de visibilidade. A AASHTO (2011) a define da seguinte forma:

> Velocidade de projeto é a velocidade selecionada para determinar as variadas características geométricas de projeto da via. A velocidade de projeto assumida deve ser uma coerente e com respeito a velocidade de operação prevista, topografia, uso da terra adjacente e classificação funcional da rodovia. [...] Algumas características de projeto, como curvatura, superelevação e distância de visibilidade, estão diretamente relacionadas a, e variam consideravelmente com, a velocidade de projeto. (AASHTO, 2011, tradução nossa)

Por um lado, a definição de uma velocidade de projeto elevada promove maior segurança e conforto ao motorista, além de reduzir o tempo médio de viagem, ao aumentar a velocidade média de operação. Por outro, sua adoção requer características geométricas mais amplas – principalmente em relação às curvas horizontais e verticas, aos acostamentos e às larguras – e deve resultar em uma elevação substancial do custo de construção.

No Brasil, o estabelecimento de uma classe de projeto para a rodovia resulta na definição empírica da velocidade de projeto, conforme os valores apresentados na Tabela 8. Leva-se em consideração, novamente, a classificação do relevo, de acordo com as declividades do terreno natural e as condições de visibilidades impostas.

Tabela 8 – Velocidade de projeto para novos traçados

Classe de projeto	Velocidade de projeto (km/h)		
	Relevo		
	Plano	Ondulado	Montanhoso
Classe 0	120	100	80
Classe I	100	80	60
Classe II	100	70	50
Classe III	80	60	40
Classe IV	80-60	60-40	40-30

Fonte: DNER (1999)

Houve uma importante atualização nesse conceito de forma que a versão mais atualizada do *Green Book* preferencia a observação da consistência do traçado rodoviário ao invés da simples imposição dos parâmetros baseados na velocidade de projeto. Essa adequação é fruto de uma demanda de entidades de diversos países para que a velocidade operacional, definida pela AASHTO como “aquela na qual se observam os condutores operando seus veículos sob condições de fluxo livre”, passasse a ser considerada de alguma forma no projeto geométrico, tendo em conta que é esta que está mais intimamente relacionada ao projeto geométrico, conforme se nota na listagem dos fatores que a influenciam:

- Condições físicas da via: geometria da seção transversal, alinhamentos horizontal, alinhamento vertical e tipos e condições dos dispositivos de sinalização, do pavimento e dos dispositivos de drenagem;
- Condições climáticas: ocorrência de chuvas, neblina, névoa, calor intenso e condições adversas de luminosidade no período diurno ou noturno;
- Condições do motorista: idade, estado físico e emocional, extensão da viagem, presença de acompanhantes, familiaridade com a via, nível de obediência às leis de trânsito, etc.;
- Características e estado do veículo: tipo básico de veículo (de passageiros ou comercial), dimensões básicas, peso, distribuição de carga, idade, condições de manutenção e condições de desempenho;
- Condições operacionais da via: volume e composição de tráfego, limite legal de velocidade e presença de fiscalização por radar ou policiamento.

A velocidade efetivamente praticada resulta, portanto, da conjugação de todos os fatores mencionados e da percepção que o condutor tem acerca destes. Diz-se então que a velocidade operacional é uma variável comportamental.

A distribuição das velocidades praticadas em um trecho corresponde a uma distribuição normal de Gauss, na qual há igual probabilidade de variação para mais e para menos da média das velocidades. Atualmente, considera-se razoável a admissão da velocidade não superada por mais de 85% dos condutores como a velocidade operacional de determinado trecho rodoviário. Cada país adota critérios internos de cálculo na previsão desta velocidade para uma rodovia em fase de projeto.

5.1.3 Veículo de Projeto

Alguns aspectos do projeto geométrico dependem diretamente de parâmetros físicos característicos das frotas representativas que trafegarão sobre a via. É conveniente, portanto, catalogar todos os tipos de veículos que trafegarão sobre uma via, classificá-los em grupos e selecionar veículos representativos para cada um destes grupos. Estes veículos especiais deverão apresentar, no geral, características operacionais, pesos ou dimensões mais críticos se comparados aos demais veículos do grupo, sendo denominados como veículos de projeto.

Na análise da frota há, porém, veículos que apresentam características mais críticas que as apresentadas pelo veículo de projeto, mas isso não significa que tais veículos ficarão impossibilitados de trafegar em determinados trechos ou que a disposição da via oferece risco à segurança dos motoristas e sim que estes estarão sujeitos a condições operacionais mais desfavoráveis que as mínimas estabelecidas. Estas condições dizem respeito à dirigibilidade e ao nível de conforto apenas.

Em determinadas situações é justificável a adoção de um veículo que não o veículo de projeto adotado para o cálculo de algum elemento de projeto. Por exemplo, o gabarito vertical da rodovia deve ser definido em função do veículo de maior altura. Já no cálculo da distância de visibilidade (que leva em conta a altura dos olhos do motorista) deve-se optar pela representação de um automóvel pequeno, que pode ser menor que o de projeto.

A Tabela 9 expressa alguns dos principais elementos físicos ou operacionais dos veículos e parâmetros de projeto geométrico ou estrutural que podem ser afetados por cada um deles.

Tabela 9 – Influência das características físicas e operacionais dos veículos no dimensionamento geométrico e estrutural da rodovia

Elemento característico do veículo de projeto	Elemento dimensionado
Largura	Largura das pistas de rolamento Largura dos acostamentos Largura dos ramos
Comprimento	Largura de canteiros Extensão de faixas de espera Capacidade da via Dimensionamento de estacionamento
Altura	Gabarito vertical
Distância entre eixos	Superlargura das pistas principais Largura e raio mínimo interno das pistas dos ramos
Peso	Dimensionamento do pavimento Dimensionamento de defensas e separadores rígidos
Potência (aceleração)	Rampa máxima admissível Presença de faixa adicional de subida Capacidade
Frenagem	Distância de visibilidade de parada Curvas verticais

Fonte: DNER (1999)

No Brasil, há hoje 9 tipos básicos de veículos a serem adotados, conforme a avaliação das características predominantes da composição de tráfego (DNIT, 2010):

- VP – veículos leves (automóveis, minivans, vans, pick-ups, etc.);
- CO – veículos comerciais rígidos, não articulados, de menores dimensões (caminhões e ônibus convencionais);
- O – veículos comerciais rígidos, não articulados, de maiores dimensões (ônibus urbano longos e caminhões com três eixos);
- OR – ônibus de longo percurso (ônibus rodoviários);
- CA – veículos de carga articulados (Carreta e Vanderléia);
- BT7 – veículos de carga articulados (Bitrem de 7 eixos);
- CG – veículos especiais para transporte de veículos menores (Cegonheiro);
- BT9 – veículos de carga articulados (Bitrem de 9 eixos e Rodotrem);
- BTL – veículos de carga articulados (Bitrem de 9 eixos e Rodotrem, com dimensões maiores).

A Tabela 10 indica as principais dimensões para cada classe de veículos.

Tabela 10 – Principais dimensões básicas dos veículos de projeto (m)

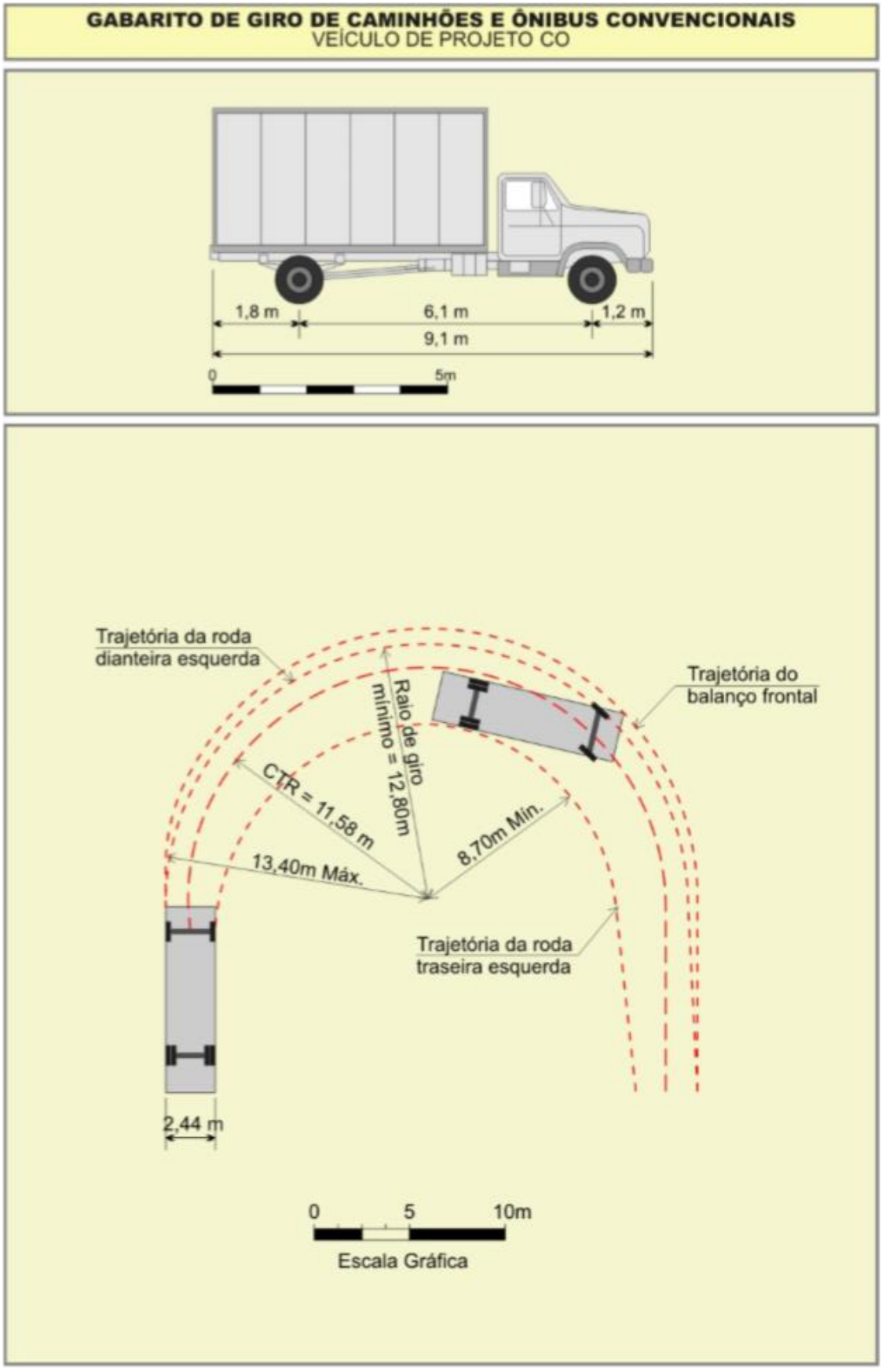
Características	VP	CO	O	OR	CA	BT7	CG	BT9	BTL
Largura total	2,1	2,6	2,6	2,6	2,6	2,6	2,6	2,6	2,6
Comprimento total	5,8	9,1	12,2	14,0	18,6	19,8	22,4	25,0	30,0
Raio mín. da roda externa dianteira	7,3	12,8	12,8	13,8	13,7	13,7	13,7	13,7	13,7
Raio de giro do eixo dianteiro	6,4	11,5	11,5	12,5	12,5	12,5	12,5	12,5	15,4
Raio mín. da roda interna traseira	4,7	8,7	7,1	7,7	6,4	6,8	2,0	4,5	3,9

Fonte: DNIT (2010)

Tradicionalmente, utiliza-se o CO para o projeto de rodovias no Brasil, especialmente devido à alta taxa de veículos de cargas que circulam pelas rodovias e estradas brasileiras.

Apenas para efeito de compreensão, está exposto na Figura 12 o desenvolvimento em curva do veículo de projeto CO, que permite o cálculo do raio mínimo de giro e da largura necessária para execução da curva. Os gabaritos mínimos de giro para cada veículo são estabelecidos pelo percurso externo do balanço dianteiro e pela trajetória do pneu traseiro que percorre o lado interno da curva. Todavia, esses parâmetros possuem mais utilidade no projeto de interseções do que no projeto geométrico da rodovia em si. Um aprofundamento na teoria sobre os parâmetros dos veículos de projeto estudados pode ser encontrado no documento “Manual de Projeto de Interseções”, do DNIT (2005).

Figura 12 – Gabarito de giro de caminhões e ônibus convencionais (CO)



Fonte: DNIT (2005)

5.1.4 Distâncias de Visibilidade

A condição de visibilidade proporcionada ao motorista é um dos fatores mais importantes para a segurança[19] e eficiência operacional de um veículo trafegando sobre uma via rural ou urbana. A garantia de distâncias de visibilidade adequadas permite ao motorista captar e interpretar informações sobre a via e o tráfego, adequar velocidade e trajetória do veículo, tomando decisões a tempo e com segurança.

Nesse sentido, foram estabelecidos 3 tipos básicos de distâncias de visibilidade que são levados em consideração, indiretamente, na definição do traçado da rodovia, especialmente em relação aos alinhamentos horizontal e vertical da rodovia. São eles: distância de visibilidade de parada (DVP), distância de visibilidade de tomada de decisão (DVTD) e distância de visibilidade de ultrapassagem (DVU).

Essas distâncias, que estão diretamente relacionadas às características geométricas da rodovia, devem ser garantidas ao longo de todo o traçado, sendo condizentes com as condições críticas dos veículos (em relação a freio, suspensão, pneus, etc.) e da superfície de rolamento (rugosidade, umidade, etc.) e atendendo aos requisitos de comportamento de parcela significativa dos motoristas.

Devido às características individuais de cada distância de visibilidade (e o que elas representam de fato), a DVP costuma ser amplamente utilizada, em rodovias bidirecionais de pistas simples e em rodovias com múltiplas faixas de todas as categorias, a DVTD é utilizada com menos frequência, apenas em situações especiais ou críticas, e a DVU é utilizada exclusivamente em rodovias bidirecionais de pistas simples.

As subseções a seguir apresentam individualmente cada uma das distâncias de visibilidade e seus métodos de obtenção.

[19] Além de visibilidade adequada, a capacitação do motorista, refletida na sua habilidade, treinamento e experiência, também é fator determinante para a segurança na operação.

5.1.4.1 Distância de Visibilidade de Parada (DVP)

A DVP corresponde à mínima distância necessária entre veículos para que um motorista, trafegando com a velocidade diretriz, seja capaz de identificar uma situação de perigo (como uma obstrução na via), processá-la e desacelerar o seu veículo até chegar na sua completa parada.

Deve-se levar em conta que cada uma dessas etapas, de percepção, reação e frenagem, possui um período de tempo associado, no qual o veículo percorre uma determinada distância em função da velocidade praticada. Assim, o cálculo da DVP corresponde à soma da distância percorrida durante o período de percepção e reação (D_1) e a distância percorrida durante o processo de frenagem, desde o acionamento do freio até a imobilização efetiva do veículo (D_2). O cálculo da DVP é realizado através da Equação 1.

$$DVP = D_1 + D_2 = \frac{\mathrm{t_r}}{3{,}6} \cdot V + \frac{V^2}{\left[254\left(\frac{j}{9{,}81} + i\right)\right]} \quad (1)$$

Onde:

V, velocidade adotada para o cálculo (km/h);

t_r, tempo de percepção e reação (s);

j, taxa de desaceleração, considerada igual a 3,4 m/s², valor capaz de representar mais de 90% dos motoristas, mesmo com pavimento molhado (m/s²);

i, greide, positivo no sentido ascendente e negativo no descendente (m/m).

Para o cálculo do primeiro termo da equação costuma-se adotar um tempo de percepção e reação humano de 2,5 segundos que, segundo a AASHTO (2011), atende a 90% da população dos motoristas. Já o segundo termo é calculado avaliando-se o processo físico da frenagem, porém levando em consideração as variações na declividade da via.

A Tabela 11 apresenta os valores arredondados de DVP calculados pelo DNIT (2010), em função da velocidade de projeto e da declividade.

Tabela 11 – Distâncias de visibilidade de parada desejável (em metros)

Velocidade de projeto (km/h)	30	40	50	60	70	80	90	100	110
Declividade	**DVP (m)**								
6%	30	45	60	75	95	120	145	165	195
5%	30	45	60	75	95	120	145	170	200
4%	30	45	60	80	100	120	150	170	205
3%	30	45	60	80	100	125	150	175	205
2%	35	45	60	80	100	125	150	175	210
1%	35	45	60	80	105	125	155	180	215
0%	35	50	65	85	105	130	160	185	220
-1%	35	50	65	85	105	130	160	185	220
-2%	35	50	65	85	110	135	165	190	225
-3%	35	50	65	85	110	135	165	195	230
-4%	35	50	65	90	110	140	170	200	235
-5%	35	50	70	90	115	140	175	200	240
-6%	35	50	70	90	115	145	175	205	245

Fonte: DNIT (2010)

5.1.4.2 Distância de Visibilidade de Tomada de Decisão (DVTD)

A adoção da DVP costuma ser suficiente para que um motorista razoavelmente competente e atento execute uma parada de emergência quando necessário. Porém, há situações em que a compreensão é confusa e talvez seja necessária a execução de manobras bruscas e pouco comuns. A limitação da distância de visibilidade ao mínimo necessário para simplesmente parar pode impedir que o motorista realize manobras evasivas, frequentemente menos perigosas que a interrupção absoluta do veículo. Nessas circunstâncias a DVTD fornece o comprimento adequado às necessidades do motorista.

O DNER (1999) define a DVTD como “a distância necessária para que um motorista tome consciência de uma situação potencialmente perigosa (...) avalie o problema encontrado, selecione o caminho a seguir e a velocidade a empregar e execute a manobra necessária com eficiência e segurança”. Assim, ao identificar uma situação de risco como um veículo quebrado na pista de rolamento, por exemplo, o motorista tomará uma das seguintes providencias: desacelerar até chegar à completa parada ou alterar velocidade e trajetória do carro para desviar do obstáculo. Cada

caso deve apresentar uma DVTD diferente, pois utiliza-se tempos de reação distintos. A Tabela 12 apresenta os valores de DVTD para ambos os casos.

Tabela 12 – Distâncias de visibilidade para tomada de decisão (em metros)

Velocidade de projeto (km/h)	50	60	70	80	90	100	110	120	130
Simples parada em rodovias rurais	70	95	115	140	170	200	235	265	305
Simples parada em rodovias urbanas	155	195	235	280	325	370	420	470	525
Desvios de obstáculos em rodovias rurais	145	170	200	230	270	315	330	360	390
Desvios de obstáculos em rodovias suburbanas	170	205	235	270	315	355	380	415	450
Desvios de obstáculos em rodovias urbanas	195	235	275	315	360	400	430	470	510

Fonte: AASHTO (2011)

A disponibilidade da DVTD é desejável em segmentos de transição de seção transversal como, por exemplo, locais com variação do número de faixas ou áreas com alta ocupação, com dispositivos de tráfego ou sinalização de advertência.

5.1.4.3 Distância de Visibilidade de Ultrapassagem (DVU)

A distância de visibilidade de ultrapassagem, assim como o nome sugere, corresponde à extensão necessária em uma rodovia bidirecional com duas faixas de tráfego para que um veículo possa ultrapassar outro veículo com menor velocidade, em condições adequadas de conforto e segurança. A realização das manobras de ultrapassagem está altamente relacionada à eficiência operacional da via, pois nessas circunstâncias o nível de serviço e a capacidade são influenciados pela quantidade de vezes que um veículo lento é alcançado por um veículo de maior velocidade e o tempo que leva para esse veículo realizar a manobra de ultrapassagem. O evidente acréscimo no custo de construção é o contraponto no fornecimento de condições de ultrapassagem de veículos lentos tão frequentemente quanto possível.

No caso de rodovias com baixo volume de tráfego a necessidade de ultrapassagem é naturalmente reduzida e o ato da ultrapassagem é facilitado pelo baixo número de veículos que se aproximam pelo outro lado. Em rodovias mais movimentadas, entretanto, onde cresce o número de veículos tentando ultrapassar,

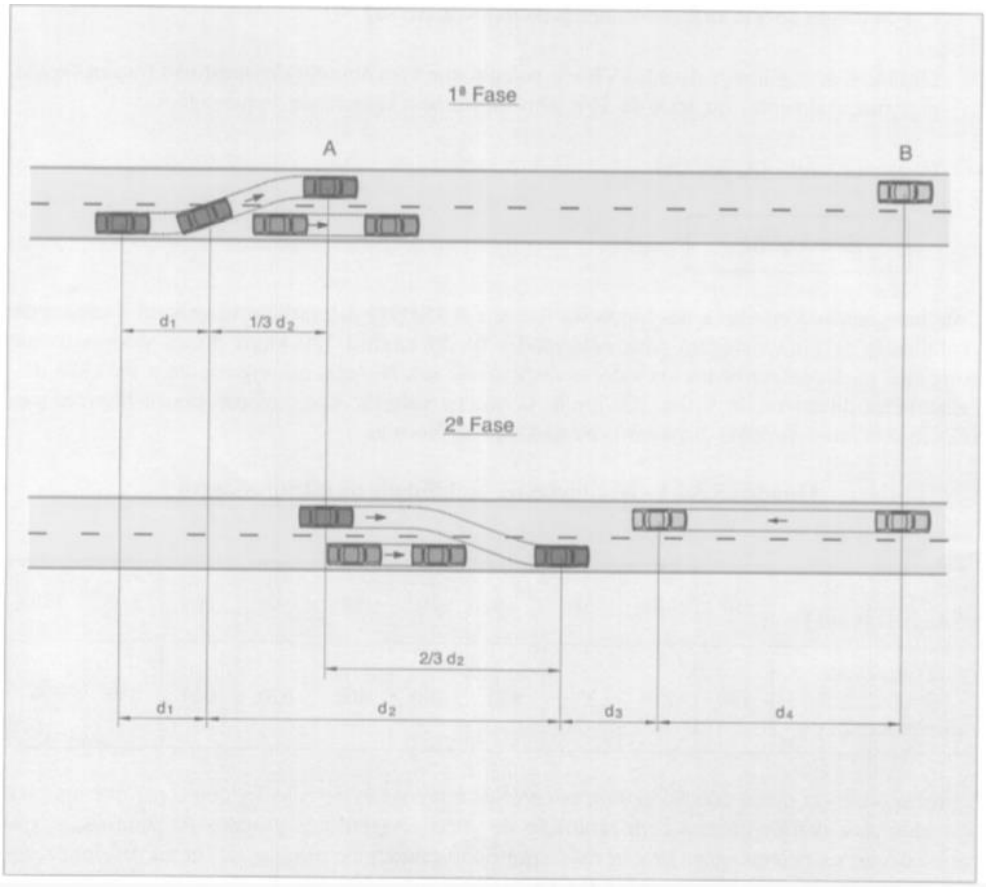
bem como o número de veículos vindo no sentido contrário, torna-se conveniente o aumento na quantidade de oportunidade ao longo do traçado, de forma a evitar que motoristas mais apressados busquem realizar ultrapassagens perigosas, sem condições de visibilidade adequadas, e aumentem significativamente a chance de ocorrência de acidentes. O DNER (1999) recomenda a viabilização de trechos de ultrapassagem a intervalos entre 1,5 km e 3 km, enquanto que a AASHTO (2011) recomenda que ao menos 20% do traçado da rodovia apresente condições adequadas à ultrapassagem.

Esses limites, porém, podem não garantir a criação de oportunidades de ultrapassagem em rodovias com elevado volume de tráfego. Chega-se a um ponto em que o tráfego no sentido contrário é tão lento e carregado, que as chances de ultrapassagem chegam a 0. Nesses casos as providências a serem tomadas são a duplicação da via ou então o acréscimo de faixas adicionais de tráfego nas subidas, para tráfego dos veículos pesados.

A DVU a ser utilizada em determinado ponto do projeto da rodovia deve ser calculada com base nas distâncias necessárias para a realização de cada uma das manobras normais de ultrapassagem simples. O projeto não prevê a ocorrência de ultrapassagens múltiplas. Essas serão realizadas diante de características favoráveis de projeto, em trechos com condições de visibilidade significativamente superiores às condições mínimas de segurança. As etapas de ultrapassagem consideradas, conforme ilustrado na Figura 13, são as seguintes:

a) O veículo mais lento (VL), a ser ultrapassado, viaja com velocidade uniforme;
b) O veículo mais rápido (VR), que ultrapassará, trafega logo atrás com a mesma velocidade, no momento em que atinge o ponto inicial (PI);
c) O motorista de VR precisa de um tempo para avaliar a possibilidade da ultrapassagem e iniciar a manobra (equivale ao tempo de percepção e reação);
d) O veículo VR acelera e atinge uma velocidade média de 15 km/h acima do VL;
e) VR volta à pista da direita no momento em que ainda há uma distância de segurança em relação ao veículo vindo na direção contrária

Figura 13 – Elementos presentes na determinação da DVU



Fonte: DNER (1999)

As variáveis apresentadas na imagem podem ser calculadas pelas seguintes fórmulas (Equações 2, 3, 4 e 5).

$$d_1 = 0{,}278 \cdot t_1(V_m - M + a \cdot t_1/2) \quad (2)$$

$$d_2 = 0{,}278 \cdot V_m \cdot t_2 \quad (3)$$

$$d_3 \rightarrow fixado\ experimentalmente\ (entre\ 30\ e\ 90\ metros) \quad (4)$$

$$d_4 = 0{,}667 \cdot d_2 \quad (5)$$

Onde:

d_1, distância percorrida durante o período de percepção e reação, acrescido do tempo gasto no posicionamento para ultrapassar (m);

d_2, distância percorrida pelo VR na faixa da esquerda (m);

d_3, distância de segurança entre o VR e o veículo no sentido oposto (m);

d_4, distância percorrida pelo veículo oposto (m);

V_m, velocidade média do veículo VR (km/h);

M, diferença entre velocidades de VR e VL (km/h);

a, aceleração média do VR no momento da ultrapassagem (km/h.s);

t_1, tempo entre o PI e início da manobra de ultrapassagem (s);

t_2, tempo de VR na faixa da esquerda (s).

A Tabela 13 fornece os valores de DVUs, com base nas fórmulas e hipóteses expostas acima.

Tabela 13 – Distâncias de visibilidade de ultrapassagem (em metros)

Velocidade de projeto (km/h)	30	40	50	60	70	80	90	100	110
Distância de visibilidade de ultrapassagem (m)	180	270	350	420	490	560	620	680	730

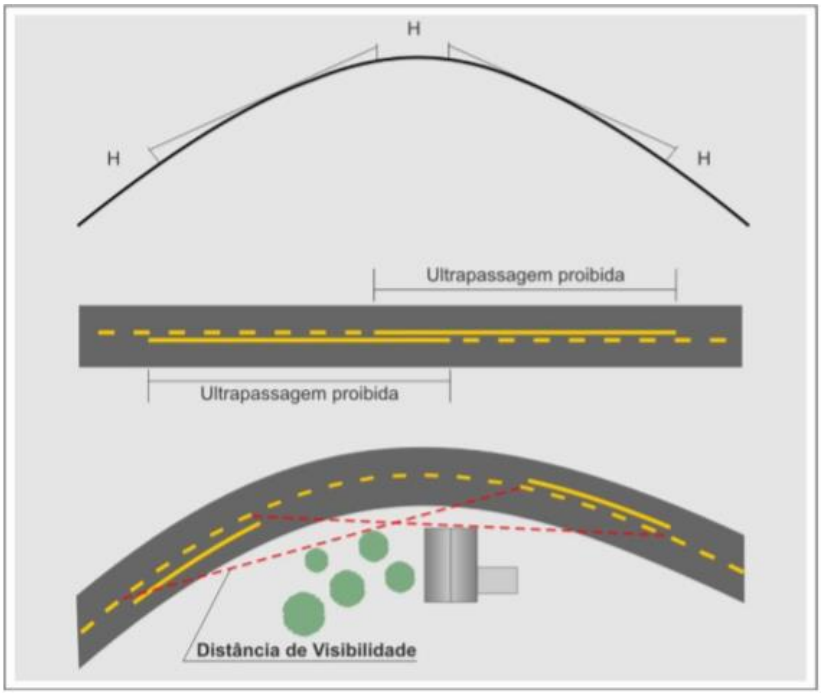
Fonte: DNIT (2010)

5.1.4.4 Verificação das Condições de Visibilidade ao Longo da Rodovia

As condições de visibilidade ao longo do traçado devem ser verificadas em projeto, por meio da análise do traçado em planta e do perfil longitudinal da rodovia, levando em conta a necessidade de continuidade da visibilidade.

Os principais elementos das rodovias que podem criar restrições de visibilidade aos motoristas são as curvas verticais convexas, nas quais não é possível enxergar a movimentação após uma determinada distância, as curvas verticais côncavas, nas quais a condição de visibilidade é dificultada no período noturno, quando o farol do veículo consegue iluminar apenas uma extensão reduzida da rodovia à frente, e as curvas horizontais, devido a obstruções laterais posicionadas nas proximidades da rodovia. Tais situações estão representadas na Figura 14.

Figura 14 – Verificação da visibilidade disponível no traçado



Fonte: DER/SP (2005)

A imagem, que ilustra trechos em curvas de uma rodovia bidirecional de pista simples, ainda representa a instauração de sinalização de permissão ou proibição de ultrapassagem, com base nas DVUs ofertadas em cada ponto da rodovia. Caso defina-se que não será permitida a ultrapassagem no trecho em questão, o critério essencial a ser considerado é a garantia da DVP.

5.1.5 Alinhamento Horizontal

O traçado da rodovia, a ser desenvolvido em projeto, deve ser considerado como uma entidade tridimensional, de fluentes e gradativas mudanças de direção, buscando-se causar o mínimo possível de surpresas aos condutores. O DNER (1999) fornece uma série de recomendações para a elaboração de um bom traçado rodoviário. As principais recomendações são:

- Deve-se partir dos dados de topografia e lançar arcos básicos de circunferência com desenvolvimento longo, conectando-os com tangentes curtas e espirais de transição, priorizando sempre curvas reversas ao invés de curvas sucessivas (as quais devem ser integradas em uma única curva, se possível);
- Com exceção de rodovias bidirecionais de pista simples, nas quais é necessário permitir ultrapassagem ao longo de boa parte da rodovia, ou regiões muito planas ou vales, deve-se evitar tangentes muito longas;
- Deve-se evitar o raio mínimo de curvatura para uma dada velocidade de projeto, sendo sua utilização restrita aos casos em que outras limitações impeçam a adoção de raios superiores;
- No caso de ângulos centrais pequenos, o desenvolvimento das curvas deve ser suficiente para evitar a aparência de quebra no alinhamento. Para ângulos centrais de 5º, é desejável extensão de no mínimo 150 m de curva. Este valor mínimo deve ser aumentado em 30 m para cada grau de diminuição;
- É recomendável que as curvas circulares sejam dotadas de curvas de transição, a fim de facilitar a dirigibilidade e, portanto, permitir condições operacionais mais favoráveis;

5.1.5.1 Raio de Curvatura Horizontal

O raio mínimo de curvatura horizontal corresponde ao menor raio de uma curva que, apresentando taxa máxima de superelevação, pode ser percorrida na velocidade de projeto, sob condições favoráveis de segurança e conforto.

Adotando as hipóteses de que o veículo equivale a um corpo rígido e que as forças são aplicadas pontualmente ao centro de gravidade do veículo, criou-se um

modelo físico que permite a obtenção deste raio mínimo, incluindo as seguintes forças: força peso, força normal de reação à força peso, e força de atrito lateral pneu pavimento. A Equação 6 permite a obtenção dos raios mínimos das curvas circulares ($R_{mín}$), cujos valores estão fornecidos na Tabela 14.

$$R_{mín} = \frac{V_p^2}{127 \cdot (e_{máx} + f_{máx})} \quad (6)$$

Onde:

V_p, velocidade de projeto (km/h);

$e_{máx}$, máxima taxa de superelevação considerada (m/m);

$f_{máx}$, máximo coeficiente de atrito admitido entre pneu e pavimento.

Tabela 14 – Raios mín. para valores máximos de superelevação e fator de atrito

Velocidade de projeto (km/h)	Superelevação máxima e (%)	Fator de atrito máximo f	Total (e/100+f)	Raio mínimo adotado (m)
15	4,0	0,40	0,44	4
20		0,35	0,39	8
30		0,28	0,32	22
40		0,23	0,27	47
50		0,19	0,23	86
60		0,17	0,21	135
70		0,15	0,19	203
80		0,14	0,18	280
90		0,13	0,17	375
100		0,12	0,16	492
15	6,0	0,40	0,46	4
20		0,35	0,41	8
30		0,28	0,34	21
40		0,23	0,29	43
50		0,19	0,25	79
60		0,17	0,23	123
70		0,15	0,21	184
80		0,14	0,20	252
90		0,13	0,18	336
100		0,12	0,18	437
110		0,11	0,17	560
120		0,09	0,15	756
130		0,08	0,14	951

/continua

/continuação

15		0,40	0,48	4
20		0,35	0,43	7
30		0,28	0,36	20
40		0,23	0,31	41
50		0,19	0,27	73
60		0,17	0,25	113
70	8,0	0,15	0,23	168
80		0,14	0,22	229
90		0,13	0,21	304
100		0,12	0,20	394
110		0,11	0,19	501
120		0,09	0,17	667
130		0,08	0,16	832
15		0,40	0,50	4
20		0,35	0,45	7
30		0,28	0,38	19
40		0,23	0,33	38
50		0,19	0,29	68
60		0,17	0,27	105
70	10,0	0,15	0,25	154
80		0,14	0,24	210
90		0,13	0,23	277
100		0,12	0,22	358
110		0,11	0,21	454
120		0,09	0,19	597
130		0,08	0,18	739
15		0,40	0,52	3
20		0,35	0,47	7
30		0,28	0,40	18
40		0,23	0,35	36
50		0,19	0,31	64
60		0,17	0,29	98
70	12,0	0,15	0,27	143
80		0,14	0,26	194
90		0,13	0,25	255
100		0,12	0,24	328
110		0,11	0,23	414
120		0,09	0,21	540
130		0,08	0,20	665

Fonte: AASHTO (2011)

No que diz respeito ao raio máximo de curvatura, deve-se evitar a adoção de raios superiores a 5000 metros, por prejudicarem a dirigibilidade.

5.1.5.2 Superelevação

Conforme se observou na determinação dos raios mínimos as rodovias apresentam inclinações transversais em relação ao plano horizontal, com o objetivo de contrabalancear o efeito da aceleração centrífuga nas curvas. Dá-se o nome de superelevação à tangente do ângulo formado pela reta de maior declive da seção com o plano horizontal.

Usualmente, nos trechos em tangente, a seção transversal apresenta um formato abaulado, com inclinações decrescentes no sentido dos bordos, nas duas direções. Geralmente essa declividade é de 2% e tem o objetivo de garantir a drenagem da via (este mesmo valor é adotado como valor mínimo para a superelevação, pelo mesmo motivo). É necessário então, criar uma zona de transição de seção transversal entre essa inclinação típica das tangentes e a superelevação nas curvas, que pode ser feita por transição em tangente T ou transição em curva L.

O limite máximo imposto à superelevação é condicionado pelos seguintes fatores: operação com velocidade operacional bem abaixo da velocidade de projeto, classe de projeto e padrão de operação, comprimento de transição da superelevação com viabilidade prática e razões econômicas. Deve-se adotar, sempre que possível, os seguintes valores máximos:

- $e_{máx} = 8\%$ em rodovias de padrão intermediário ou elevado. Este valor é considerado como máximo por várias entidades porque reduz a probabilidade de que veículos mais lentos sejam submetidos, por efeito da força peso, a deslocamentos transversais para a parte interna da curva;
- $e_{máx} = 6\%$ em projeto condicionados por urbanização adjacente e frequentes interseções, que provoquem redução da velocidade média;
- $e_{máx} = 4\%$ em situações extremas, com intensa ocupação do solo adjacente difíceis condições para variação das declividades transversais da pista.

São admissíveis, porém não recomendadas, taxas máximas de 10% e, em casos excepcionais, 12%. O DNIT (2010) ainda fornece raios máximos de curvatura para os quais a superelevação é dispensável.

5.1.6 Alinhamento Vertical

Assim como no alinhamento horizontal, o desenvolvimento do projeto do alinhamento vertical deve prever mudanças de direção graduais e contínuas, minimizando as surpresas aos motoristas. Para tanto, são fornecidas diversas recomendações, dentre as quais destacam-se:

- O projeto do greide deve evitar alterações de rampa frequentes e de menor vulto. Deve-se dar preferência a uma linha de greide suave, com mudanças graduais, e tão contínua quanto possível, evitando ainda a realização de curvas verticais sucessivas no mesmo sentido;
- Deve-se evitar greides excessivamente colados ao terreno e que impliquem em alinhamento muito ondulado. Isso poderia acarretar em problemas de segurança, à medida que veículos em pontos baixos ficam ocultos, levando os condutores a terem a falsa impressão de oportunidade de ultrapassagem;
- Trechos extensos e sem curvas verticais devem ser analisados do ponto de vista das condições operacionais decorrentes, para desencorajar velocidades excessivas;
- Deve-se evitar curvas verticais côncavas em trechos de corte, a não ser que se possa garantir drenagem adequada.

5.1.6.1 Declividade de Rampa

A adoção de declividades longitudinais suaves atende a fatores relacionados ao desempenho operacional dos veículos, aos custos operacionais, à segurança da via e a aspectos associados ao consumo de combustível e controle da poluição. Por outro lado, deve-se adaptar o perfil longitudinal da via o mais próximo possível do relevo natural do terreno, visando a proteção ao meio ambiente e a redução dos custos de construção.

As rampas ainda têm grande influência sobre a capacidade da via, especialmente nas rodovias bidirecionais de pista simples, devido à perda de velocidade dos veículos pesados. A Tabela 15 fornece as porcentagens máximas de declividades em rodovias rurais, levando em consideração ainda os padrões técnicos exigidos.

Tabela 15 – Rampas máximas em rodovias rurais

Classe do Projeto	Relevo		
	Plano	Ondulo	Montanhoso
Classe 0	3%	4%	5%
Classe I	3%	4,5%	6%
Classe II	3%	5%	7%
Classe III	4%	6%	8%
Classe IV-A	4%	6%	8%
Classe IV-B	6%	8%	10%

Fonte: DNER (1999)

O DNIT (2010) leva em conta a classificação funcional da rodovia, na determinação das rampas máximas, conforme expõe a Tabela 16.

Tabela 16 – Rampas máximas em rodovias urbanas

Categoria da via	Relevo	Velocidade diretriz (km/h)						
		50	60	70	80	90	100	110
Vias expressas *	Plano				4	4	3	3
	Ondulado				5	5	4	4
	Montanhoso				6	6	6	5
Vias arteriais	Plano	8	7	6	6			
	Ondulado	9	8	7	7			
	Montanhoso	11	10	9	9			

Fonte: DNIT (2010)

5.1.6.2 Curvas Verticais

A função das curvas verticais é concordar as tangentes verticais dos greides, geralmente por meio de parábolas de 2º grau. Essas parábolas são definidas pelo seu parâmetro de curvatura (K), que representa o comprimento da curva no plano horizontal para cada 1% de variação de declividade longitudinal. O uso da Equação 7 permite a obtenção do comprimento total da curva vertical (L).

$$L = K \cdot A \tag{7}$$

Onde:

A, diferença algébrica entre greides (%).

Permite-se dispensar as curvas verticais para diferenças de declividade inferiores a 0,5%. No caso de curvas côncavas, a partir de um valor de 43 metros para K, a via pode apresentar problemas quanto à drenagem, sendo necessária a previsão de um sistema de drenagem adequado.

O valor mínimo do parâmetro de curvatura ($K_{mín}$), principal parâmetro de dimensionamento das curvas verticais côncavas e convexas, leva em conta simultaneamente a distância de visibilidade proporcionada e a máxima aceleração centrífuga radial admissível. Deve-se obedecer ainda a um comprimento mínimo absoluto da curva vertical ($L_{mín}$), relativo a aspectos de aparência e conforto, e cujo valor deriva da correlação empírica apresentada na Equação 8.

$$L_{mín} = 0{,}6 \cdot V_p \tag{8}$$

Onde:

V_p, velocidade de projeto (km/h).

A consideração sobre a máxima aceleração centrífuga radial admissível, que tem como objetivo limitar o desconforto a que ficam sujeitos os usuários devido à variação na aceleração radial, é realizada por meio da Equação 9.

$$K_{mín} = \frac{V_p^2}{1296 \cdot a} \quad (9)$$

Onde:

V_p, velocidade de projeto (km/h);

a, aceleração centrífuga admissível, experimentalmente estipulada como 0,3 m/s².

Além dos critérios já detalhados, as curvas verticais e convexas devem fornecer condições de visibilidade adequadas, no que diz respeito aos valores mínimos e desejáveis estabelecidos para as distâncias de visibilidade de parada e, adicionalmente, para as distâncias de visibilidade de ultrapassagem, no caso de rodovias bidirecionais de pista simples.

No caso das curvas convexas, o Gráfico 1 permite a obtenção direta do comprimento mínimo da curva vertical para a DVP associada à velocidade de projeto, baseando-se nas Equações 10 e 11, que fornecem os valores mínimos de K para essa e outras situações.

$$K_{mín} = \frac{DV^2}{200 \cdot \left(\sqrt{H_1} + \sqrt{H_2}\right)^2}, \qquad para\ L_{mín} \geq DV \quad (10)$$

$$K_{mín} = \frac{2 \cdot \mathrm{DV}}{\mathrm{A}} - \frac{200 \cdot \left(\sqrt{H_1} + \sqrt{H_2}\right)^2}{A^2}, \quad para\ L_{mín} \leq DV \quad (11)$$

Onde:

DV, distância de visibilidade de parada ou de ultrapassagem (m);

H_1, altura do olho do motorista, assumida como 1,08 metros a partir do chão (m);

H_2, altura do objeto a ser observado, ao qual se assume o valor de 0,60 metros (lanterna traseira do veículo à frente) para o cálculo do valor associado à visibilidade de parada, e 1,08 metros (veículo trafegando no sentido oposto) para o cálculo do valor associado à visibilidade de ultrapassagem (m);

A, diferença algébrica entre greides (%).

Em relação às curvas côncavas, pode-se utilizar o Gráfico 2 para obter os valores mínimos de comprimento de curvas verticais para a DVP associada à velocidade de projeto, baseando-se nas Equações 12 e 13, que fornecem o K mínimo para essa e outras situações.

$$K_{mín} = \frac{DV^2}{200 \cdot \left(H_f + DV \cdot tg(\alpha)\right)}, \qquad para\ L_{mín} \geq DV \tag{12}$$

$$K_{mín} = \frac{2 \cdot DV}{A} - \frac{200 \cdot \left(H_f + DV \cdot tg(\alpha)\right)}{A^2},\ para\ L_{mín} \geq DV \tag{13}$$

Onde:

DV, distância de visibilidade de parada ou de ultrapassagem (m);

H_f, altura do farol do veículo, assumida igual a 0,60 (m);

α, ângulo de divergência do fecho luminoso em relação ao eixo longitudinal do veículo, assumido igual a 1º;

A, diferença algébrica entre greides (%).

A Tabela 17 apresenta os valores de K arredondados em função das velocidades de projeto e as correspondentes distâncias de visibilidade de parada, considerando greide nulo.

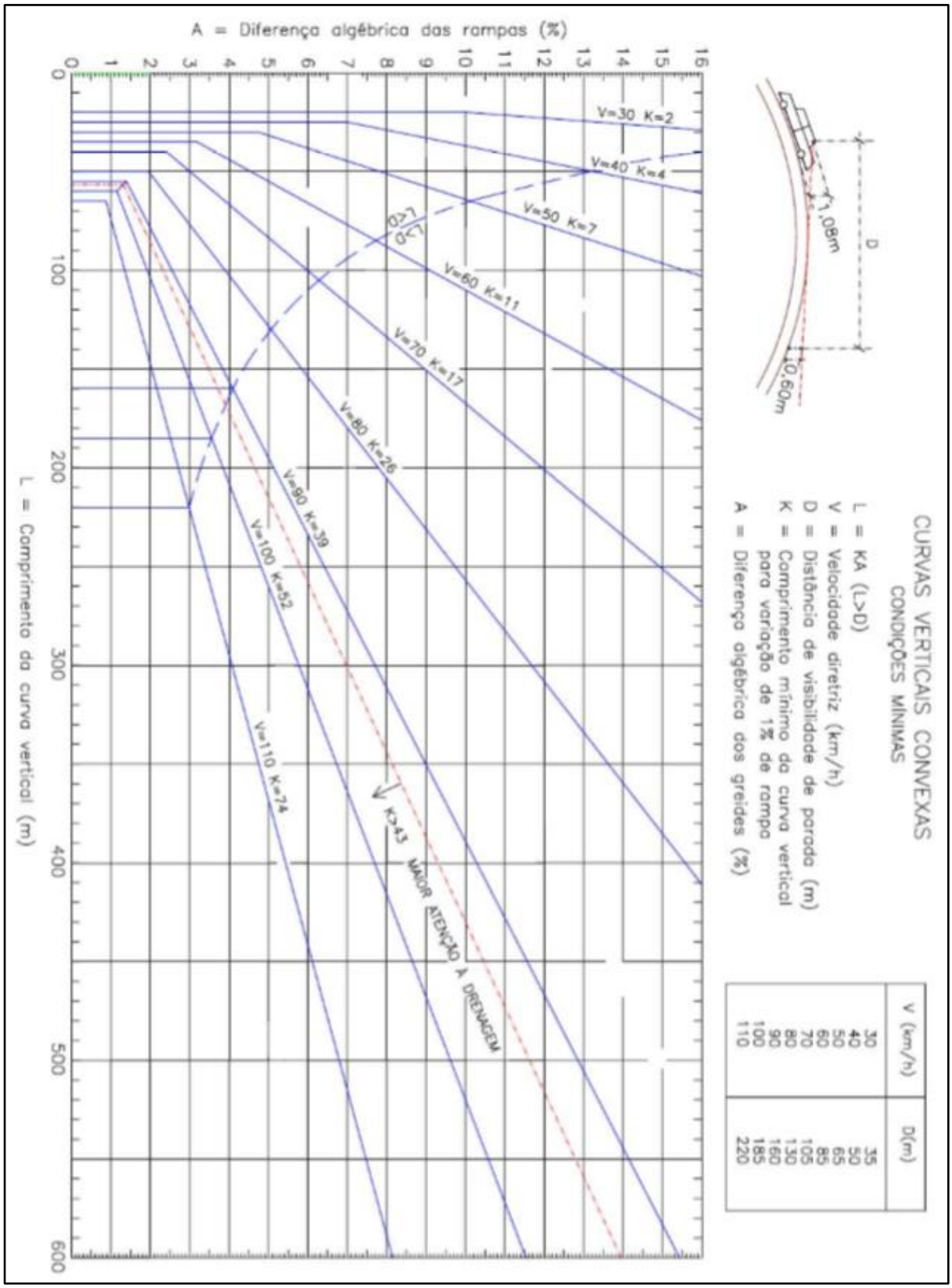
Tabela 17 – Valores de $K_{mín}$ para as condições de visibilidade (de parada)

Velocidade de projeto (km/h)	30	40	50	60	70	80	90	100	110
DVP (m)	35	50	65	85	105	130	160	185	220
Kmín p/ curvas convexas	2	4	7	11	17	26	39	52	74
Kmín p/ curvas convexas	6	9	13	18	23	30	38	45	55

Fonte: DNIT (2010)

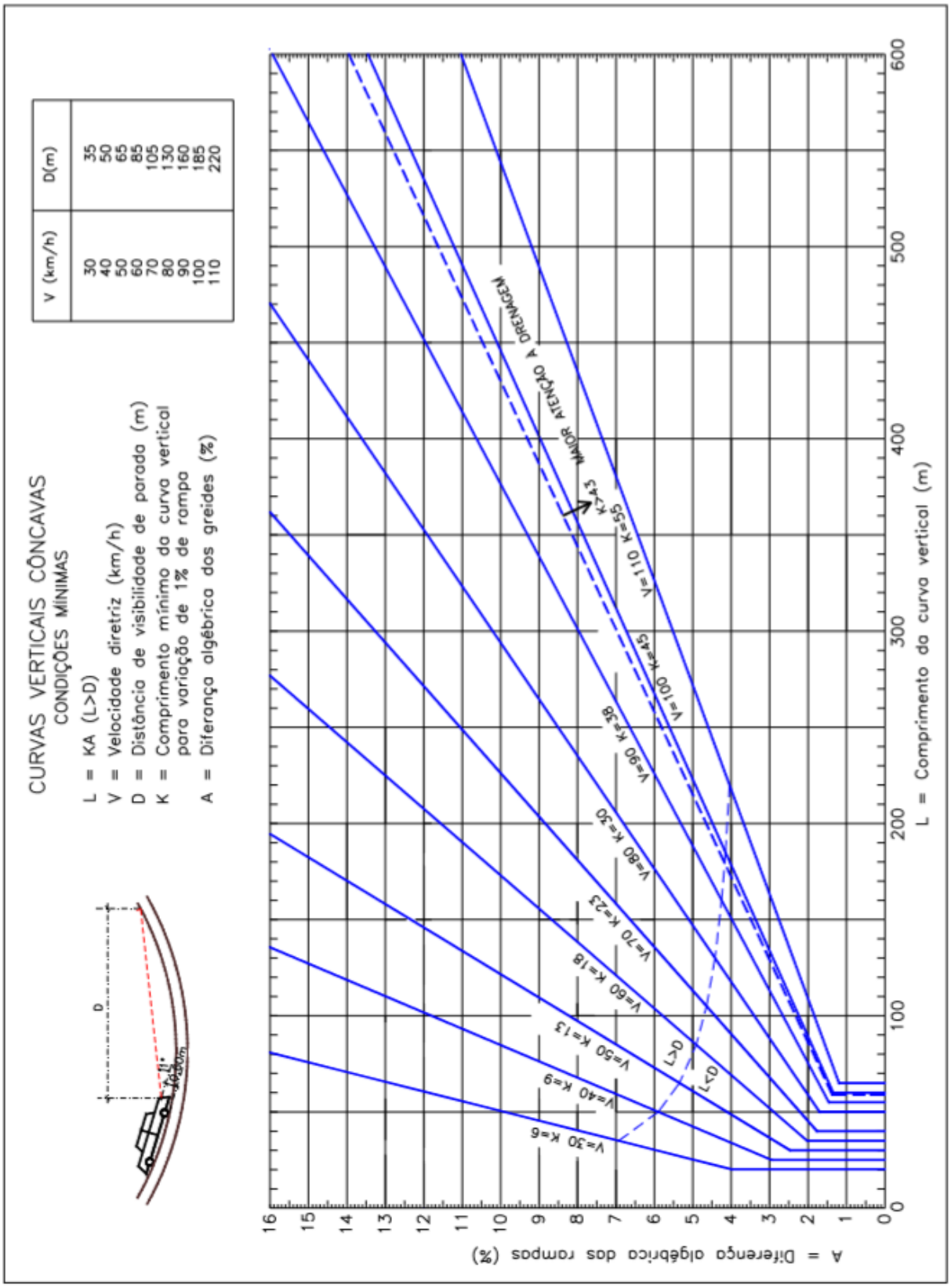
O Gráfico 1 e o Gráfico 2 permitem a obtenção dos comprimentos totais das curvas verticais convexas e côncavas, respectivamente, em função das variações de declividades, considerando todos os critérios descritos acima.

Gráfico 1 – Comprimentos mínimos das curvas verticais convexas



Fonte: DNIT (2010)

Gráfico 2 – Comprimentos mínimos das curvas verticais côncavas



Fonte: DNIT (2010)

5.1.7 Largura das Faixas de Rolamento

A largura da faixa de rolamento é obtida adicionando à largura do veículo de projeto, a largura de uma faixa de segurança, função da velocidade diretriz e do nível de conforto de viagem que se deseja proporcionar. Os valores recomendados para pistas pavimentadas de rodovias rurais estão entre 3,00 metros e 3,60 metros. A largura da pista tem influência sobre a capacidade da via. Dessa maneira, larguras reduzidas, além de proporcionarem economias muito pequenas, só encontrarão justificativas em vias situadas em regiões topograficamente adversas, com baixos volumes de tráfego e com menor participação de veículos comerciais.

Os valores básicos recomendados para a largura de uma faixa de rolamento pavimentada em tangente, em rodovias rurais, podem ser encontrados na Tabela 18.

Tabela 18 – Largura das faixas de rolamento em tangente (em metros)

Classe do Projeto	Relevo		
	Plano	Ondulo	Montanhoso
Classe 0	3,60	3,60	3,60
Classe I	3,60	3,60	3,50
Classe II	3,60	3,50	3,30
Classe III	3,50	3,30	3,30
Classe IV-A	3,00	3,00	3,00
Classe IV-B	2,50	2,50	2,50

Fonte: DNER (1999)

Para rodovias urbanas recomenda-se a adoção de maiores larguras, entre 3,30 e 3,60 metros.

5.2 Estudo de Adequação Integrada dos Parâmetros

Inicialmente, trabalhou-se com a hipótese de que a adequação poderia ser feita isoladamente sobre cada parâmetro e procedimento de cálculo, de forma a manter os fundamentos por trás dos parâmetros e apenas estimar novos valores baseando-se em variações nos fatores de cálculo. Entretanto, avaliando a complexidade dos cálculos e a influência que os parâmetros exercem uns sobre os outros, julgou-se necessário fazer uma análise mais completa e macroscópica do projeto.

Da forma como o projeto é realizado atualmente, todos os aspectos relacionados ao traçado e às dimensões transversais de uma rodovia são condicionados pela determinação da velocidade de projeto. Por exemplo, de acordo com o método proposto pelo DNIT (2010), a partir do estabelecimento da velocidade de projeto de 110 km/h para uma via expressa do sistema arterial principal, define-se: DVP igual a 220 metros, raio mínimo de curvatura horizontal igual a 475 metros (considerando e = 8%), rampa máxima igual a 3%, K mínimo para curvas convexas igual a 74 metros, K mínimo para curvas côncavas igual a 55 metros, largura da faixa de rolamento igual a 3,60 metros, dentre vários outros parâmetros.

O problema é que ao se estabelecer uma velocidade única e invariável de projeto, todas as características geométricas da via têm que se adequar (no limite do possível) a essa velocidade, para permitir que os veículos possam trafegar com segurança a uma velocidade operacional constante, o que muitas vezes pode resultar em dificuldades construtivas e custos elevados. A AASHTO já vem tomando providências para tentar amenizar este problema e nas últimas versões do *Green Book* já passou a recomendar aos projetistas uma maior atenção à consistência do traçado, antevendo as velocidades que serão efetivamente praticadas pelos motoristas trecho por trecho. Diz-se que o bom traçado é aquele em que a velocidade operacional sobre cada trecho apresenta variação dentro de uma faixa de 15 km/h em relação à velocidade de projeto, para mais ou para menos.

Todavia, há alguns aspectos relacionados à operação autônoma dos veículos que podem proporcionar uma série de benefícios na concepção dos projetos rodoviários. A avaliação criteriosa da operação leva a crer que algumas das características geométricas das rodovias podem apresentar importantes mudanças. As subseções a seguir detalham o processo de adequação, que deve compreender a complexidade e magnitude da mudança que haverá na operação rodoviária.

5.2.1 Premissas e Hipóteses

É necessário esclarecer que o processo de adequação deve, acima de tudo, prezar pela segurança dos usuários e pela eficiência operacional, assim como acontece no modelo atual de concepção. Dito isso, os novos critérios adotados no modelo de cálculo adaptado buscam absorver os potenciais benefícios possibilitados pela direção autônoma, além do benefício óbvio que é a própria conveniência da direção autônoma.

O cenário em que se realiza o projeto de uma rodovia é o estabelecido na Seção 4.2, com uma grande porcentagem (acima de 90%) dos veículos plenamente autônomos e conectados entre si e com a infraestrutura. Há uma central de comando de tráfego que processa informações coletadas por seus sensores e câmeras ou recebidas dos veículos e retorna informações relevantes e instruções para os veículos. Os veículos também possuem dispositivos para identificar as condições de tráfego, condições climáticas e situações de risco. A definição das velocidades e trajetos fica a cargo dos veículos, porém a infraestrutura manipula o tráfego, estabelecendo diretrizes para o tráfego em geral.

Para o desenvolvimento do modelo foi necessário ainda o estabelecimento de uma série de outras hipóteses quanto à operação de tráfego que se observará na rodovia projetada, dentre outras coisas. As hipóteses adotadas são:

- Trata-se do projeto geométrico de uma nova rodovia, sobre a qual está prevista, desde a inauguração, a operação de um sistema inteligente de transportes, protagonizado por veículos autônomos e conectados (que devem ser predominantes à época);
- O modelo descrito não seria utilizado para a reforma de uma rodovia existente na qual serão instaladas tecnologias ITS, porém os principais aspectos da operação seriam equivalentes;
- A consolidação das tecnologias ITS mais avançadas (como o controle adaptativo de velocidade de cruzeiro e o controle lateral em relação às faixas de tráfego), o georreferenciamento preciso dos veículos, a instalação de sensores para identificação de perigo iminente e a conectividade completa do veículo com a infraestrutura (V2I/I2V) e os outros veículos (V2V), são os fatores que definem e permitem a operação autônoma dos veículos;

- A rodovia deve priorizar o tráfego de veículos autônomos, mas não impedirá o tráfego de veículos comuns (com tecnologia embarcada insuficiente para a operação autônoma), que poderão trafegar sob critérios especiais de operação - velocidades reduzidas (em comparação aos veículos autônomos) e tráfego exclusivo na faixa da direita, basicamente;
- Os usuários dos veículos não devem intervir na operação em nenhum momento, não havendo a necessidade dos mesmos prestarem atenção no percurso. O sistema autônomo deve ser responsável por toda a operação;
- Tanto a infraestrutura, quanto os veículos, serão responsáveis pela identificação de situações de risco e alertam a todos os outros elementos quando identificada tal situação;

A operação autônoma traz consigo obstáculos pertinentes em termos de segurança e eficiência operacional, que precisarão ser superados antes de se pensar em implementar qualquer tecnologia. Em relação aos sistemas internos dos veículos, o maior problema do sistema consiste no fato de que, com tantos agentes, aumenta-se em muito a possibilidade de falhas, de forma que a falha sistêmica de apenas um veículo pode comprometer a segurança de toda a frota adjacente e de uma forma geral, reduzir significativamente o fluxo da via. Por outro lado, a infraestrutura deve ser muito menos suscetível a falhas operacionais, pois caso venha a apresentar algum equívoco ou então seja burlada por motivos perversos, tem o potencial de gerar uma tragédia de gravidade inimaginável, devido à quantidade de veículos sobre a qual a central de tráfego terá influência.

A solução deste problema deve caminhar para a integração entre os dois possíveis agentes, os veículos e a infraestrutura, de forma que ambos apresentarão mecanismos para prever e impedir falhas ou invasões indesejadas no sistema. Adota-se para fins de desenvolvimento do método, uma situação ideal, na qual o sistema como um todo não apresentará falhas, nem da parte dos sistemas internos dos veículos, nem da comunicação entre os elementos e nem do sistema compartilhado da central de tráfego.

Propõe-se, por fim, um sistema em que as velocidades são padronizadas e pré-estabelecidas em situação de tráfego “normal”, de forma que o veículo, antes mesmo de adentrar a rodovia, já possui a informação de que velocidade será utilizada em cada trecho. Fica a cargo da infraestrutura e dos veículos alertar nos momentos em

que essa velocidade deve ser reduzida, em uma atividade reativa a algum elemento nocivo à operação, traduzindo novas velocidades à operação (que também podem ser pré-estabelecidas conforme a situação que se apresenta). Dessa forma, torna-se o processamento muito mais viável, no sentido em que se reduz substancialmente a quantidade de variáveis envolvidas.

5.2.2 Traçado, Geometria e Velocidade Operacional Variável

O principal elemento introduzido que permite o desenvolvimento de um novo modelo de projeto é a possibilidade de se trabalhar com uma velocidade operacional variável, rigorosamente controlada sobre qualquer trecho da extensão rodoviária. Apesar da variação conforme o trecho percorrido, todos os veículos que passam por uma mesma seção transversal devem apresentar a mesma velocidade. A ideia é que os veículos autônomos desenvolvam maiores velocidades nos trechos retos e tenham suas velocidades reduzidas na aproximação de curvas.

Assim, é feita uma flexibilização na escolha do traçado, de forma que ele deve prever ainda velocidades operacionais não muito distante de uma velocidade de projeto desejada, porém em determinados trechos, onde a manutenção da velocidade resultaria em grandes custos com movimentação de terra, as curvas podem ser projetadas de forma mais acentuadas, prevendo uma redução um pouco maior nesse trecho em específico.

Há dois detalhes que se deve atentar, porém: o conforto geral dos motoristas, de forma que não é adequado um traçado com variações abruptas constantes, e as declividades muito elevadas, que podem comprometer a eficiência operacional. O traçado ainda deve priorizar rotas que minimizem o tempo de viagem, prevendo as velocidade operacionais impostas em cada trecho. Deve-se buscar um equilíbrio entre trechos mais curtos e trechos mais retilíneos.

As características impostas ao traçado resultam em curvas verticais e horizontais mais acentuadas do que se projeta atualmente, o que se justifica pelo fato de que a velocidade praticada por um veículo autônomo sofre inequívoca redução na aproximação de uma curva, de acordo e proporcionalmente às limitações geométricas impostas. Essa mudança de critério deve abrir um leque de possibilidades na escolha do traçado.

Outra vantagem da flexibilização na escolha do traçado é a redução dos impactos ambientais, no sentido de que a liberdade adquirida permite que a construção da rodovia possa ser realizada sobre locais que resultarão em menores danos ao ambiente, podendo evitar, em muitos casos, a construção sobre regiões com predominância de mata nativa. Há outros fatores relativos aos impactos ambientais que são contemplados pela forma de operação como, por exemplo, o controle de emissão de poluentes, em função da redução do congestionamento.

Para que a instauração da velocidade operacional variável seja possível, no entanto, é necessário que os órgãos responsáveis regulamentem a respeito, definindo qual seria a velocidade operacional associada a cada situação. Considera-se atualmente que a velocidade operacional, que é fruto da percepção e habilidade do motorista, é condicionada pelos seguintes fatores: condições climáticas, condições físicas da via, condições do motorista, características e estado do veículo e condições operacionais da via.

As regulamentações devem ser feitas, principalmente, em torno das condições climáticas, de forma a apresentar as velocidades adequadas de tráfego, em função dos parâmetros geométricos no trecho (parâmetros de curvas verticais e horizontais, de larguras de faixas, etc.), e para cada tipo de clima. Isso significa que a cada trecho da rodovia é associada uma velocidade operacional em tempo seco, condizente com a geometria, e uma velocidade operacional reduzida para cada tipo de condição climática desfavorável que se apresenta (chuva, neblina, neve, etc.).

Em relação às condições físicas da via, para que o sistema funcione de forma adequada é importante que as rodovias apresentem um altíssimo padrão de execução e estejam sujeitas a manutenção constante, de forma a não comprometer a operação autônoma com a aparição de buracos no pavimento. As condições do motorista não devem influenciar no tráfego, já que se trata da definição da velocidade operacional dos veículos autônomos, nos quais o motorista se torna um mero espectador.

Supostamente, não deve haver mudança de velocidade relativamente ao tipo ou estado do veículo que trafega sobre a rodovia, porém não se pode afirmar ao certo que no cenário imaginado todos os veículos são capazes de chegar às velocidades máximas operacionais, assim como acontece hoje em dia com os veículos de carga ou os automóveis mais antigos. Pensando nessa situação, tais veículos também devem ser alocados na faixa da direita, com velocidades reduzidas em relação às faixas comuns, para não comprometer a eficiência operacional do tráfego.

5.2.3 Definição e Manutenção da Capacidade Viária

O “Highway Capacity Manual” (TRB, 2010), a publicação de maior relevância no mundo a tratar da operação viária, define a capacidade de uma instalação como “[...] a relação máxima horária em que [...] veículos podem ser sensatamente esperados por passar em um ponto transversal ou uma seção uniforme de uma faixa ou rodovia, durante um determinado período de tempo”. Para o estudo aqui realizado, convém adotar como medida representativa da capacidade viária o máximo de veículos por hora a passar por uma faixa de tráfego.

Um trecho rodoviário qualquer atinge sua capacidade quando a demanda de veículos procurando utilizá-lo chega próxima a levá-lo a uma condição de saturação. Nesse cenário, que corresponde ao Nível de Serviço E, os motoristas percebem a alta densidade de veículos nos arredores e operam seus veículos com velocidades pouco abaixo das velocidades desejadas, mas se aproximam, mantendo distâncias entre si suficientes para que sintam segurança em relação a uma eventual parada à frente. A combinação entre a velocidade média pouco abaixo da velocidade de fluxo livre e as distâncias reduzidas entre veículos leva, em um cenário em que a via se encontra plenamente ocupada, à capacidade do fluxo viário. Um aumento da demanda iniciaria o processo de formação de filas, de forma que os veículos se aproximariam (aumentando a densidade do fluxo de tráfego), porém suas velocidades cairiam de tal forma que o fluxo atingido seria o de saturação, inferior à capacidade. Esse cenário de saturação corresponde ao Nível de Serviço F.

Cabe aqui a observação de que apenas uma seção transversal com capacidade reduzida já é capaz de criar um gargalo operacional que condiciona e rebaixa o fluxo de toda a extensão rodoviária que o antecede na via, devido à formação das ondas de congestionamento no sentido oposto ao de tráfego. Passado este gargalo os veículos geralmente deixam de trafegar em condições de saturação.

No caso da operação autônoma, ao menos nas faixas exclusivas aos veículos autônomos, o controle absoluto do tráfego permite a adoção de um valor pré-fixado para a capacidade, cujo fluxo deve ser obedecido sempre que a demanda de veículos chegar ou ultrapassar seu valor (exceto em situações especiais, como o fechamento de uma pista).

Para tanto, alguns aspectos da operação devem ser devidamente organizados. Primeiramente, o sistema inteligente deve prever mecanismos que impeçam que a

ocorrência de formação de filas, ou seja, não deve mais haver operação com Nível de Serviço F. A partir do momento em que a demanda supera a capacidade total da via, é fundamental que se realize o controle absoluto dos acessos, permitindo apenas a entrada de uma quantidade de veículos por período de tempo que possa ser absorvido pela via, impedindo que se chegue a uma situação de saturação e o fluxo total seja reduzido.

Ao ficar estacionado em uma fila para acessar a rodovia o usuário pode até ter a impressão de que está perdendo tempo, mas na realidade seu tempo total de viagem será reduzido dessa forma, já que este está intimamente relacionado a fluxo escoado pela via e à velocidade média praticada ao longo de todo o percurso, que será maior nesse caso do que se estivesse ocorrendo o fluxo forçado.

Outro ponto importante, é que para que as reduções das velocidades operacionais impostas nas iminências das curvas, não resultem na criação de gargalos operacionais, o sistema inteligente também deve prever uma solução elegante, porém simples: na condição de ocupação máxima (fluxo igual à capacidade), ao mesmo passo em que se realiza uma redução da velocidade na aproximação das curvas horizontais ou verticais, os veículos devem se aproximar proporcionalmente, de forma a manter o mesmo fluxo de veículos escoando em todas as seções. A solução é simples porque, à medida que cada veículo passa determinada seção transversal, basta aplicar de forma uniforme e homogênea a cada um dos veículos a mesma taxa de aceleração ou desaceleração até que se atinja a velocidade desejada.

O seguinte exemplo pode auxiliar na compreensão: supõe-se um cenário de via plenamente ocupada em que todos os veículos trafegam a 30 m/s (108 km/h), com um *headway time*[20] de 2,0 segundos entre eles, ou seja, o distanciamento total entre cada veículo é de 60 metros. No exato momento em que cada um deles atinge uma seção transversal, sua velocidade passa a decair com uma taxa de 2 m/s² até atingir a velocidade de 20 m/s (após 5 segundos), para a passagem em uma curva vertical. Utilizando as fórmulas básicas de física pode-se facilmente concluir que dois veículos subsequentes, terminado o processo de frenagem dos dois, se encontrarão agora a uma distância total de 40 metros um do outro para velocidades de 20 m/s, ou seja,

[20] *Headway time* corresponde ao tempo que demora para um veículo atingir a posição do veículo imediatamente à frente. Este conceito está melhor definido na Seção 6. Julga-se que o valor de 0,9 segundos bem representa o comportamento geral dos motoristas hoje em dia.

mantém-se o *headway time* de 2,0 segundos. Isso significa que a cada dois segundos passará um veículo na seção transversal (por faixa de tráfego), assim como acontece na seção transversal anterior. Conclusão: o fluxo nos dois trechos, apesar da redução de velocidade, é o mesmo.

Após a curva, caso exista uma seção em que eles passam a acelerar com taxa de 2,0 m/s² por 10 segundos, até chegar a uma velocidade de 40 m/s, ao final do processo eles estarão a uma distância de 80 metros um do outro, com o mesmo *headway* time de 2,0 segundos. Seguindo a mesma lógica, pode-se expandir a relação para toda a extensão rodoviária, de forma que todos os trechos trabalham com o mesmo fluxo. A ideia é que este fluxo seja equivalente à capacidade previamente estipulada para a via, em fase de projeto. Isso pode ser realizado somente em faixas em que trafegam somente veículos autônomos que não impõem limites máximos às velocidades operacionais, devido ao seu tipo ou estado.

A vantagem de se prever esse tipo de operação, em que a passagem por determinada seção transversal já dita a velocidade, é a redução significativa na necessidade de processamento, de forma que a operação deixa de ser reativa, em que o veículo desacelera apenas ao perceber a desaceleração do veículo à frente, o que pode gerar uma série de problemas. Nesse caso, no momento em que o usuário do veículo autônomo escolhe seu destino, o veículo já pode baixar as informações necessárias para o tráfego na rodovia, por meio de um *broadcast* sob demanda. Cabe aos sistemas de prevenção da infraestrutura e do veículo apenas alertar caso surja algum imprevisto na via, desacelerando reativamente o veículo, ou alertar para condições adversas de clima, alterando as velocidades operacionais da rodovia por meio de mais um *broadcast* sob demanda.

Nesses casos, de redução das velocidades operacionais por condições climatológicas desfavoráveis, é inevitável a redução da capacidade, pois não deve haver aproximação dos veículos. Paralelamente, há de ocorrer a intensificação do controle de acesso para evitar a operação em fluxo forçado.

Não se julgou conveniente a quantificação dos valores de distâncias de segurança entre veículos, ou do *headway time*, relativos à operação autônoma, com as informações disponíveis atualmente. Ademais, embora seja provável que as velocidades operacionais do sistema futuro assumam valores muito superiores às velocidades praticadas atualmente, especialmente em longos trechos retos, não há elementos suficientes para quantificar essa elevação.

5.2.4 Novas Condições de Visibilidade

Apesar da redução da velocidade operacional na aproximação das curvas, as novas condições de visibilidade requeridas no projeto, associadas ao novo tipo de operação, permitem que se trafegue com velocidade superior em uma curva vertical do que se faz hoje em dia, com as mesmas características geométricas. Tradicionalmente, o cálculo das distâncias de visibilidade é realizado considerando a percepção que os motoristas têm das situações e a capacidade de reação que apresentam, as quais devem variar conforme diversas características do motorista, como habilidade, estado mental, idade, etc.

Porém, ao considerar que a operação do veículo autônomo não deve de forma alguma, ao menos idealmente, ser influenciado pelos usuários do veículo, chega-se à conclusão que o procedimento de cálculo relativo às distâncias de visibilidade pode sofrer adaptações. Para avaliar como ocorre tal mudança é necessário compreender quais ferramentas integrantes do sistema inteligente que possibilitam a identificação de uma situação de risco e promovem a desaceleração dos veículos, em processo reativo. Citam-se duas possibilidades:

- O veículo, que possui sensores embarcados, percebe um objeto estranho em seus arredores e alerta os outros veículos e a infraestrutura. A partir daí, ele pode processar a informação diretamente e promover a desaceleração, no sistema descentralizado, ou então aguardar o processamento pela central de tráfego, receber a orientação para desacelerar e só então iniciar o processo de frenagem;
- Na segunda hipótese as câmeras que compõem a infraestrutura, distribuídas por toda a extensão da rodovia, são capazes de identificar movimentações suspeitas em uma faixa de domínio da rodovia, composta pelas faixas de tráfego e mais faixas laterais de segurança. A infraestrutura então pode processar a informação e determinar a redução da velocidade dos veículos, no sistema centralizado, ou então apenas repassar a informação a todos os veículos, que realizarão o processamento.

Pode-se considerar, conforme mencionado anteriormente, que é a integração entre ambos os agentes que permitirá a adequada prevenção aos riscos, de forma

que independente de qual agente realiza a identificação da potencial situação de perigo, fica evidente que deve haver ainda um momento posterior de transmissão e processamento da informação. Ao estimar que a identificação por sensores instalados nos veículos deve ter importância na operação, auxiliando as câmeras dispostas ao longo da rodovia na identificação de objetos estranhos, conclui-se que ainda se faz necessário o provimento de condições de visibilidade ao campo de atuação dos sensores dos veículos, associadas a distâncias de visibilidade de parada (DVP) para veículos autônomos.

O período de reação do sistema autônomo, até o momento em que se dá início ao processo da frenagem, não pode ser definido com exatidão, já que é impossível prever o estado da arte das tecnologias ITS nas décadas futuras, porém, pode-se especular acerca desse valor com base nas tecnologias disponibilizadas atualmente.

Para fins práticos de desenvolvimento do método, pode-se estimar que este tempo total de reação do sistema corresponda a 1,0 segundo, baseando-se em informações dispostas na Tabela 6. O tempo de percepção e reação humano utilizado no cálculo da DVP equivale a 2,5 segundos, portanto o que se avalia é uma redução nesse valor da ordem de 1,5 segundos.

Conforme evidenciado no estudo dos elementos de projeto, o cálculo da DVP leva em consideração, além da informação acima, a distância necessária para que um veículo que inicia o processo de frenagem chegue à sua completa parada. Seu cálculo se baseia em uma taxa de desaceleração que seja minimamente confortável para o motorista e ainda a declividade do trecho sobre o qual o veículo desacelera. Na impossibilidade de se prever e mensurar alterações em relação ao conforto dos usuários na frenagem decidiu-se por manter o valor de 3,4 m/s² para desaceleração.

Com os valores propostos acima, pode-se utilizar a Equação 1 para calcular novas distâncias de visibilidade de parada, adaptadas para os veículos autônomos, variando em função da velocidade operacional e da declividade. Os resultados estão expostos na Tabela 19.

Tabela 19 – Valores de DVPs para veículos autônomos ($t_r = 1,0\ s$)

Velocidade operacional (km/h)	30	40	50	60	70	80	90	100	110
Declividade	**DVP (m)**								
6%	17	27	38	52	67	84	103	125	148
5%	17	27	39	52	68	86	105	127	151
4%	17	27	39	53	69	87	107	130	154
3%	18	28	40	54	71	89	110	132	157
2%	18	28	41	55	72	91	112	135	161
1%	18	29	41	56	74	93	114	138	164
0%	19	29	42	58	75	95	117	141	168
-1%	19	30	43	59	77	97	120	145	172
-2%	19	30	44	60	79	99	123	148	176
-3%	20	31	45	61	80	102	126	152	181
-4%	20	32	46	63	82	104	129	156	186
-5%	20	32	47	64	84	107	133	161	191
-6%	21	33	48	66	87	110	136	165	197

Ao comparar esses resultados com os dispostos na Tabela 11 (em valores arredondados), elaborada pelo DNIT (2010), nota-se uma redução de até 42%, para velocidades mais baixas. Conforme a velocidade aumenta essa variação é reduzida, chegando até a faixa de 20% para uma velocidade de 120 km/h.

Tratando da distância de visibilidade de tomada de decisão, deve-se primeiro avaliar que sua utilização se justifica apenas em situações muito específicas, onde ocorre difícil compreensão da providência a se tomar, como a confluência de faixas de tráfego, por exemplo. Agora, tendo em vista de que o projeto da rodovia não deve prever mudanças às seções transversais desse porte, que possam complicar a operação autônoma, e que em situações de difícil compreensão o sistema operacional não deve prever a tomada de decisões impulsivas como a mudança brusca de faixa, mas sim promover a desaceleração do veículo logo que se identifique a situação de difícil compreensão (chegando à parada se necessário), como medida fundamental de segurança, pode-se considerar que não será necessária a adoção desse tipo de distância de visibilidade.

Quanto à distância de visibilidade de ultrapassagem, é difícil afirmar que esse tipo de projeto adaptado será realizado para rodovias bidirecionais de pista simples. Porém, caso as tecnologias sejam instaladas em rodovias pré-existentes com essas

características, pode-se pensar que a DVU ainda tenha alguma utilidade prática. Será realizada então uma breve consideração sobre sua utilização e os fatores que podem ser adequados, considerando a forma como será feita a operação.

Primeiramente, pode-se supor que, com as tecnologias disponíveis na época, o mapeamento por parte da infraestrutura dos veículos que trafegam sobre uma via pode ser facilmente realizado. Para tanto, rodovia bidirecional a ser adaptada deve receber câmeras sobre toda sua extensão (assim como já acontece em diversas rodovias hoje em dia) e estão seriam capazes de identificar os veículos automaticamente, sem a necessidade da interpretação humana. Nesse cenário a infraestrutura pode até identificar quais dos veículos que trafegam sobre a malha rodoviária que possuem operação autônoma, já que estes estarão conectados à mesma por tecnologias V2I. Assim, o ato de ultrapassagem nesse tipo de rodovia será continuamente monitorado.

A distância de ultrapassagem ainda deve ser respeitada fielmente, mas considerando que o veículo possui registrada no sistema a informação de todos os veículos que trafegam no sentido contrário, juntamente com seus posicionamentos e velocidades, o conceito de condição de visibilidade para a ultrapassagem perde todo o sentido, e deve cair em desuso. No cálculo da DVP, diferentemente do que ocorre com a DVU, o objeto a ser identificado surge de forma imprevisível e instantânea, e por esse motivo ainda se trabalha com as condições de visibilidade. No caso da DVU, sendo o objeto a ser identificado outro veículo, o processo de captação da informação, que anteriormente era visual, agora resulta da conectividade entre os agentes.

Assim, a manobra de ultrapassagem resulta das mesmas etapas adotadas no processo atual (ilustrado na Figura 13) – com a possibilidade de se reduzir a distância de segurança – e a distância de ultrapassagem é utilizada da mesma forma que antes, porém essa distância não será mais um fator condicionante do projeto geométrico, mas sim uma condição necessária para que um veículo autônomo realize uma manobra de ultrapassagem sobre um veículo comum.

Na adequação de modelo proposta, portanto, apenas a distância de visibilidade de parada deve ter seu propósito e seu procedimento de cálculo mantido, já que sua determinação ainda apresenta importantes aplicações práticas sobre o projeto geométrico.

5.2.5 Valores Limites para Alinhamento Vertical

O estabelecimento de DVPs adaptadas para veículos autônomos permite o desenvolvimento de mais uma etapa relevante da adequação, que é a identificação de novas correlações entre comprimentos de curva vertical e velocidades praticadas. Com isso, são dois os benefícios esperados: o projeto de curvas verticais um pouco mais acentuadas para uma mesma velocidade de projeto ou operacional; a passagem por uma mesma curva vertical com velocidades superiores, aspecto extremamente útil no tráfego de veículos autônomos sobre rodovias pré-estabelecidas. Essas correlações adaptadas permitem, de forma geral uma redução nos tempos de viagem, com o aumento da velocidade média praticada.

Para realizar a adequação é necessário, novamente, pensar na operação rodoviária. Iniciando o estudo pelas curvas verticais convexas deve-se considerar, como já foi feito no cálculo da DVP, que são dois os possíveis agentes que identificam as situações de perigo na rodovia: os veículos, por meio de seus sensores, ou a infraestrutura, por meio de suas câmeras. A suposição é que ambos os agentes serão responsáveis por identificar os riscos, de forma que as distâncias de visibilidade de parada ainda têm sua importância na restrição do projeto geométrico, impondo valores limites para o projeto de curvas verticais.

É necessário propiciar aos sensores de um veículo que se aproxima de uma curva vertical convexa as condições de visibilidade suficientes para que este possa identificar algum objeto estranho no trecho. Para efeitos práticos de cálculo, pode-se supor que esses sensores estejam posicionados sobre os veículos, o que corresponde a uma altura de aproximadamente 1,40 metros. A altura do objeto a ser observado pode ser mantida como 0,60 metros.

Nesse cenário, utilizando as novas distâncias de visibilidade de parada de veículos autônomos, apresentadas na Tabela 19, pode-se estimar valores mínimos para as curvas verticais convexas, utilizando as Equações 8, 9, 10 e 11. Os valores, em comparação aos adotados atualmente, são apresentados na Tabela 20.

Tabela 20 – Comprimentos mín. de curva vertical convexa para veículos comum e autônomo

Veículos Comuns									
V (km/h)	30	40	50	60	70	80	90	100	110
DV (m)	35	50	65	85	105	130	160	185	220
A (%)	**Lmín (m)**								
0,0	18	24	30	36	42	48	54	60	66
1,0	18	24	30	36	42	48	54	60	66
2,0	18	24	30	36	42	48	54	60	111
3,0	18	24	30	36	42	49	101	151	221
4,0	18	24	30	37	50	96	156	208	294
5,0	18	24	32	46	78	128	195	260	368
6,0	18	25	39	60	100	154	233	312	441
7,0	18	29	45	76	117	180	272	364	515
8,0	19	33	51	88	134	205	311	416	588
9,0	21	37	58	99	151	231	350	468	662
10,0	23	41	64	110	168	257	389	520	736
11,0	25	45	71	121	184	283	428	572	809
12,0	28	49	77	132	201	308	467	624	883
Veículos Autônomos									
V (km/h)	30	40	50	60	70	80	90	100	110
DV (m)	19	29	42	58	75	95	117	141	168
A (%)	**Lmín (m)**								
0,2	18	24	30	36	42	48	54	60	66
1,0	18	24	30	36	42	48	54	60	66
2,0	18	24	30	36	42	48	54	60	66
3,0	18	24	30	36	42	49	63	77	93
4,0	18	24	30	37	50	66	83	103	144
5,0	18	24	32	46	63	82	104	129	184
6,0	18	25	39	56	76	99	125	156	221
7,0	18	29	45	65	88	115	146	182	258
8,0	19	33	51	74	101	132	167	209	295
9,0	21	37	58	83	113	148	188	235	331
10,0	23	41	64	93	126	165	208	261	368
11,0	25	45	71	102	139	181	229	287	405
12,0	28	49	77	111	151	198	250	313	442

Legenda	
	Critério do comprimento mínimo de curvatura
	Critério da máxima aceleração centrífuga radial
	Critério da distância de visibilidade de parada para L ≤ D
	Critério da distância de visibilidade de parada para L ≥ D

É considerada neste caso a situação de greide nulo, ou seja, a mínima declividade da curva equivale a 0%. Pode-se observar que os valores foram classificados conforme os critérios que levaram à sua obtenção, que podem ser: limite mínimo total de comprimento da curva, que corresponde a aspectos estéticos, principalmente, máxima aceleração centrífuga radial e condições de visibilidade propiciadas pela DVP.

Comparando os resultados obtidos para a operação atual e a operação futura fica evidente que, na adequação proposta para veículos autônomos, as condições de visibilidade perdem espaço no projeto das curvas verticais convexas, limitando-se as situações em que este será o fator limitante do projeto. Os valores em que isso acontece estão indicados em azul.

Por outro lado, nota-se um leve aumento dos valores limitados pelo critério estético, representados em verde, e um expressivo aumento de valores limitados pelo critério do conforto, relativo à máxima aceleração centrifuga na passagem pela curva, representados em laranja. Neste estudo ainda se considerou o limiar máximo para essa aceleração, equivalente a 0,3 m/s².

Para ilustrar melhor os benefícios do novo modelo, elaborou-se o Gráfico 3, que compara os valores obtidos no modelo atual de cálculo e no modelo adaptado. Os traços em vermelho, relativos aos valores associados aos veículos comuns, são os mesmos que aparecem no manual do DNIT (2010) e estão apresentados no Gráfico 1. Os traços destacados em azul representam a operação dos veículos autônomos. O gráfico deixa claro o benefício gerado pela evolução tecnológica.

Por exemplo, ao construir uma curva convexa que ocasionará uma variação no greide da ordem de 3%, para uma velocidade prevista de 100 km/h, um veículo comum necessita que a curva seja construída com um comprimento total de aproximadamente 150 metros, enquanto que para um veículo autônomo apenas 75 metros bastam. Outra forma de se realizar esse cálculo é impondo que a curva já está construída. Suponha então que a curva pré-existente, que representa uma variação de greide de 4 %, possui uma extensão total de 150 metros. Um veículo autônomo poderia trafegar sobre a mesma em segurança com uma velocidade operacional de 100 km/h, enquanto que o motorista de um veículo comum necessitaria trafegar com uma velocidade limite de 80 km/h.

Tabela 21 – Comprimentos mín. de curva vertical côncava para veículos comum e autônomo

Veículos Comuns – Modelo Atual									
V (km/h)	30	40	50	60	70	80	90	100	110
DV (m)	35	50	65	85	105	130	160	185	220
A (%)	**Lmín (m)**								
0,0	18	24	30	36	42	48	54	60	66
1,0	18	24	30	36	42	48	54	60	66
2,0	18	24	30	36	42	48	54	60	66
3,0	18	24	30	36	48	69	94	115	144
4,0	18	26	43	66	88	117	150	179	218
5,0	22	41	61	87	113	147	189	223	273
6,0	30	51	73	104	136	177	226	268	327
7,0	35	59	85	121	159	206	264	313	382
8,0	40	68	97	139	181	236	302	358	436
9,0	46	76	110	156	204	265	340	402	491
10,0	51	85	122	173	227	295	377	447	545
11,0	56	93	134	191	249	324	415	492	600
12,0	61	102	146	208	272	353	453	536	654

Veículos Autônomos – Modelo Proposto									
A (%)	**Lmín (m)**								
0,0	18	24	30	36	42	48	54	60	66
1,0	18	24	30	36	42	48	54	60	66
2,0	18	24	30	36	42	48	54	60	66
3,0	18	24	30	36	42	49	63	77	93
4,0	18	24	30	37	50	66	83	103	124
5,0	18	24	32	46	63	82	104	129	156
6,0	18	25	39	56	76	99	125	154	187
7,0	18	29	45	65	88	115	146	180	218
8,0	19	33	51	74	101	132	167	206	249
9,0	21	37	58	83	113	148	188	231	280
10,0	23	41	64	93	126	165	208	257	311
11,0	25	45	71	102	139	181	229	283	342
12,0	28	49	77	111	151	198	250	309	373

Legenda	
	Critério do comprimento mínimo de curvatura
	Critério da máxima aceleração centrífuga radial
	Critério da distância de visibilidade de parada para L ≤ D
	Critério da distância de visibilidade de parada para L ≥ D

Caso a infraestrutura em algum momento obtenha controle total sobre as interferências indesejadas na via, não sendo mais necessário prever visibilidade aos sensores dos veículos, o critério da distância de visibilidade será completamente substituído pelos critérios de estética e conforto no projeto de curvas convexas. Para as curvas côncavas, porém, essa consideração já pode ser realizada.

Isso porque a restrição de visibilidade em curvas verticais côncavas é admitida sob a alegação de que o farol do veículo, no período noturno, só é capaz de iluminar até uma determinada extensão da via, de forma que um objeto que se encontra para além dessa extensão não poderá ser observado. Entretanto, na operação autônoma, os sensores devem ser capazes de captar os objetos em condição diurna ou noturna, ou seja, a falta de iluminação não é fator limitante ao funcionamento dos sensores, assim como ocorre com a visão humana. Neste caso, também não há nenhuma obstrução física do campo de visão. Conclui-se, portanto, que o projeto de curvas côncavas não deve respeitar o critério das condições de visibilidade, bastando o atendimento aos demais critérios.

Esta consideração leva a reduções de comprimentos de curva de vulto maior. Para exemplificar, a operação de veículos comuns sobre uma curva vertical com variação de 5% a uma velocidade de 110 km/h requer uma extensão total de 270 metros, enquanto que as mesmas condições impostas a um veículo autônomo resultam em um comprimento de curva necessário de apenas 160 metros. A Tabela 21 e o Gráfico 4 expressam esses resultados, simulando a adequação para curvas côncavas assim como se fez para as convexas, utilizando dos mesmos valores adotados.

Ainda em relação ao alinhamento vertical vale o comentário de que, apesar do estabelecimento de novos parâmetros de curvatura e o favorecimento promovido pelas velocidades variáveis na aproximação das curvas serem fatores que abririam uma série de oportunidades na definição do traçado da rodovia, não há como prever o tráfego de veículos sobre declividades muito elevadas, de forma que isso acaba se tornando um limitante importante de projeto.

Gráfico 3 – Comprimentos mínimos de curvas verticais convexas para veículos comuns e autônomos

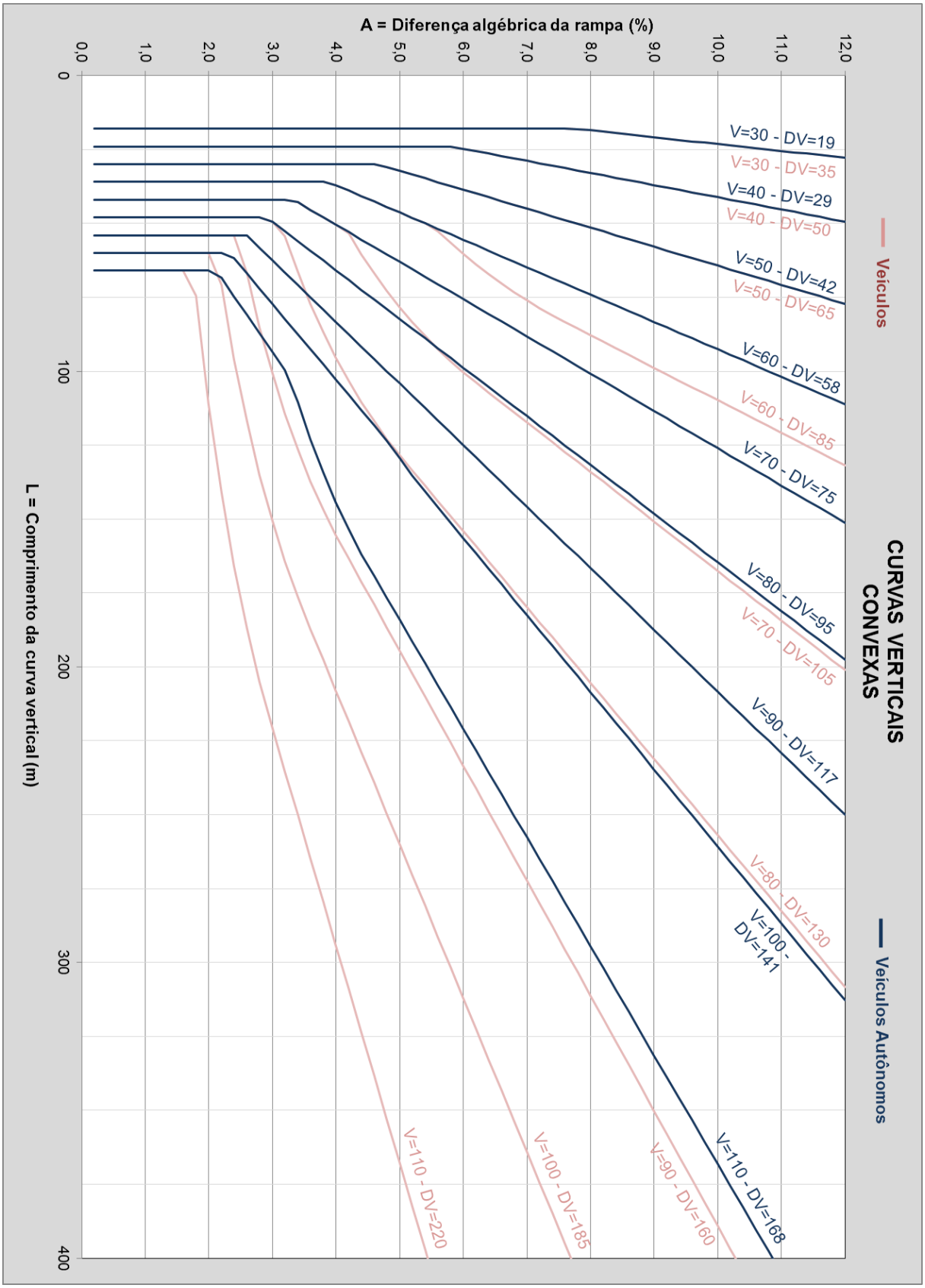
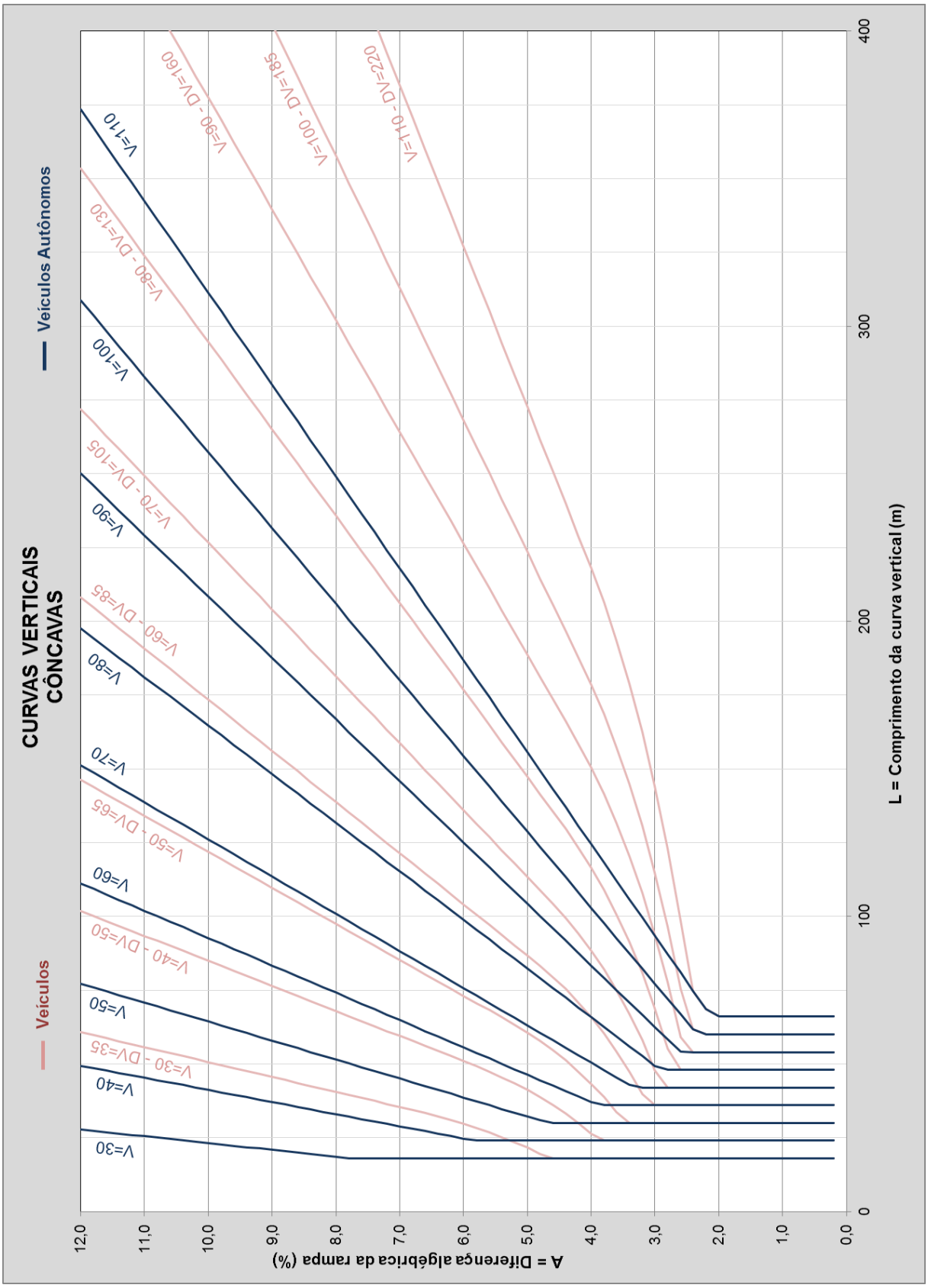


Gráfico 4 – Comprimentos mínimos das curvas verticais côncavas para veículos comuns e autônomos



5.2.6 Valores Limites para Alinhamento Horizontal

A adequação que recai sobre os elementos do alinhamento horizontal é muito mais processual do que numérica, já que resultará de uma adequação no processo de projeto, que permite que se construam curvas com comprimentos de raios menores, quando conveniente, prevendo que o sistema reduzirá a velocidade dos veículos que se aproximam dessa curva. Não sendo possível afirmar que haverá qualquer alteração sobre as condições de aderência radial, as relações de velocidade, raio mínimo e superelevação máxima, apresentadas na Tabela 14, podem ser mantidas.

É conveniente que as superelevações adotadas para as curvas se aproximem dos limites máximos impostos às rodovias, levando-se em conta as possíveis restrições que possam se apresentar (como dificuldades construtivas, ausência de curvas de transição, tráfego em velocidade reduzida, etc.). Isso porque, tomando como referência o raio de curvatura estabelecido, quanto maior for o valor da superelevação, maior a velocidade operacional que se pode impor aos veículos autônomos na curva. A adoção desse critério sobre as curvas da rodovia permite uma redução substancial no tempo total de viagem, pois resultaria em uma velocidade média de viagem superior.

Assim como na aproximação das curvas verticais convexas, as novas condições de visibilidade requeridas em projeto devem causar efeito sobre os valores de afastamento mínimo do bordo do acostamento. Isso porque, supondo que seja necessário garantir determinada DVP ao veículo, para que seus sensores consigam identificar um objeto estranho a uma distância segura à frente, os objetos ou estruturas posicionados nas adjacências da via são capazes de obstruir o campo de atuação dos sensores, gerando situações de risco para os usuários. A adequação desses parâmetros de projeto pode ser realizada de forma análoga à adequação dos valores de parâmetros de curvatura mínimos para curvas verticais convexas.

O principal benefício de se estudar a adequação nos afastamentos dos bordos dos acostamentos, concordando com as novas condições de visibilidade requeridas em projeto, é a possibilidade de se construir taludes laterais mais próximos à via e menos abatidos, quando necessário. Isso pode acarretar em uma redução expressiva das movimentações de terra. Deve-se respeitar, no entanto, a estabilidade geotécnica dos taludes e as condições gerais de transmissão de dados necessárias.

5.2.7 Redução das Larguras da Seção Transversal

A exclusão do papel do motorista, fruto da operação autoguiada do veículo, também é capaz de prover um maior controle do veículo em relação às faixas de tráfego, resultando em uma importante adequação: a redução da largura das faixas de rolamento. Ao fazer isso, reduz-se consideravelmente o custo de implantação da rodovia. Isso porque a redução de dezenas de centímetros de cada faixa de tráfego, quando ampliada para a rodovia inteira, equivale a uma economia expressiva em material.

Além disso, a utilização de uma faixa de rolamento menor permitiria, em alguns casos, uma economia significativa na manutenção das vias. No caso de rodovias pré-existentes de múltiplas faixas talvez fosse possível, por exemplo, aumentar o número de faixas de tráfego, distribuindo a passagem dos veículos em um número maior de faixas, o que ocasionaria um desgaste menor do pavimento, resultando ainda em um acréscimo na capacidade da via. A redução do congestionamento também leva a uma série de benefícios. São exemplos o aumento da qualidade de vida da população, a redução da emissão de poluentes e a redução das perdas monetárias dos governos em razão do tráfego rodoviário.

Conforme destacado anteriormente, hoje se trabalha com larguras de faixas de tráfego recomendadas que variam de 3,0 a 3,6 metros nas rodovias rurais e de 3,3 a 3,6 metros nas rodovias urbanas, ao mesmo tempo em que a maior largura definida para os veículos de projeto corresponde a 2,6 metros. Enquanto não se julga possível estabelecer que haja uma mudança no veículo de projeto – embora ela provavelmente deva ocorrer – pode-se reduzir a margem de segurança imposta sobre essa largura do veículo, tendo como resultado um valor reduzido da faixa de rolamento. Porém, há ainda mais um fator a se avaliar.

Um dos principais motivos porque não se recomenda a redução das larguras dos elementos da seção transversal atualmente é a perda de capacidade promovida na via, reflexo da redução natural da velocidade operacional impostas pelos motoristas, em razão da falta de conforto e sensação de insegurança ao se trafegar muito rápido em uma faixa estreita. Entretanto, no sistema autônomo, no qual se prevê o controle absoluto da velocidade operacional e do alinhamento em relação à faixa de tráfego, não deve haver perda de capacidade, pois as velocidades podem ser

mantidas independentemente da largura da pista. Essa redução, portanto, torna-se plausível.

A redução na largura das faixas de tráfego deve sofrer redução de algumas poucas dezenas de centímetros apenas, em razão da margem de erro no direcionamento horizontal dos veículos. Recomenda-se também a previsão de superlargura nas curvas horizontais, levando em conta o desenvolvimento do veículo de projeto ao realizar a manobra.

5.2.8 Aspectos Ligados ao Tráfego de Veículos Comuns

Conforme se destacou anteriormente, o sistema previsto para as rodovias a serem projetadas sob os critérios aqui estabelecidos, deve ser permissivo em relação à entrada de veículos, desde que esses trafeguem na via sob critérios especiais de projeto. Essa seria uma forma de se promover a mudança no projeto geométrico rodoviário, antecipando um cenário em que todos os veículos seriam autônomos, ao qual não estamos distantes, mesmo antes de se ter as tecnologias 100% consolidadas dentro do mercado. Ou seja, a adoção dos critérios especiais garante esse período de transição entre a disseminação dos sistemas inteligentes de transportes e a completa soberania dos veículos autônomos.

O primeiro e mais importante critério especial seria a operação com velocidades operacionais também variáveis, porém reduzidas. Haveria sinalizações em cada novo trecho da rodovia, ou até no painel do veículo comum, que indicariam ao motorista qual a velocidade operacional a que ele deveria obedecer naquele momento, em função, inclusive, das condições climáticas, assim como acontece com os veículos autônomos. Assim, fica garantida a segurança dos usuários, especialmente em relação à distância de visibilidade de parada (DVP).

Dessa maneira, a curva vertical pré-definida na escolha do traçado condicionaria a escolha das velocidades de operação tanto do veículo autônomo quanto do comum, de forma que a velocidade escolhida para cada um resultasse na mesma distância de visibilidade, em tempo seco ou chuvoso.

Por exemplo, ao analisar o Gráfico 3 é possível observar uma grande proximidade entre os valores de comprimentos mínimos calculados entre os seguintes pares de velocidades, relativos aos veículos comuns e autônomos respectivamente:

(80;100) e (90;110)[21], em quilômetros por hora. Essa proximidade resulta de uma coincidência, resultando dos elementos adotados para a realização da adequação como, por exemplo, o posicionamento dos sensores de identificação de ameaças no topo do veículo, a escolha de 1,0 segundos para o período de processamento do sistema operacional dos veículos autônomos e a adoção de uma limitação na aceleração centrífuga radial da ordem de 0,3 m/s².

Todavia, supondo que o projeto de uma rodovia no futuro leve a um gráfico com características semelhantes, onde as taxas de variação das curvas são adequadas para veículos comuns com velocidades inferiores em aproximadamente 20 km/h em comparação aos veículos autônomos Tais velocidades poderiam ser colocadas como velocidades limites para os veículos comuns que desejam trafegar na rodovia.

Ou seja, enquanto o veículo autônomo trafega hipoteticamente a uma velocidade de 110 km/h sobre um determinado trecho em tangente, o motorista do veículo comum que se dispor a utilizar a rodovia teria que guiar seu veículo a uma velocidade de 90 km/h. Ao se aproximar de uma curva vertical convexa o veículo autônomo assume uma velocidade de 100 km/h, enquanto que o veículo comum reduz sua velocidade para 80 km/h, de forma que ambos adequam suas velocidades à DVP fornecida pela curva.

O sucesso dessa operação, no entanto, depende da completa obediência do veículo comum em relação às velocidades impostas. Imagina-se que até este momento no tempo não seja mais necessária a instalação de radares em locais pontuais apenas, sendo possível rastrear a movimentação dos veículos e identificar suas velocidades a todo instante. Assim poderia ser feito um controle intensivo das velocidades dos veículos, de forma que o motorista que supere a velocidade estabelecida esteja sujeito a multas.

Outro importante critério, para garantir a eficiência na operação viária, refletida na manutenção da capacidade da via, seria a operação do veículo comum apenas na faixa da direita. Assim, a operação da via não é tão prejudicada pelo tráfego desordenado resultante do comportamento humano, e impede-se que se forme congestionamento nas faixas dedicadas à operação autônoma. Inclusive, sobre as rodovias existentes, onde já foi realizado o investimento em infraestrutura, cabe o estudo sobre a operação dos veículos autônomos em pistas exclusivas.

[21] Foram calculados os comprimentos para velocidades até 110 km/h. É possível que, caso o estudo levasse em conta velocidades maiores, essa correlação pudesse ser continuamente observada.

5.2.9 Questões em Aberto no Desenvolvimento do Método

Há uma série de questões que, devido à complexidade do assunto, ou por se julgar que ainda é cedo para proceder com a análise, considera-se conveniente eliminar do estudo de adequação.

Uma delas, citada na subseção anterior, é o impacto que teria a admissão de veículos comuns sobre a capacidade da via e a possibilidade de se gerar congestionamento, problema para o qual se sugeriu a operação em faixas exclusivas. O mesmo vale para os veículos pesados ou veículos mais antigos, que muitas vezes não podem atingir as velocidades operacionais desejadas. Mais à frente está apresentado um estudo da operação de veículos autônomos que leva em conta a operação sobre faixas exclusivas, mas seu impacto sobre o projeto geométrico não é contemplado. Fica como sugestão para um estudo posterior.

Outra questão importante, que também diz respeito à capacidade da via, é a distância que cada veículo deve manter do veículo da frente na operação. Embora tenha se falado em variar as distâncias proporcionalmente às velocidades praticadas, no intuito de fornecer o mesmo escoamento em todas as seções transversais, em nenhum momento se faz uma estimativa numérica fundamentada em cima deste parâmetro.

A um leitor desavisado, pode parecer conveniente a adoção da DVP para o distanciamento promovido entre os veículos na operação, em função da velocidade. Entretanto, ao realizar essa consideração, o leitor ignora o fato de que o veículo à frente, ao identificar uma situação que requer a imobilização, também inicia o processo de frenagem e só chegará à completa parada após certa distância. Assim, o veículo de trás possuirá essa mesma distância e mais o distanciamento de segurança inicial para realizar sua parada. Caso a inteligência do sistema fosse capaz de prever uma reação quase imediata do veículo de trás quando da desaceleração do veículo à frente, essa distância entre os veículos poderia ser encurtada o tanto quanto possível.

A observação só se justificaria na ocasião de algum objeto que se desprenda do veículo à frente e sofra uma desaceleração repentina e brusca. Neste caso, a utilização da DVP seria suficiente para garantir a segurança dos usuários do veículo de trás. Porém, a aplicação prática desse valor se demonstra inconveniente. Por

exemplo, ao adotar uma distância entre veículos de 141 metros para uma velocidade praticada de 100 km/h, chega-se a um *headway time* de 5,08 segundos, muito distante dos valores adotados hoje em dia para representar o comportamento geral dos motoristas, que giram em torno de 1,0 segundo.

Apesar de se julgar muito relevante para a operação a introdução desse valor, não se julga possível ou seguro estimar um valor desse distanciamento com as informações disponíveis. Fica como sugestão, todavia, a consideração do breve intervalo de processamento do sistema ao definir esse valor, que pode ocasionar uma aproximação indesejada entre os veículos, o que necessariamente demandará uma folga considerável entre os mesmos.

Por último, o estudo não contempla qual a velocidade que deve ser praticada em trecho reto. Quanto maior a velocidade praticada nesses trechos, menor o tempo de viagem, e são poucos os fatores que podem limitar a velocidade máxima a ser atingida em trecho reto – apenas fatores como a estabilidade geral e a potência dos veículos. Não há, porém, elementos suficientes nesse estudo que permitam a obtenção dessas velocidades.

5.3 Considerações Finais

Ao realizar uma avaliação completa dos parâmetros associados ao projeto rodoviário, percebe-se uma dependência significativa em torno de um dos elementos de projeto: a velocidade de projeto. Quase todos os outros parâmetros de projeto são influenciados pela escolha deste elemento, de forma que a solução adotada para o traçado e para as características geométricas da via nem sempre é a mais adequada em termos financeiros e ambientais.

A introdução de uma velocidade operacional variável busca justamente fornecer ao projetista melhores condições para o desenvolvimento do traçado, permitindo em alguns casos a escolha de características geométrica levemente desfavoráveis, com a premissa de que as velocidades serão reduzidas nas aproximações das curva. O processo de adequação, no entanto, não pode deixar de lado a segurança dos usuários, a eficiência do tráfego e, principalmente, o principal benefício garantido pela operação autônoma, que é o conforto da direção automática providenciado aos usuários.

A velocidade operacional seria então definida trecho por trecho, em respeito às condições fornecidas pela via e às condições climáticas. O tipo de operação desenvolvido ainda possibilita adequações importantes em relação aos parâmetros geométricos, especialmente em relação às curvas verticais e às larguras da seção transversal. Em situações de demanda equivalente ou superior à capacidade é importante que se realize controle de acesso e que as distâncias que os veículos mantêm entre si sofram reduções proporcionais às reduções de velocidade na aproximação das curvas, para garantir que o mesmo fluxo seja escoado em todas as seções e não ocorra a formação de filas.

Ao longo de todo o processo de adequação foi necessária a reflexão acerca do tipo de sistema autônomo atuante. Algumas das reflexões mais relevantes dizem respeito ao agentes que determinarão as velocidades dos veículos, ao que se conclui que os veículos devem ter as velocidades operacionais pré-estabelecidas por trecho, antes até de adentrar a via, restando à infraestrutura e aos próprios veículos trabalharem de forma conjunta para alertar para a redução das velocidades operacionais em situações operacionais especiais ou desfavoráveis em relação ao clima. Os veículos possuem sensores embarcados que podem exercer essa função,

enquanto a infraestrutura contempla um sistema de monitoramento por câmeras espalhadas por toda a extensão rodoviária.

O projeto da nova rodovia ainda deve prever a operação de veículos comuns (em escala bem reduzida), a qual deve ocorrer sob critérios especiais de projeto. Esses critérios são a operação com velocidades reduzidas e o tráfego em faixa exclusiva à direita, principalmente. A operação de veículos pesados, que não chegam às velocidades operacionais desejadas, também pode ser realizada da mesma forma.

Espera-se que o custo de instalação de um sistema autônomo seja recompensado pela economia no investimento na construção. Além disso, espera-se que o custo de manutenção do sistema também seja acobertado pela economia promovida na redução dos acidentes, por exemplo. Parte da relevância de se estudar um novo modelo de projeto consiste na possibilidade de se tornar viável o desenvolvimento de infraestrutura em regiões subdesenvolvidas, devido ao custo reduzido de construção de rodovias nessas condições.

A próxima seção se propõe a estudar aspectos mais operacionais dos veículos inteligentes, avaliando inclusive a interação com os veículos comuns na operação sobre rodovias pré-estabelecidas.

6 SIMULAÇÃO DE TRÁFEGO

6.1 Introdução

Analisadas as tecnologias que estão sendo desenvolvidas e implementadas ao redor do mundo, surge a questão de como as mesmas afetarão nosso dia a dia. Com esse intuito, esse capítulo visa o estudo do impacto dessas tecnologias na capacidade de uma via através da simulação de um trecho genérico utilizando o software Vissim 8.0, sob licença estudantil.

Para a escolha do traçado foi levado em conta que o mesmo deveria ser uma situação recorrente nas rodovias com grande volume de tráfego, como as rodovias estaduais paulistas. Dessa forma, optou-se por uma rodovia de quatro faixas, que após o gargalo, seja devido a um acidente ou a um simples estreitamento, se transforma em três faixas. O objetivo dessa simulação foi comparar a capacidade obtida para veículos comuns com a capacidade obtida com a utilização de ITS.

Além disso, uma das grandes discussões apresentadas atualmente envolve a forma como a implantação desses sistemas inteligentes poderia ocorrer. Uma delas defende que os veículos que utilizam ITS deveriam possuir faixas exclusivas para trafegar e a outra que deveriam ficar dispersos em meio aos veículos comuns. Optou-se por realizar simulações de implantação em três modelos: o primeiro com a utilização de uma faixa exclusiva à esquerda, com três faixas destinadas aos veículos comuns se transformando em duas; o segundo com a utilização de duas faixas exclusivas à esquerda, com duas faixas destinadas aos veículos comuns se transformando em uma; e o terceiro com os veículos com ITS misturados aos veículos comuns, não havendo nenhuma separação entre os mesmos. O estudo foi realizado para entender o efeito do aumento do número de veículos ITS e, portanto, foram realizadas simulações desde 0% de veículos utilizando ITS até 100% dos veículos utilizando ITS, nos 3 modelos. O passo incremental de veículos ITS é 10%.

6.2 Simulação com *Software*

6.2.1 *Software* Vissim

Definida a relevância de uma simulação para o entendimento do impacto da implantação do ITS em uma rodovia, iniciou-se um estudo para definir qual Software seria utilizado. Durante a pesquisa foram encontrados dois tipos de softwares, macrossimuladores e microssimuladores

Os macrossimuladores são modelos mais simplistas, em que apenas os comportamentos das correntes veiculares são levados em conta e a interação individual entre veículos é ignorada. Já os microssimuladores se caracterizam por serem mais complexos, com um grande número de parâmetros modificáveis, utilizados para calcular a trajetória de cada veículo individualmente, como posição, velocidade e aceleração, permitindo que sejam estudadas as interações entre os mesmos.

Como o estudo pretendido visa a alteração dos comportamentos individuais e da forma como os veículos interagem entre si, optou-se por se utilizar um microssimulador amplamente conhecido no mercado, chamado Vissim. Nesse software, o comportamento individual dos veículos é estabelecido por três algoritmos distintos: *car-following*, *lane-changing* e *gap-acceptance*.

O algoritmo de *car-folowing* é responsável por modelar o comportamento de um veículo quanto as interações longitudinais, estabelecendo limites quanto à distância de percepção dos demais veículos e delimitando quando e quais atitudes devem ser tomadas, como aceleração, desaceleração moderada ou desaceleração emergencial.

Há dois modelos possíveis utilizados no software, o modelo Wiedemann-74 (W74) e o modelo Wiedemann-99 (W99). PTV (2010), fabricante do software, recomenda que o modelo W74 seja utilizado em modelagens com tráfego urbano e o W99 em tráfego rodoviário, porém, não apresenta justificativas para tais usos. Uma pesquisa mais detalhada nos permitiu perceber que o W74 se trata de um modelo de *car-following* onde apenas três parâmetros podem ser alterados, não sendo possível alterar os parâmetros que definem os limites SDV, SDX, CLDV e OPDV, definidos mais à frente nesse capítulo.

Portanto, foi escolhido utilizar o modelo W99, cujos parâmetros, segundo PTV (2010), são apresentados a seguir:

- CC0 (*Standstill distance*): Distância entre a frente do veículo perseguidor e a parte de trás do veículo perseguido quando ambos estão completamente parados. O valor de referência para esse parâmetro é de 1,5m.
- CC1 (*Headway time*): Distância, medida em tempo, entre o veículo perseguidor e o perseguido. É definido como o tempo necessário para o veículo perseguidor atingir a posição do veículo perseguido no momento inicial. Segundo a PTV, quanto maior o valor, mais cauteloso o motorista. O valor de referência para esse parâmetro é de 0,9s.
- CC2 (*'Following' Variation*): Esse parâmetro define qual a variação em metros entre a distância mínima que o veículo deve permanecer do veículo perseguido, definida como CC0+CC1*(velocidade do veículo perseguidor), e a distância máxima, onde ainda se considera que o veículo está em perseguição. O valor de referência para esse parâmetro é de 4,0m.
- CC3 (*Threshold for entering 'Following'*): Esse parâmetro define quantos segundos são necessários, antes de se atingir a distância de segurança [CC0+CC1*(velocidade do veículo perseguidor)], para que se inicie o processo de frenagem. Está muito relacionado com o momento em que o motorista percebe um veículo à frente. O valor de referência para esse parâmetro é de -8,0s.
- CC4 (*Negative 'Following' threshold*): Controla a diferença de velocidade negativa em relação ao veículo perseguido. Valores com módulos mais baixos definem um motorista mais sensível às mudanças de velocidade do veículo perseguido. O valor de referência para esse parâmetro é de -0,35 m/s.
- CC5 (*Positive 'Following' threshold*): Controla a diferença de velocidade positiva em relação ao veículo perseguido. Valores com módulos mais baixos definem um motorista mais sensível às mudanças de velocidade do veículo perseguido. O valor de referência para esse parâmetro é de 0,35 m/s.
- CC6 (*Speed dependency of oscillation*): É definido como a influência da distância na oscilação da velocidade. Para o valor zero significa que a oscilação de velocidade é independente da distância, para valores maiores a oscilação

da velocidade passa a aumentar conforme o aumento da distância. O valor de referência para esse parâmetro é de 11,44.

- CC7 (*Oscillation acceleration*): É a oscilação durante a aceleração. O valor de referência para esse parâmetro é de 0,25m/s².
- CC8 (*Standstill acceleration*): É a aceleração desejada quando o veículo está parado e inicia o movimento. Seria a aceleração utilizada na arrancada. O valor referência para esse parâmetro é de 3,5m/s².
- CC9 (*Acceleration at 80 km/h*): É a aceleração desejada quando o veículo se encontra a uma velocidade de 80 km/h. O valor referência para esse parâmetro é de 1,5m/s².

Além das definições sobre os parâmetros apresentada anteriormente, PTV (2010) também define quatro diferentes estados de comportamento, sendo eles:

- Condução Livre: Consiste no estado de comportamento em que não há influência de nenhum veículo à frente. Em outras palavras, o veículo tende a manter a velocidade desejada, com pequenas variações devido ao modelo, sem que sofra interferência dos demais veículos.
- Aproximação: É o estado no qual o veículo perseguidor percebe um veículo à frente, passando a sofrer alguma influência em sua velocidade, desacelerando moderadamente para atingir uma velocidade mais baixa, próxima do veículo perseguido.
- Perseguição: Caracteriza-se pelo estado em que o motorista segue o veículo à frente, procurando se manter a uma certa distância do mesmo, acelerando quando começa a se distanciar e desacelerando quando fica muito próximo.
- Frenagem: Esse estado é desencadeado quando o veículo atinge uma distância menor que a distância de segurança desejada, aplicando desacelerações de moderadas a elevadas, para retomar a distância de segurança definida.

Visto esses conceitos, pode-se definir os limites utilizados pelo modelo para se realizar cada um desses 4 comportamentos. As Equações 14 a 19 a seguir são representam os limiares utilizados pelo software segundo Aghabayz et al. (2013):

$$AX = L + CC0, \tag{14}$$

Onde:

AX, distância desejada entre dois veículos (m);

L, comprimento do veículo líder (m).

$$BX = AX + CC1\ x\ v, \tag{15}$$

Onde:

v, velocidade do veículo em questão (m/s);

BX, distância de segurança desejada (m).

$$SDX = BX + CC2, \tag{16}$$

Onde:

SDX, distância máxima em que ainda é considerado que o veículo está em processo de perseguição (m).

$$SDV = -\frac{\Delta x - SDX}{CC3} - CC4, \tag{17}$$

Onde:

Δx, distância entre o veículo perseguidor e o veículo perseguido (m);

SDV, é a diferença de velocidades em função da distância entre os veículos, definindo o limite a partir do qual o veículo que está seguindo nota o veículo à frente (m/s).

$$CLDV = \frac{CC6}{17000x(\Delta x - L)^2} - CC4, \tag{18}$$

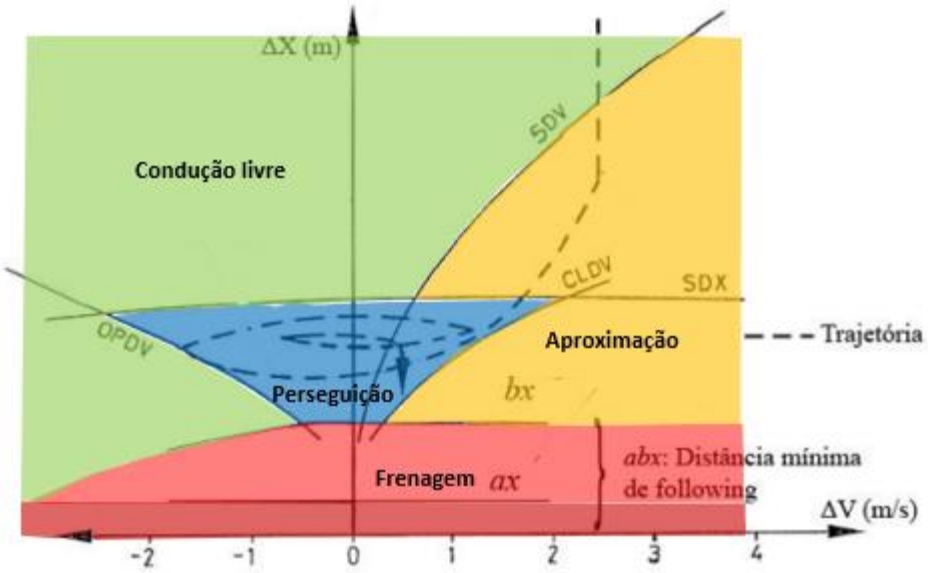
$$OPDV = -\frac{CC6}{17000x(\Delta x - L)^2} - \delta x CC5, \tag{19}$$

Onde:

$CLDV\ e\ OPDV$, limiares onde o veículo, em estado de perseguição, percebe que a distância entre os veículos está diminuindo ou aumentando, respectivamente. δ é igual a um se a velocidade do veículo em questão for maior que CC5 e zero se for menor ou igual.

A Figura 15 exemplifica de forma mais adequada o comportamento devido aos limiares.

Figura 15 – Limites utilizados no VISSIM e comportamentos esperados



Fonte: Adaptada de Wiedemann e Reiter, 1992

No gráfico, é demonstrada a trajetória pontilhada de um veículo que se aproxima de outro com diferença de velocidade Δv, em um estado de comportamento de **"Condução livre",** no qual mantém a velocidade que deseja. Ao atingir o limiar SDV, o veículo passa a perceber o veículo predecessor, iniciando uma desaceleração moderada, é o estado comportamental de **"Aproximação"** definido no modelo. A diferença de velocidade continua a diminuir, porém ainda é positiva e o veículo se aproxima mais do veículo perseguido, até atingir o limiar CLDV, no qual reduz a velocidade com desaceleração um pouco mais acentuada. Nesse momento inicia-se o estado comportamental de **"Perseguição"**, no qual o veículo desacelera quando próximo a CLDV e acelera quando próximo a OPDV. Porém, caso não seja possível

respeitar esses limiares e o veículo se encontrar numa zona onde o Δx for menor que BX, o veículo passará a um estado de **"Frenagem"**.

Explicado o modelo de *car-following* do software, serão apresentados, a seguir, os modelos de *lane-change e gap-acceptance*. São modelos com diversos parâmetros, porém, testes iniciais mostraram que muitos deles não geravam nenhuma alteração nas capacidades medidas. Assim, optou-se por analisar apenas alguns desses parâmetros.

Segundo PTV (2010) o VISSIM apresenta dois modelos possíveis de mudança de faixa, são eles a "mudança de faixa necessária" e a "mudança de faixa livre". Como o próprio nome diz, o primeiro permite mudanças de faixa apenas quando necessário, como por exemplo no caso de um veículo que quer seguir uma rota e precisa realizar uma mudança. No caso do segundo modelo, escolhido para as simulações, é possível a mudança de faixa caso ela seja desejável, sem que haja uma necessidade. Um exemplo seria um caso onde uma pista está mais livre que as demais, ocasionando uma mudança de faixa do veículo devido a uma melhor condição de tráfego e não a uma necessidade.

Além dessa escolha ainda foram importantes para as análises os parâmetros a seguir:

- *Maximum deceleration for cooperative braking*: Se refere à máxima desaceleração que um veículo A pode ter para permitir que um veículo B realize a mudança de faixa, entrando na frente do veículo A. O seu valor referência para rodovias é -3,0 m/s².
- *Safety distance reduction factor*: Consiste em um fator de redução que multiplica a distância de segurança, aplicado apenas durante a mudança de faixas. Ele permite que o veículo que realiza a mudança de faixa esteja mais próximo do veículo da frente ou do veículo de trás, permitindo que o veículo realize a mudança de faixa em um intervalo menor de distâncias, ampliando as possibilidades de alteração de faixas. O seu valor referência é 0,6.

Além dos parâmetros apresentados anteriormente ainda há mais um que foi considerado nas simulações, chamado *meso reaction time*. Trata-se do tempo médio de reação considerado para cada veículo. Como o ITS afetaria drasticamente seu valor, foi considerado um parâmetro relevante para as simulações realizadas.

É importante ressaltar que existem outros parâmetros no software VISSIM, porém, não foi possível realizar um estudo detalhado de cada um, apenas dos parâmetros aqui apresentados.

6.2.2 Premissas e Lógica para as Simulações

Escolhido o Software a ser utilizado e estudado os parâmetros que o definem, iniciou-se a construção de um veículo ITS no mesmo. Um problema encontrado nessa etapa foi a falta de referências bibliográficas quanto à definição desses parâmetros para veículos ITS, fazendo com que se optasse pela linha de raciocínio mostrada a seguir.

Visto a problemática apresentada anteriormente, quanto à mobilidade urbana e ao tempo despendido no trânsito nas grandes rodovias, e as possíveis soluções que vêm sendo implantadas ao redor do mundo, com a utilização do ITS para melhorar a situação do tráfego, pode-se dizer que o objetivo dessa tecnologia, além de garantir maior segurança e conforto aos seus usuários, é o de buscar a eficiência operacional máxima do sistema.

A seguir são apresentados dois trechos que sustentam esse ponto de vista:

> “Aplicar Sistemas Inteligentes de Transporte aos sistemas arteriais permitem ao Departamento de Transporte do Texas aumentar significativamente a eficiência e melhorar a mobilidade no tráfego. ”. (Arterial Intelligent Transportation Systems—Infrastructure Elements and Traveler Information Requirements, Center for Transportation Research, The University of Texas, 2009, tradução nossa)

> “Os ITS estão focados na otimização e na eficiência dos sistemas de transportes, visando proporcionar o aumento de produtividade e do nível de segurança, a redução dos congestionamentos através da busca por rotas otimizadas e a coleta de informações precisas e com elevado grau de confiabilidade.” (SISTEMAS INTELIGENTES DE TRANSPORTE: UMA ABORDAGEM VOLTADA AO CONTEXTO, XXXIII ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUCAO, 2013)

Dessa forma, partindo-se do princípio que as aplicações e desenvolvimentos do ITS buscarão a eficiência operacional do transporte, optou-se por realizar exatamente o mesmo para se definir um veículo ITS no Software Vissim, através da busca pelos valores dos parâmetros que maximizassem a capacidade no modelo apresentado na Figura 16 e na Figura 17.

Figura 16 – Modelo simulado no Vissim

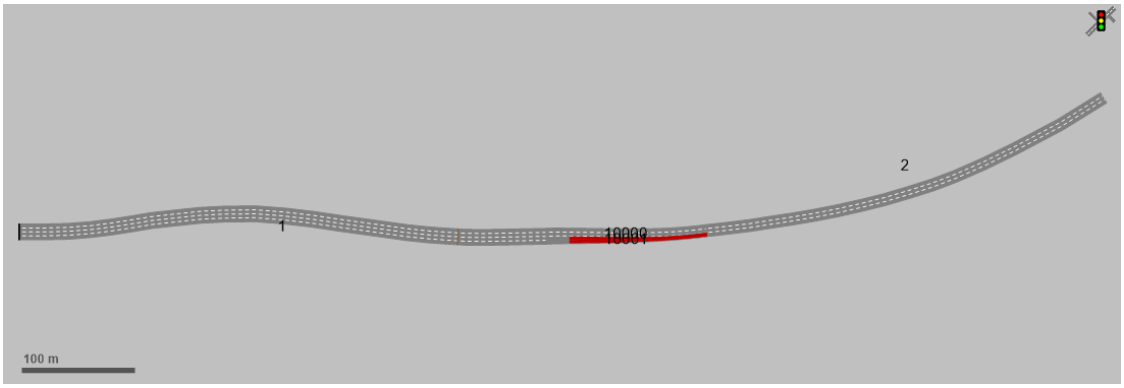
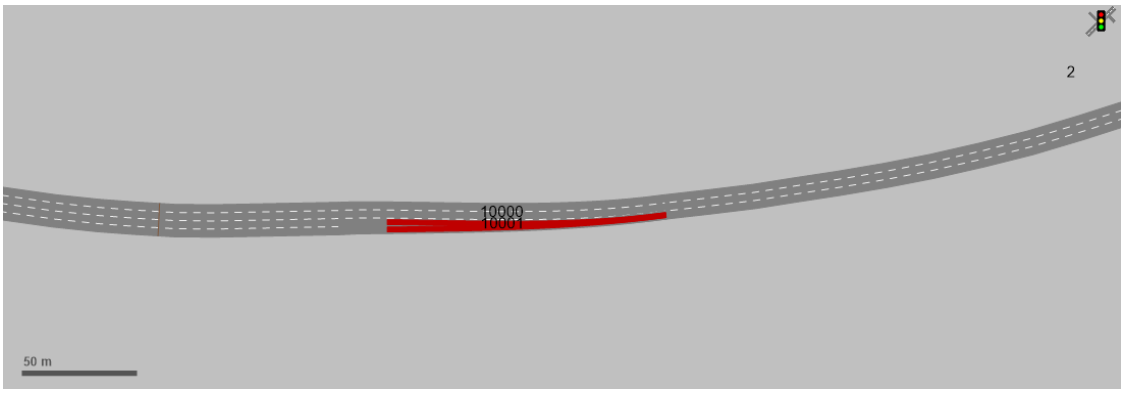


Figura 17 – Estreitamento de pista ampliado



Sendo assim, foram selecionados, entre os parâmetros apresentados anteriormente, 7 parâmetros do W99, sendo eles CC0, CC1, CC2, CC3, CC4, CC5 e CC6. Os parâmetros CC7, CC8 e CC9 não foram variados pois entende-se que tratam de parâmetros mais ligados à mecânica dos carros, não se alterando devido a aplicação de ITS. Além dos 7 parâmetros do W99, também sofreram alteração no estudo para definir o veículo ITS os parâmetros *maximum deceleration for cooperative braking, safety distance reduction fatcor* e *meso reaction time*.

Definidos os parâmetros a serem variados no estudo, procurou-se um intervalo adequado para cada um. Segundo estudos de calibração de CUNTO (2008) são apresentados, na Tabela 22, os valores possíveis para cada parâmetro proposto anteriormente.

Tabela 22 – Possíveis valores dos parâmetros do Vissim

Parâmetro	CC0 (m)	CC1 (s)	CC2 (m)	CC3 (s)	CC4 (m/s)	CC5 (m/s)	CC6 (s/un)	Meso Reaction Time (s)	Maximum deceleration for cooperative braking (m/s²)	Safety distance reduction factor (s/un)
Default	1,50	0,90	4,00	-8,00	-0,35	0,35	11,44	1,20	-3,00[22]	0,60
Inferior	0,50	0,20	1,50	-15,00	-2,00	0,10	2,00	0,20	-4,00	0,20
Superior	3,00	1,50	6,00	-2,00	-0,10	2,00	20,00	2,00	-9,00	0,80

Com o intuito de realizar uma análise criteriosa do comportamento da capacidade em relação a cada parâmetro, decidiu-se utilizar 10 valores, distribuídos entre os intervalos definidos por CUNTO (2008), como apresentados na Tabela 23.

Tabela 23 – Valores utilizados nas simulações do modelo

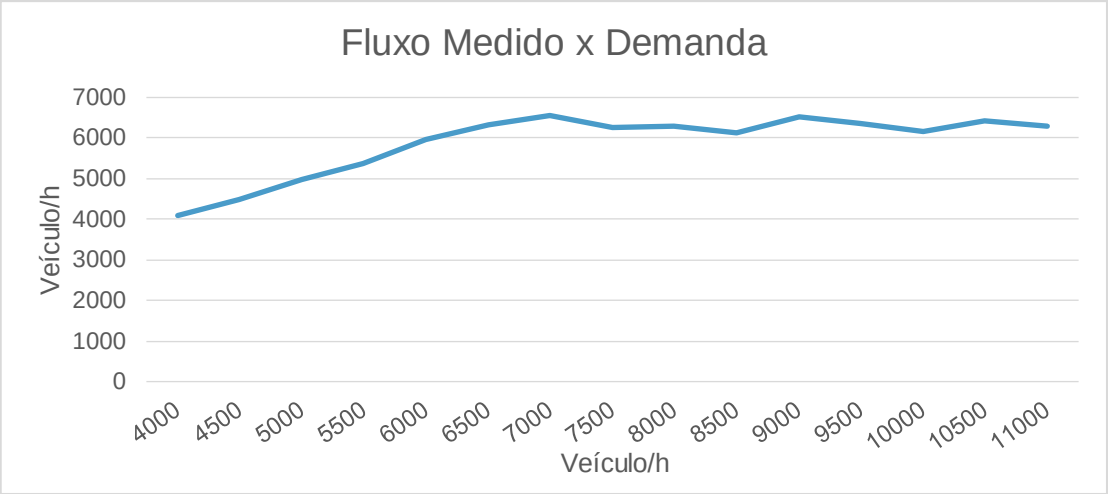
Parâmetro / Capacidade	Valor 01	Valor 02	Valor 03	Valor 04	Valor 05	Valor 06	Valor 07	Valor 08	Valor 09	Valor 10
CC0(m)	0,50	0,78	1,06	1,33	1,61	1,89	2,17	2,44	2,72	3,00
CC1(s)	0,20	0,34	0,49	0,63	0,78	0,92	1,07	1,21	1,36	1,50
CC2(m)	1,50	2,00	2,50	3,00	3,50	4,00	4,50	5,00	5,50	6,00
CC3(s)	-15,00	-13,56	-12,11	-10,67	-9,22	-7,78	-6,33	-4,89	-3,44	-2,00
CC4(m/s)	-2,00	-1,79	-1,58	-1,37	-1,16	-0,94	-0,73	-0,52	-0,31	-0,10
CC5(m/s)	0,10	0,31	0,52	0,73	0,94	1,16	1,37	1,58	1,79	2,00
CC6(s/un)	2,00	4,00	6,00	8,00	10,00	12,00	14,00	16,00	18,00	20,00
Meso Reaction Time(s)	0,20	0,40	0,60	0,80	1,00	1,20	1,40	1,60	1,80	2,00
Maximum deceleration for coop. braking (m/s²)	-9,00	-8,44	-7,89	-7,33	-6,78	-6,22	-5,67	-5,11	-4,56	-4,00
Safety distance reduction fator(s/un)	0,20	0,27	0,33	0,40	0,47	0,53	0,60	0,67	0,73	0,80

A busca pelo veículo ITS consistiu no estudo da variação da capacidade em relação a cada um dos parâmetros escolhidos, isoladamente. Dessa forma, para cada valor definido na Tabela 23, manteve-se os demais parâmetros com os valores da

[22] O valor *default* do parâmetro sugerido para rodovias é de -3,00m/s² e encontra-se fora do intervalo de valores sugerido por CUNTO (2008).

configuração referencial para rodovias e foram realizadas simulações, alterando-se os inputs de demanda, de 4000 veículos a 11000 veículos, em intervalos de 500 veículos, totalizando 15 simulações com resultados semelhantes ao Gráfico 5.

Gráfico 5 – Fluxo medido para configurações *Default*



A escolha pelos limites inferior e superior dos inputs de demanda ocorreu a partir dos resultados apresentados no Gráfico 5, obtido através de simulações com todos os parâmetros *default.* Como é visível, para valores de input menores que 6500 veículos o fluxo medido se aproxima muito da demanda utilizada, demonstrando um comportamento distante da capacidade. Dessa forma, optou-se por não realizar simulações entre 0 e 3500 veículos de input, pois resultariam em sete simulações a mais por valor de parâmetro testado, aumentando consideravelmente o número de simulações total sem impacto nos resultados.

Quanto ao limite superior, como a capacidade com parâmetros default ocorreu com um input de 7000 veículos e supondo-se que a capacidade não deveria aumentar mais que 50%, sugeriu-se um limite de 11000, imediatamente superior ao aumento de 50%. Essa hipótese mostrou-se consistente nas curvas obtidas através das simulações dos parâmetros, nas quais se percebe claramente um valor máximo, definido como capacidade, antes de uma estabilização dos fluxos medidos, definida como saturação, como é esperado em uma curva de Fluxo X Demanda.

É importante citar que a licença do software utilizada foi a estudantil, e o tempo máximo de teste estava limitado a 10 minutos. Porém, como no início da simulação ainda não há uma estabilização do fluxo, não se considerou integralmente os dados medidos. Através da observação de diversos testes notou-se que aos 5 minutos de

simulação o fluxo aparentava estar estabilizado, fato justificado por se tratar de um modelo simples, sem nenhuma intersecção ou entrelaçamento, e de extensão curta, apenas 1 km. Assim, definiu-se como intervalo de dados coletados a ser considerado o período de 5 a 10 minutos de simulação. Como os valores dos inputs de demanda são dados em veículos/hora, multiplicaram-se os dados obtidos no intervalo definido por 12, de forma a se obter e comparar fluxos horários.

Assim, definidos os limites e intervalos, obteve-se uma capacidade referente a alteração de cada valor simulado, permitindo uma curva de capacidade devido a alteração de cada um dos parâmetros.

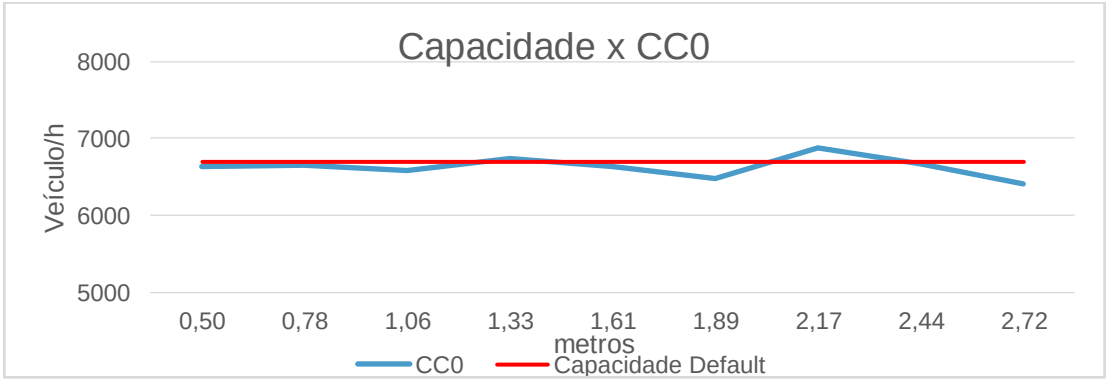
Considerando-se 15 simulações para cada valor de um parâmetro e sendo 10 valores para cada parâmetro, foi realizado um total de 150 simulações por parâmetro. Como foram selecionados 10 parâmetros a serem alterados, foi realizado um total de 1500 simulações, resultando em 10 curvas de capacidade.

A partir desses resultados, analisaram-se os gráficos obtidos e foram propostos 12 veículos ITS possíveis, com o objetivo de se estudar o comportamento das capacidades ao se alterar múltiplos parâmetros em conjunto. A capacidade para cada veículo sugerido foi definida, através dos mesmos inputs de demanda utilizados anteriormente, e obteve-se como resultado o veículo mais eficiente do ponto de vista operacional, o veículo escolhido para representar um veículo ITS no modelo em questão.

6.2.3 Concepção do Veículo ITS

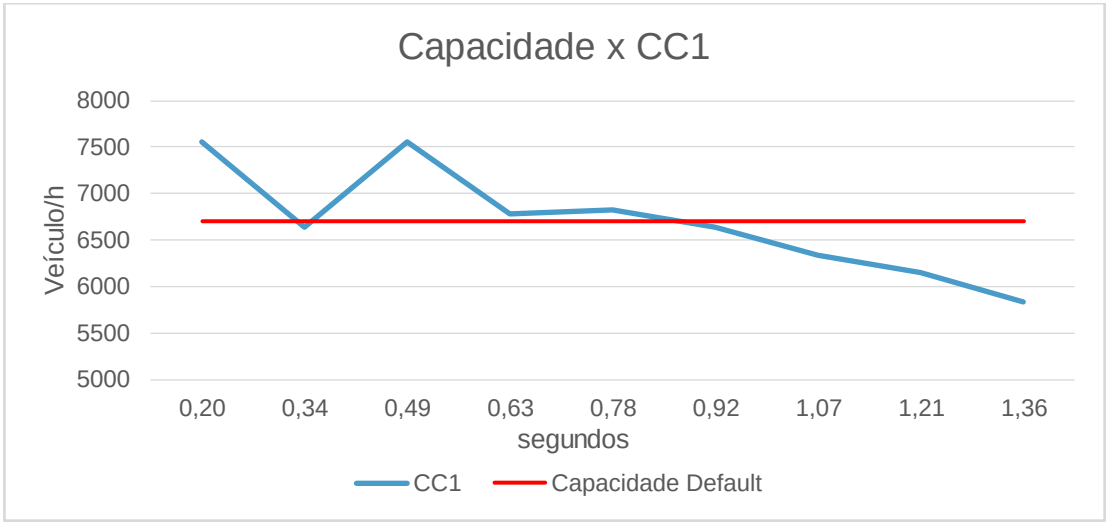
A seguir são apresentados os resultados da variação da capacidade em relação à cada parâmetro, com as devidas considerações realizadas em cada caso.

Gráfico 6 – Curva de capacidade para os valores de CC0



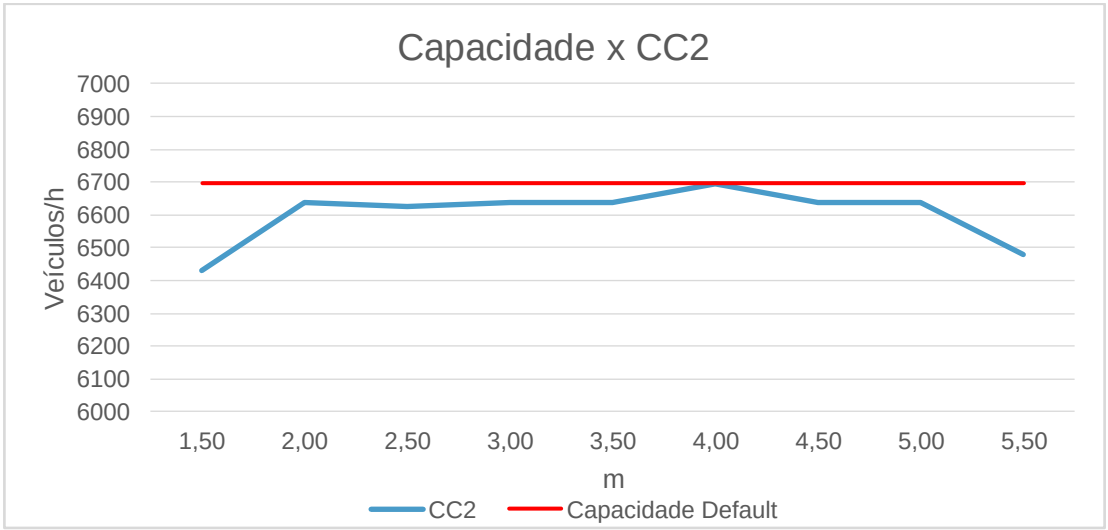
O Gráfico 6 demonstra que o parâmetro CC0 afetou a capacidade, porém, falta clareza quanto a correlação desse fator com a capacidade. Mas, dentro do intervalo proposto tivemos um ponto de destaque, para o valor 2,17 de CC0, cuja capacidade ficou acima da capacidade Default. Assim, todos os possíveis veículos ITS utilizarão CC0 igual a 2,17m, sendo o valor de referência igual a 0,5m.

Gráfico 7 – Curva de capacidade para os valores de CC1



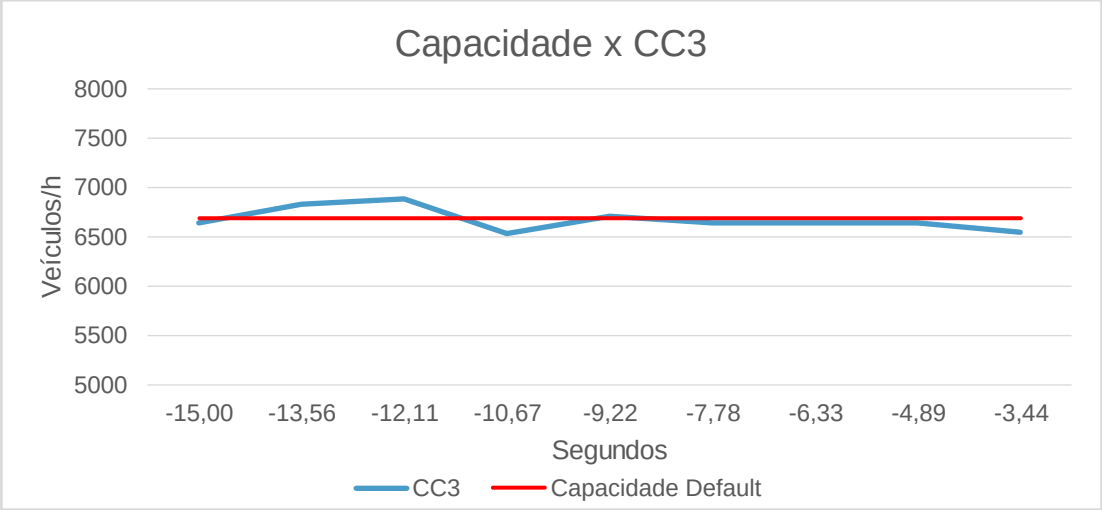
Pela análise apresentada no Gráfico 7 o parâmetro CC1 se mostrou o mais influente na variação da capacidade, apresentando capacidades maiores para valores menores de CC1. Portanto, serão considerados como possíveis valores para o veículo ITS os valores 0,2 e 0,49 de CC1, que resultaram nas maiores capacidades medidas. O valor de referência é igual a 0,9s.

Gráfico 8 – Curva de capacidade para os valores de CC2



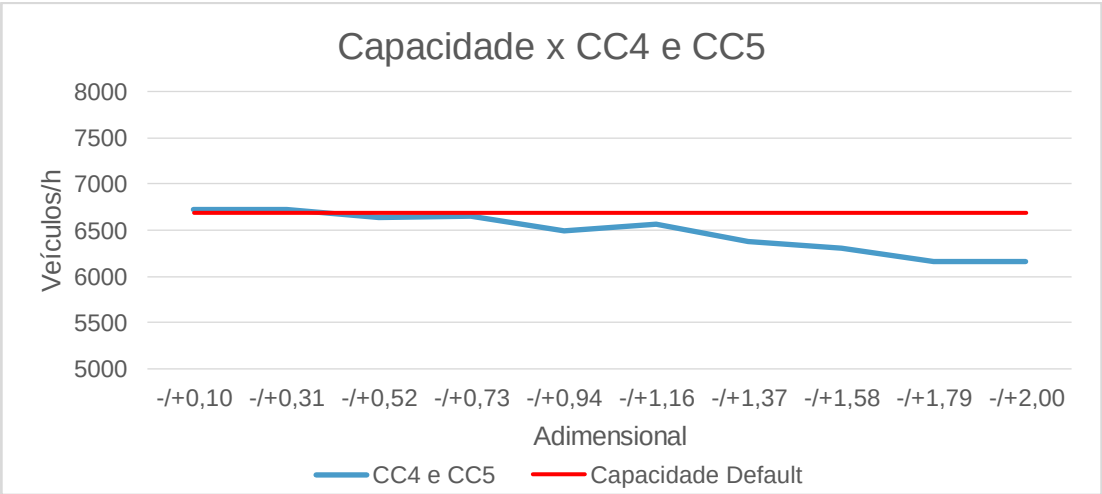
Como pode ser visto no Gráfico 8, a capacidade não sofreu alterações relevantes devido ao fator CC2. Porém, percebe-se que para valores muito baixos ou muito elevados a capacidade é mais baixa e que a curva (Capacidade x CC2) aparenta ter um valor ótimo, que coincidentemente é o valor *default* para CC2. Portanto, todos os veículos ITS possíveis utilizarão CC2 igual a 4,0 m.

Gráfico 9 – Curva de capacidade para os valores de CC3



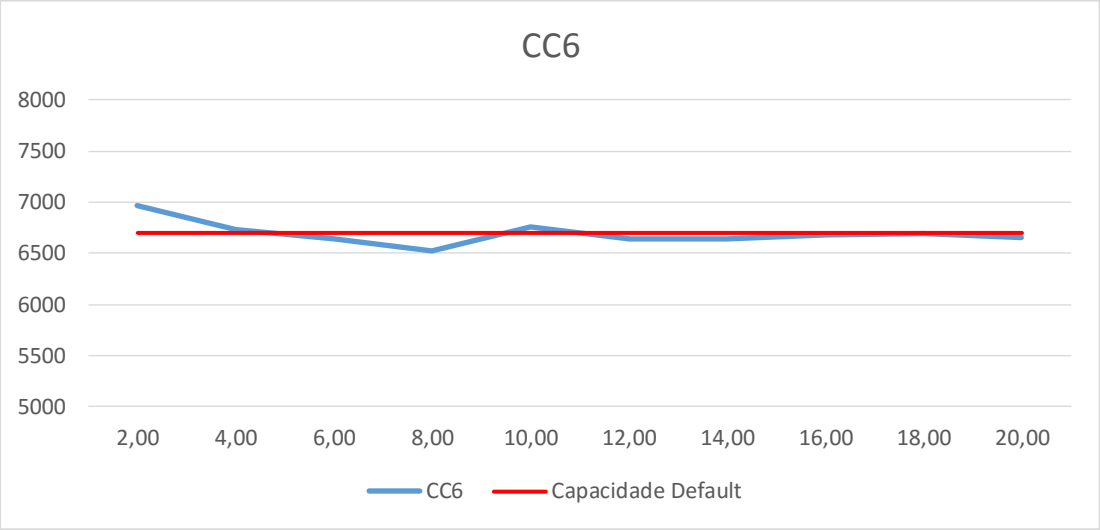
O parâmetro CC3 aparenta não influenciar substancialmente a capacidade para valores próximos aos limites inferiores ou superiores testados, como mostrado no Gráfico 9. Porém, para valores intermediários há certo acréscimo na capacidade, sendo o valor -12,11s de CC3 o ponto máximo, que será considerado em todos os veículos ITS possíveis. O valor de referência é de -8,00s.

Gráfico 10 – Curva de capacidade para os valores de CC4 e CC5



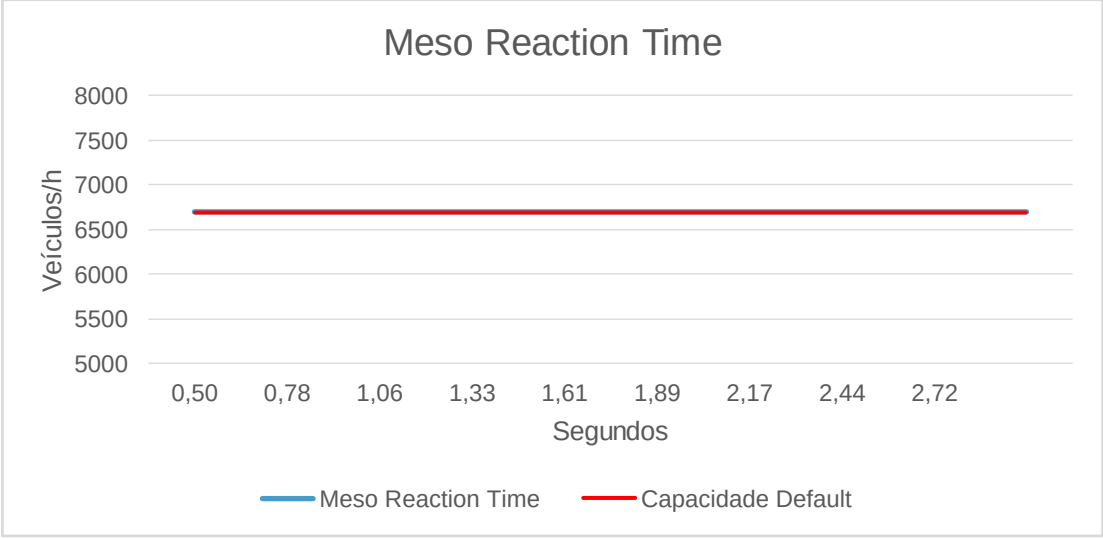
Os parâmetros CC4 e CC5, por serem espelhos, foram estudados em conjunto. O Gráfico 10 mostra claramente que quanto menor o módulo de CC4 e CC5 maior a capacidade. Porém, para ambos os valores testados, -/+0,10 e -/+0,31, a capacidade foi a mesma e, portanto, ambos serão considerados nos possíveis veículos ITS. Os valores de referência são -0,35m/s para CC4 e 0,35m/s para CC5.

Gráfico 11 – Curva de capacidade para os valores de CC6



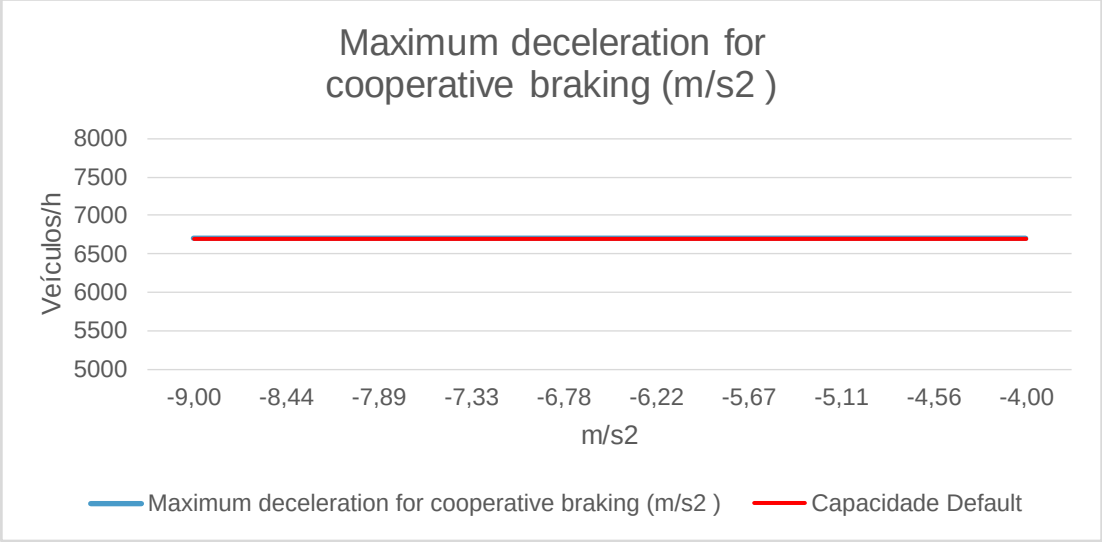
Apesar de uma certa instabilidade da curva de capacidade apresentada no Gráfico 11, nitidamente ocorre um valor máximo para a capacidade quando o valor de CC6 sugerido é igual a 2,0, definido como o valor desse parâmetro para os possíveis veículos ITS testados. O valor de referência é 11,44.

Gráfico 12 – Curva de capacidade para os valores de Meso Reaction Time



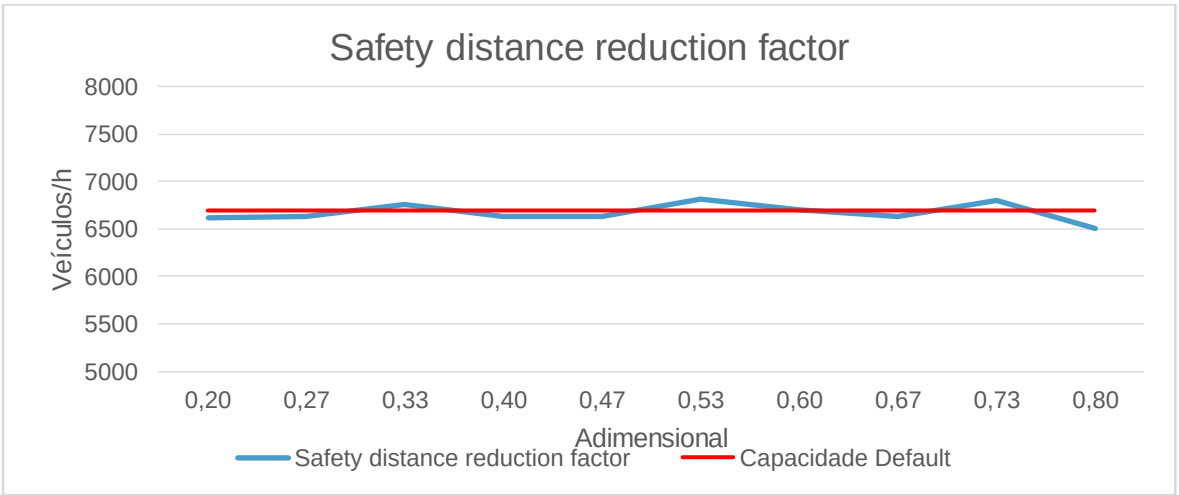
O parâmetro *meso reaction time*, apesar de aparentar ter um grande peso no estudo da capacidade, uma vez que se define como o tempo de reação médio, não gerou nenhuma alteração na capacidade, como demonstrado no Gráfico 12, e será mantido seu valor default, de 1,2 s, nos possíveis veículos ITS estudados.

Gráfico 13 – Capacidade para os valores de Maximum deceleration for cooperative braking



Como visto no Gráfico 13, o parâmetro em questão também não resultou em nenhuma alteração nas capacidades medidas e, portanto, será mantido seu valor *default*, de (-3,0 m/s²)[23], para todos os veículos ITS possíveis.

Gráfico 14 – Curva de capacidade para os valores de Safety distance reduction factor



[23] O valor *default* do parâmetro sugerido é de -3,00m/s² e está fora do intervalo sugerido por CUNTO (2008).

O parâmetro *safety distance reduction factor* apresentou uma instabilidade nítida ao longo de sua curva de capacidade, representada no Gráfico 14. Porém, identificou-se 3 valores para os quais a capacidade teve um pequeno acréscimo, sendo eles os valores 0,33, 0,53 e 0,73, que serão considerados nos veículos ITS possíveis.

Na Tabela 24 abaixo é apresentado um resumo das Capacidades x Valores dos Parâmetros Estudados, assim como quais valores serão utilizados nos possíveis veículos ITS, destacados em vermelho.

Tabela 24 – Capacidades obtidas para cada valor de parâmetro simulado

Parâmetro / Capacidade	Valor 01	Valor 02	Valor 03	Valor 04	Valor 05	Valor 06	Valor 07	Valor 08	Valor 09	Valor 10
CC0(m)	0,50	0,78	1,06	1,33	1,61	1,89	**2,17**	2,44	2,72	3,00
Capacidade	6636	6648	6576	6732	6636	6480	**6876**	6672	6408	6624
CC1(s)	**0,20**	0,34	**0,49**	0,63	0,78	0,92	1,07	1,21	1,36	1,50
Capacidade	**7560**	6636	**7560**	6780	6828	6636	6336	6156	5832	5640
CC2(m)	1,50	2,00	2,50	3,00	3,50	**4,00**	4,50	5,00	5,50	6,00
Capacidade	6432	6636	6624	6636	6636	**6696**	6636	6636	6480	6408
CC3(s)	-15,00	-13,56	**-12,11**	-10,67	-9,22	-7,78	-6,33	-4,89	-3,44	-2,00
Capacidade	6636	6828	**6888**	6540	6708	6636	6636	6636	6552	6600
CC4 e CC5(m/s)	**+0,10** **-0,10**	**+0,31** **-0,31**	+0,52 -0,52	+0,73 -0,73	+0,94 -0,94	+1,16 -1,16	+1,37 -1,37	+1,58 -1,58	+1,79 -1,79	+2,00 -2,00
Capacidade	**6732**	**6732**	6636	6660	6492	6564	6372	6312	6156	6156
CC6(s/un)	**2,00**	4,00	6,00	8,00	10,00	12,00	14,00	16,00	18,00	20,00
Capacidade	**6960**	6732	6636	6528	6756	6636	6636	6684	6696	6648
Meso Reaction Time(s)	0,20	0,40	0,60	0,80	1,00	**1,20**	1,40	1,60	1,80	2,00
Capacidade	6696	6696	6696	6696	6696	**6696**	6696	6696	6696	6696
Maximum deceleration for coop. braking (m/s²)	-9,00	-8,44	-7,89	-7,33	-6,78	-6,22	-5,67	-5,11	-4,56	-4,00
Capacidade	6696	6696	6696	6696	6696	6696	6696	6696	6696	6696
Safety distance reduction fator(s/un)	0,20	0,27	**0,33**	0,40	0,47	**0,53**	0,60	0,67	**0,73**	0,80
Capacidade	6612	6636	**6756**	6636	6636	**6816**	6696	6636	**6804**	6504

Sendo assim, há ao todo 12 veículos ITS possíveis, de forma a se testar todas as permutações de valores propostas. Segue abaixo, na Tabela 25, todos os veículos ITS propostos.

Tabela 25 – Veículos ITS possíveis

Parâmetro	Veículos Possíveis											
	V1	V2	V3	V4	V5	V6	V7	V8	V9	V10	V11	V12
CC0(m)	2,17	2,17	2,17	2,17	2,17	2,17	2,17	2,17	2,17	2,17	2,17	2,17
CC1(s)	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,49	0,49	0,49	0,49	0,49	0,49
CC2(m)	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00
CC3(s)	-12,1	-12,1	-12,1	-12,1	-12,1	-12,1	-12,1	-12,1	-12,1	-12,1	-12,1	-12,1
CC4(m/s)	-0,10	-0,31	-0,10	-0,31	-0,10	-0,31	-0,10	-0,31	-0,10	-0,31	-0,10	-0,31
CC5(m/s)	0,10	0,31	0,10	0,31	0,10	0,31	0,10	0,31	0,10	0,31	0,10	0,31
CC6(s/un)	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00
Meso Reaction Time(s)	1,20	1,20	1,20	1,20	1,20	1,20	1,20	1,20	1,20	1,20	1,20	1,20
Maximum deceleration for coop. braking (m/s^2)	-3,00	-3,00	-3,00	-3,00	-3,00	-3,00	-3,00	-3,00	-3,00	-3,00	-3,00	-3,00
Safety distance reduction fator(s/un)	0,33	0,33	0,53	0,53	0,73	0,73	0,33	0,33	0,53	0,53	0,73	0,73

Definidos os veículos, realizou-se o estudo da capacidade para cada um, através de 15 simulações, com input de 4000 a 11000 veículos, chegando aos valores apresentados na Tabela 26.

Tabela 26 – Capacidades medidas para cada veículo ITS proposto

Veículos	V1	V2	V3	V4	V5	V6	V7	V8	V9	V10	V11	V12
Capacidade	6624	7560	6624	7572	7536	7548	7068	6156	7560	7560	8148	6636

O veículo V11 apresentou a maior capacidade e demonstrou ser o veículo mais efetivo operacionalmente para o modelo proposto, caracterizando-se, pela lógica apresentada anteriormente, como um veículo ITS.

Uma comparação entre os valores dos parâmetros de V11 e os valores *default* do programa, apresentado na Tabela 27, permite a análise do porquê desse veículo apresentar características de um veículo ITS, apresentadas no capítulo quatro desse trabalho.

Tabela 27 – Comparação entre os valores dos parâmetros default e do veículo V11

Parâmetro	CC0	CC1	CC2	CC3	CC4	CC5	CC6	Meso Reaction Time	Maximum deceleration for cooperative braking (m/s²)	Safety distance reduction factor
Default	1,50	0,90	4,00	-8,00	-0,35	0,35	11,44	1,20	-3,00	0,60
V11	2,17	0,49	4,00	-12,10	-0,10	0,10	2,00	1,20	-3,00	0,73

O valor de CC0 sofreu um aumento no veículo V11, indicando que em uma situação próxima a capacidade, com uma alta densidade de veículos na via e com uma velocidade reduzida, as distâncias entre veículos deveriam ser maiores. Como trata-se de uma situação em que há a necessidade de mudança de faixas, essa configuração permitiria um maior espaço para essas transições, assemelhando-se a um veículo autônomo, que percebe a necessidade de mudança de faixa do veículo a frente e antecipa a ação, fornecendo o espaço necessário para a operação.

Ainda referente à mudança de faixa, há o aumento do parâmetro *Safety distance reduction fator*. Esse aumento significa que o veículo necessitará de uma distância maior para realizar a mudança de faixa, quando comparado ao valor *default*. Isso indica que o veículo V11 seria um veículo mais seguro, assim como um veículo ITS.

Já o valor de CC1 diminuiu, indicando que os veículos que apresentam maiores velocidades de deslocamento, em geral localizados nas faixas à esquerda, onde não se necessita mudar de faixas, ficariam mais próximos uns dos outros a uma mesma velocidade, permitindo um maior fluxo de veículos. Esse comportamento é esperado para os veículos ITS, pois com um menor tempo de reação espera-se que os mesmos trafeguem mais próximos uns dos outros sem interferência nas suas velocidades.

A alteração de CC3 de -8,00 para -12,10 afetaria a função de SDV, com alterações menores para a variação de Δx. Dessa forma, a região referente ao comportamento de “aproximação” da Figura 15 seria maior, indicando uma percepção antecipada dos demais veículos, comportamento esperado nos veículos autônomos.

Quanto aos parâmetros CC4, CC5 e CC6, a diminuição de seus módulos teria um impacto nos valores de OPDV e CLDV, diminuindo a região referente ao comportamento de “perseguição”. Isso significaria uma resposta mais rápida dos

veículos perseguidores às ações dos veículos perseguidos, fato esperado nos veículos ITS devido ao maior reflexo.

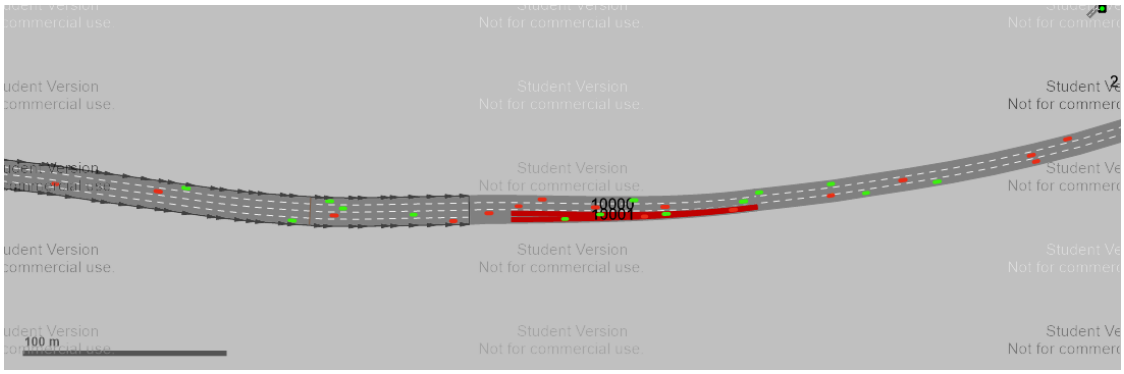
Portanto, fica claro que o veículo V11 possui uma semelhança considerável com os veículos autônomos definidos nas tendências do capítulo quatro e o mesmo será considerado como o veículo ITS nas simulações dos cenários que serão apresentadas a seguir.

6.2.4 Simulação dos Cenários de Implantação

Após definidos os parâmetros dos veículos ITS foram realizadas simulações quanto às possíveis implantações. Como definido anteriormente, a implantação pode ocorrer com os veículos dispersos em meio aos veículos comuns ou através da utilização de 1 ou 2 faixas exclusivas. Abaixo são apresentados os cenários mais detalhadamente:

- Cenário 1: Nesse cenário os veículos ITS são misturados aos veículos comuns conforme sua porcentagem cresce, até que existam apenas veículos ITS nas pistas. A Figura 18 exemplifica o modelo utilizado nesse cenário, no qual os veículos comuns são representados pela cor vermelha e os veículos ITS são representados pela cor verde.

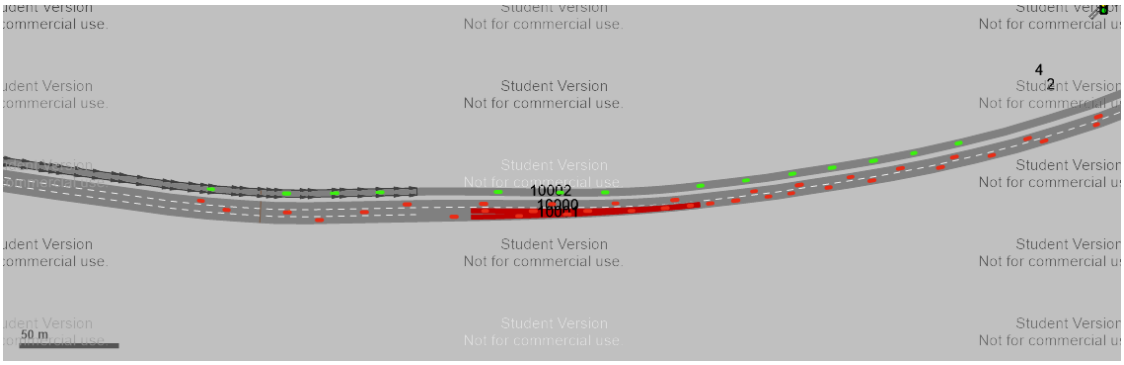
Figura 18 – Cenário 1: Veículos ITS dispersos em meio aos veículos comuns



- Cenário 2: Nesse cenário, conforme o número de veículos ITS aumenta, os mesmos são dispostos em 1 faixa exclusiva. Dessa forma, para porcentagens muito baixas de veículos ITS a faixa exclusiva fica vazia e para porcentagens muito elevadas, as faixas comuns ficam vazias. A Figura 19 exemplifica o

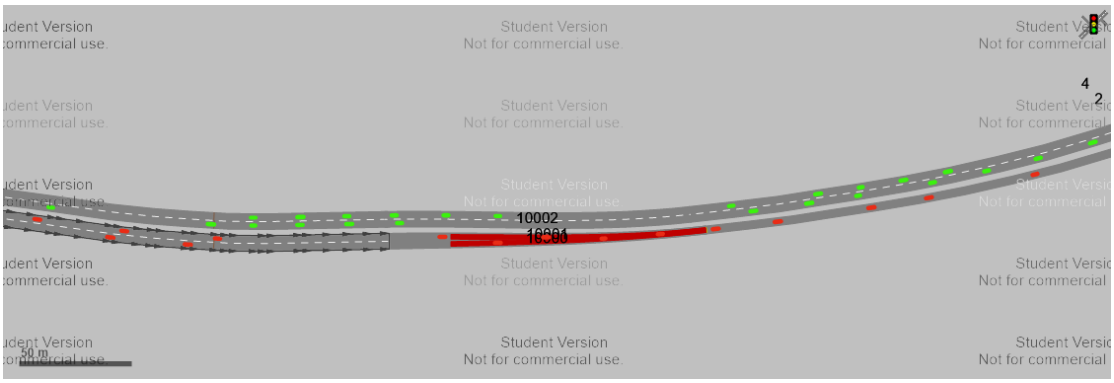
modelo utilizado para as simulações desse cenário, com os veículos ITS (verdes) utilizando apenas a faixa exclusiva.

Figura 19 – Cenário 2: Faixa exclusiva para veículos ITS com uma pista



- Cenário 3: Esse cenário funciona de forma muito semelhante ao cenário 2, porém ao invés de apenas 1 faixa temos 2 faixas exclusivas para os veículos ITS. A Figura 20 mostra o modelo utilizado para esse cenário.

Figura 20 – Cenário 3: Faixa exclusiva para veículos ITS com duas pistas



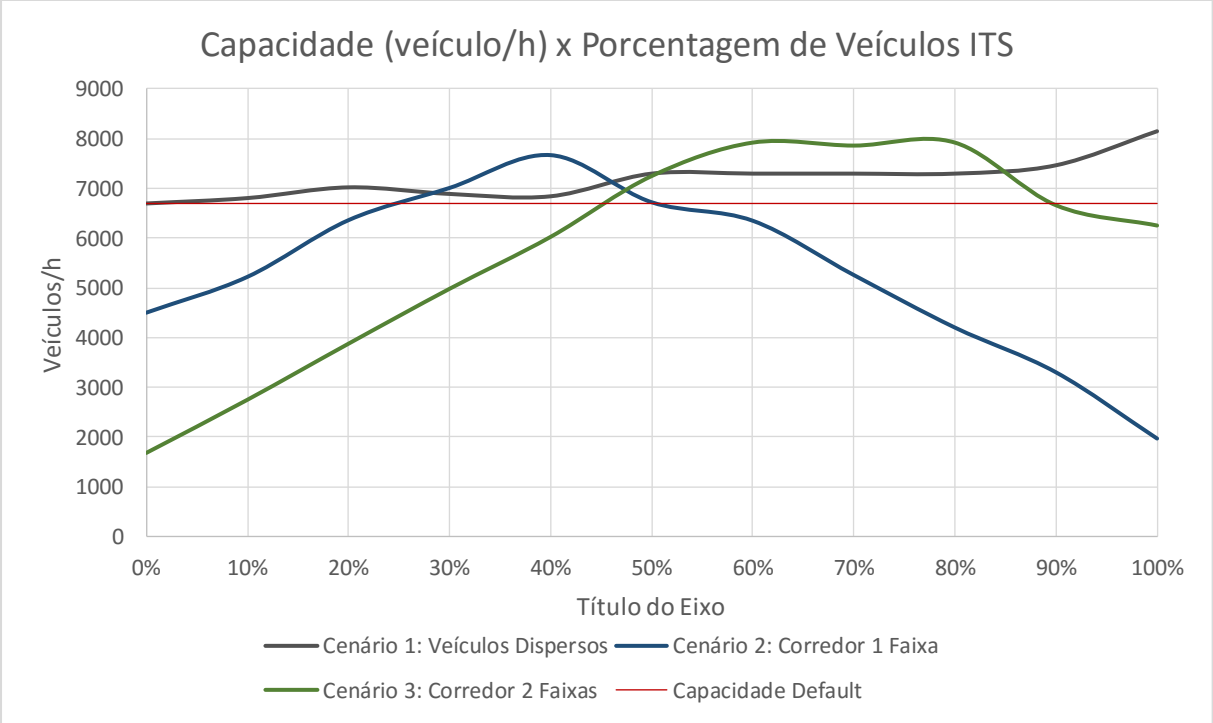
Para cada um dos cenários propostos variou-se a porcentagem de veículos ITS, de 0% a 100%, utilizando intervalos de 10%, e mediu-se a capacidade máxima em cada uma das situações, de forma a se construir curvas de capacidade relativas ao aumento de veículos ITS em cada um dos cenários.

As capacidades foram coletadas da mesma forma utilizada anteriormente, utilizando inputs de 4000 a 11000 veículos, com intervalos de 500, totalizando 15 simulações por porcentagem de veículos ITS. Como foram estudadas 11 porcentagens diferentes, foram realizadas 165 simulações por cenário e 495 simulações no total.

6.3 Resultados

Realizadas as simulações descritas anteriormente obteve-se o Gráfico 15, no qual são apresentadas as capacidades dos cenários para cada porcentagem. Nele é possível perceber que o Cenário 1, com veículos ITS dispersos em meio aos veículos comuns, apresenta valores maiores que a Capacidade *Default* e os demais cenários até 29%. A partir dessa porcentagem o Cenário 2, com uma faixa exclusiva para veículos ITS, passou a ser o mais interessante do ponto de vista da capacidade, apresentando maiores valores até 58% de veículos ITS. De 58% a 85% de veículos ITS o Cenário 3, com duas faixas exclusivas, demonstrou maiores valores de capacidade. De 85% a 100% o Cenário 1 volta a apresentar as maiores capacidades, resultando numa capacidade final de 8148 veículos, 23% maior que os 6696 veículos da capacidade *default*.

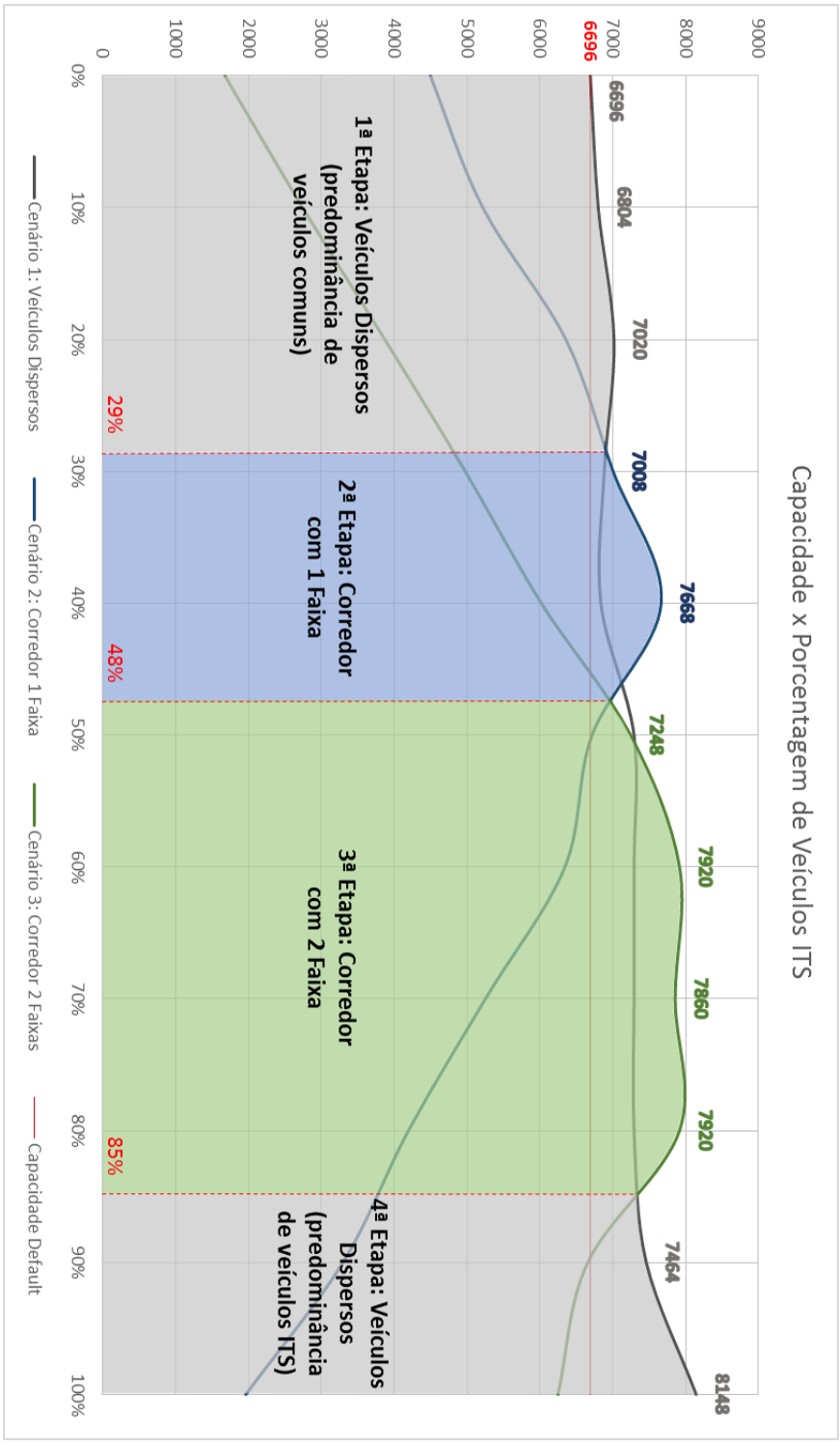
Gráfico 15 – Curvas de capacidade referentes ao crescimento do número de veículos ITS para os cenários propostos



Assim, percebe-se um possível regime de implantação, exemplificado no Gráfico 16, com a utilização de uma distribuição dispersa até 29% de veículos ITS, pois ainda não se justifica a utilização de faixas exclusivas. A partir dessa porcentagem, passa a se justificar o uso de uma faixa exclusiva, até os 58%, ponto

em que passa a fazer sentido a utilização de duas faixas exclusivas devido ao crescente número de veículos ITS. Essas duas faixas são o suficiente para garantir a melhor eficiência da pista até 85% de veículos ITS, quando passa a fazer sentido a utilização de uma distribuição dispersa, na qual os poucos veículos comuns restantes trafegam em meio ao grande número de veículos ITS.

Gráfico 16 – Possível regime de implantação baseado nos resultados obtidos nas simulações



6.4 Considerações Finais

Nesse capítulo foram apresentados o funcionamento do Software Vissim, uma proposta de análise, e a lógica utilizada para a mesma. Aplicou-se um método para estudar possíveis valores dos parâmetros de um veículo ITS no software e, após diversas simulações, foram atingidos valores, apresentados na Tabela 27, que definiram um comportamento muito próximo ao veículo autônomo apresentado na Seção 4.

Aplicadas essas configurações e realizadas as simulações de três cenários possíveis para a implantação de *Intelligent Transportation Systems*, chegou-se a seguinte proposta de regime de implantação: veículos autônomos dispersos em meio aos veículos comuns até 29% de veículos ITS; utilização, até 48% de veículos ITS, de uma faixa exclusiva para veículos autônomos, com as demais três faixas, sofrendo um estreitamento para duas faixas destinadas aos veículos comuns; utilização, até 85% de veículos ITS, de duas faixas exclusivas para veículos autônomos, com as demais duas faixas, sofrendo um estreitamento para uma faixa, destinadas aos veículos comuns; veículos autônomos dispersos em meio aos veículos comuns até 100% de veículos ITS, gerando uma melhora final de 23% na capacidade.

7 CONCLUSÃO

O término deste projeto de conclusão de graduação gerou importantes conclusões sobre a inserção das tecnologias de sistemas inteligentes de transporte em rodovias. A contextualização das iniciativas ao redor do mundo, estudadas ao longo deste trabalho, forneceu um panorama geral dos principais avanços na área.

Este panorama foi a base para o desenvolvimento de uma antevisão de cenário futuro das rodovias. A partir da identificação e compreensão das tecnologias desenvolvidas em países europeus, EUA, Japão e Austrália, foi possível delinear o futuro dos sistemas inteligentes de transporte em rodovias, caracterizado pela presença de veículos autônomos, guiados pelos seus respectivos computadores de bordo e pela utilização de corredores completamente conectados. A infraestrutura será constituída por torres de rádio, câmeras e sensores, para monitoramento, controle do tráfego e comunicação. Para garantir a eficiência da operação haverá uma central de controle da operação automatizada com alto poder de processamento de informações. Além disso, é prevista a utilização de veículos autônomos, que por meio de suas aplicações, câmeras e sensores, não necessitam de condução humana, sendo capazes de se autoguiar. A comunicação será uma chave desse sistema e, tanto a tecnologia V2V quanto a V2I/I2V, serão realizadas através de DSRC.

A partir desse cenário, foram realizados dois estudos para se entender o impacto da aplicação dessas tecnologias. O primeiro foi uma análise das mudanças no projeto geométrico rodoviário e o segundo uma simulação da alteração esperada nas capacidades de um trecho genérico de uma rodovia, através do Software Vissim.

O primeiro estudo resultou em uma proposta de adequação do projeto geométrico rodoviário, que contempla a ampla revolução que deve haver sobre a operação das rodovias. Presume-se que as rodovias a ser projetadas incorporam sistemas inteligentes protagonizados por veículos autônomos e conectados. O novo modelo, que propõe adaptação básica e importante, na qual a velocidade de projeto deixa de ser o elemento precursor de todos os outros elementos de projeto e é substituída por uma velocidade operacional variável trecho a trecho, em função das características de geometria e traçado e as condições climáticas. Essa adequação permite a construção de rodovias de forma mais sustentável e, em alguns casos, mais econômica, evitando-se volumes exacerbados de movimentação de terra.

Isso porque, com a desaceleração dos veículos na aproximação das curvas verticais e horizontais, permite-se a construção de curvas mais próximas ao nível natural do terreno. É necessário, no entanto, avaliar o conforto fornecido ao usuário, evitando o estabelecimento de um traçado que impõe muitas variações nas declividades e direcionamentos horizontais.

As novas condições de visibilidade necessárias para a operação autônoma impulsionam esse benefício, ao permitir que os veículos autônomos trafeguem de forma mais veloz sobre as curvas, em comparação aos veículos comuns.

A eficiência operacional também é atendida, no sentido de que o sistema autônomo não permite que se chegue a uma condição de saturação, prevendo o controle absoluto dos acessos em situações em que a demanda supera a capacidade da rodovia. Além disso, para impedir que as reduções de velocidades nas curvas levem a criação de gargalos à operação na situação de plena ocupação da via, o sistema ainda prevê uma redução de distâncias entre veículos proporcionalmente às velocidades praticadas. Assim, se garante que o mesmo fluxo será escoado em todos os trechos da via. Por fim, podem-se construir rodovias com larguras de faixas de rolamento reduzidas, acarretando em mais uma possível redução nos custos de implantação.

No segundo estudo foi apresentado o funcionamento do Software Vissim, uma proposta de análise, e a lógica utilizada para a mesma. Aplicou-se um método para estudar possíveis valores dos parâmetros de um veículo ITS no software e, após diversas simulações, foram atingidos valores que definiram um comportamento muito próximo do esperado para o veículo autônomo apresentado na Seção 4.

Aplicadas essas configurações, foram realizadas simulações de três cenários possíveis para a implantação de ITS em uma rodovia com 4 faixas sofrendo um estreitamento para 3 faixas, resultando em um possível regime de implantação composto por 4 etapas:

- 1ª Etapa: Veículos ITS dispersos em meio aos veículos comuns, com predomínio de veículos comuns;
- 2ª Etapa: Utilização de corredor exclusivo para veículos ITS com 1 faixa;
- 3ª Etapa: Utilização de corredor exclusivo para veículos ITS com 2 faixas;
- 4ª Etapa: Veículos ITS dispersos em meio aos veículos comuns, com predomínio de veículos autônomos.

Ao final da 4ª Etapa, ao se atingir 100% de veículos ITS, a melhora na capacidade, segundo as simulações, deverá chegar a 23%.

A partir dos resultados obtidos foram identificadas duas possibilidades para aprofundar o estudo dos impactos da implantação de tecnologias ITS. A primeira visa aprofundar a análise apresentada no capítulo 5, quanto ao projeto geométrico de uma rodovia, no qual se propõe a realização de um projeto de uma rodovia utilizando o novo método proposto, a fim de compará-lo a um projeto realizado através do método comum. Essa análise possibilitaria estudos quanto à diferença de traçado e à diferença de custo de implantação das diferentes rodovias.

A segunda refere-se ao capítulo 6, quanto à simulação, na qual propõe-se a realização de simulações em trechos mais complexos e de maior extensão utilizando o mesmo método proposto nesse trabalho. Através dessa análise pode se obter diferentes resultados, possibilitando um maior entendimento quanto ao impacto da implantação de tecnologias ITS.

8 BIBLIOGRAFIA

AASHTO. **12th AASHTO International Day**. Congresso Mundial de ITS, 2015 Bordeaux: AASHTO, 2015. 32 p.

AASHTO. **A Policy on Geometric Design of Highways and Streets.** 6ª ed. Washington: American Association of State Highway and Transportation Officials, 2011. 912 p.

AGHABAYK, K.; SARVI, M.; YOUNG W.; KAUTZSCH L. **A novel methodology for evolutionary calibration of Vissim by multi-threading.** Brisbane: The University of Western Australia, Planning and Transport Research Centre Home, 2013. 15 p.

AMSTERDAM GROUP. **Roadmap between automotive industry and infrastructure organizations on initial deployment of Cooperative ITS in Europe**. Amsterdã: [s.n.], 2013. 27 p.

AMSTERDAM GROUP. CODECS WORKSHOP. **Cooperative ITS Corridor – Joint Deployment.** Roskilde: CODECS, 2015. 8 p.

AUSTROADS. **Reviewing ITS Technologies and Road Safety Opportunities.** Sydney: [s.n.], 2010.

BARRA, M. **Histórico e desenvolvimento de sistemas ITS pela GM.** 07.set.2014. Discurso de abertura do 21º Congresso Mundial de ITS – Detroit: General Motors Co, 2014.

BATISTA, C. P. **Sistemas Inteligentes de Transporte:** Uma Abordagem Voltada ao Contexto**.** Salvador: [s.n.], 2013. 11 p.

COMMUNICATIONS MAGAZINE [da] IEEE. PAPADIMITRATOS, P.; LA FORTELLE, A.; EVENSSEN, K.; BRIGNOLO, R.; COSENZA, S. **Vehicular communication systems:** Enabling technologies, applications, and future outlook on intelligent transportation. [S.I.]: IEEE, nov, 2009. 12 p.

CREGGER, J. **International Survey Of Best Practices in Connected and Automates Vehicle Technologies.** Michigan: Center for Automotive Research, MDOT, 2014. 179 p.

CUNTO, F. J. C. **Assessing Safety Performance of Transportation Systems Using Microscopic Simulation**. Tese de Doutorado – Department of Civil and Environmental Engineering, University of Waterloo. Ontário: [s.n.], 2008. 190 p.

DENATRAN. **Base de dados Frota.** 2000-2015. Disponível em: < http://www.denatran.gov.br/frota.htm>. Acesso em: 15.jun.2015.

DER/SP. **Instrução de projeto: projeto geométrico**. São Paulo: Secretaria dos Transportes, fev, 2005. 36 p.

_____. **Instrução de projeto: Notas técnicas de projeto geométrico**. São Paulo: Secretaria dos Transportes, ago, 2006. 185 p.

DIAS, B.C.; ANDRADE, R.; CARVALHO, M.A. **Comunicação Inter-Veicular e entre Veículos – Infraestrutura com o Estudo do Protocolo DSRC**. Monografia do Curso de Tecnologia em Eletrônica Automotiva. FATEC Santo André. São Paulo, 2010. 88 p.

DNER. **Manual de projeto geométrico de rodovias rurais**. Rio de Janeiro: Instituto de Pesquisas Rodoviárias, 1999. 195 p.

DNIT. **Manual de Projeto de Intersecções**. Rio de Janeiro: Instituto de Pesquisas Rodoviárias, 2005. 528 p.

_____. **Manual de Projeto Geométrico de Travessias Urbanas**. Rio de Janeiro: Instituto de Pesquisas Rodoviárias, 2010. 392 p.

ECo-AT. **Cooperative ITS Corridor – Joint Deployment NL/DE/AT**. [ITS World Congress 2015] Bordeaux: [s.n.], 2015. 43 p.

_____. **Explanatory Release Note.** Version 03.10. Viena: [s.n.], 2015. 22 p.

_____. **Publication Event of Release 1 Documents**. Version 03.10. Viena: [s.n.], 2015, 108 p.

_____. **Overview on Use Cases.** Version 03.10. Viena: [s.n.], 2015. 8 p.

_____. **System Overview.** Version 03.10. Viena: [s.n.], 2015. 103 p.

ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. **Inventory of U.S. Greenhouse Gas Emissions and Sinks: 1990-2013.** Washington: [s.n.], 2014.

EC. **Definition on C-ITS.** 3rd edition. Bruxelas: Safety Forum Plenary Meeting, 24.mar.2004.

EUROPEAN TRAFFIC POLICE NETWORK. **A guide to driving in Belgium.** Bruxelas: [s.n.], 2014. 3 p.

EZELL S. **Explaining international IT application leadership: Intelligent Transportation Systems.** Washington: The Information Technology & Innovation Foundation, 2010. 58 p.

FOLHA DE SÃO PAULO. **Carros autônomos ainda precisam da ajuda humana em testes nos eua.** Disponível em: <http://m.folha.uol.com.br/tec/2016/01/1729301-carros-autononomos-ainda-precisam-da-ajuda-humana-em-testes-nos-eua.shtml?mobile>. Acesso em 22.jan.2016.

_____. **Natureza humana é empecilho para os carros que se dirigem sozinhos.** Disponível em: <http://m.folha.uol.com.br/tec/2016/01/1731729-natureza-humana-e-

empecilho-para-os-carros-que-se-dirigem-sozinhos.shtml>. Acesso em: 22.jan.2016.

HITACHI EUROPE SAS. **ETSI G5 Technology:** The European approach. Version 1, Gotemburgo: [s.n.], 2013, 16 p.

IBM. **Delivering Intelligent Transport Systems - Driving integration and innovation.** Inglaterra: IBM, 2007. 6p.

IEEE. News Releases 5.set.2012. Disponível em: < http://www.ieee.org/about/news/2012/5september_2_2012.html>. Acesso em: 15.jun.2015.

INRIX. **Economic & Environmental Impact of Traffic Congestion in Europe & the US.** [S.l.: s.n.], 2013.

_____. **Traffic Scorecard.** 2010-2014. Disponível em <http://inrix.com/scorecard/>. Acesso em: 15.jun.2015.

ITS GOT SOLUTION. **Connected Vehicles Status of C-ITS Deployment in Europe.** Version 2, Tóquio: [s.n.], 2014. 21 p.

JANDRISITS M. **The C-ITS corridor and the interrelation to the Amsterdam Group.** Helsinki: ASFINAG, 2014. 10 p.

LACERDA V.M.; NETO M. M. C. **Considerações sobre a calibração do modelo de car-following do Vissim para vias arteriais urbanas.** Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia de Transportes, Universidade Federal do Ceará. Ceará: Associação Nacional de Pesquisa e Ensino em Transporte, 2014. 13 p.

MAP TRAFFIC MANAGEMENT. **Overview of Standards for first deployment of C-ITS.** Version 1.0. Holanda: Rijkswaterstaat, 2014. 33 p.

MDOT. **I-96/I-696 Corridor V2I Map.** Detroit: [s.n.], 2014. 1 p.

_____. **MDOT partners with GM, Ford and the University of Michigan on country's largest deployment of connected vehicle and highway technologies**. Disponível em <http://www.michigan.gov/mdot/0,4616,7-151-9620_11057-336809--,00.html>. Acesso em: 21.jun.2015.

MEDEIROS, A. L. **Aplicabilidade de algoritmos genéticos para calibração de redes viárias urbanas microssimuladas.** Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia de Transportes, Universidade Federal do Ceará. Ceará: [s.n.], 2012. 90 p.

MICHIGAN ENVIRONMENTAL COUNCIL. **Michigan Environmental Council survey of Michigan Department of Transportation programs for context sensitive solutions transportation reform.** Detroit: [s.n.], 2005. 8 p.

MLIT. **Future directions for the trilateral ITS cooperation.** Tóquio: [s.n.], 2012. 5 p.

_____. **ITS initiatives in Japan.** Tóquio: [s.n.], 2012. 17 p.

_____. **System Architecture.** Tóquio: [s.n.], 2011. 27 p.

_____. **Vehicle-Infrastructure Cooperative System and Probe Data in Japan.** Tóquio: [s.n.], 2011. 17 p.

NSW GOVERNMENT. Department of Transport. **Transport for NSW Annual Report 2011-2012.** Sydney: Department of Transport – NSW Government, 2012. 322 p.

OH, JUN-SEOK; KWIGIZILE, V.; SUN, Z.; CLARK, M.L.; KURDI, A.; WIERSMA, M. **Costs and Benefits of MDOT Intelligent Transportation System Deployments.** Michigan: Western Michigan University, 2015. 189 p.

OMS. **Global Status Report on Road Safety.** Geneva: World Health Organization, 2013. 318 p.

PELLEGRINI P.T. **Trabalho Temático – Rodovias inteligentes x Parâmetros para o projeto geométrico de rodovias**. São Paulo: [s.n.], 2014. 15 p.

PTV VISSIM. 5.40 User Manual. **PTV – Planung Transport Verkehr AG**. Karlsruhe: PTV, 2010. 732 p.

ROADS AND BRIDGES. **Autonomous Vehicles White house set invest 4b toward self- driving vehicle tech.** 2016. Disponível em: < http://www.roadsbridges.com/autonomous-vehicles-white-house-set-invest-4b-toward-self-driving-vehicle-tech>. Acesso em: 22.jan.2016.

SAKAI, K.; National Institute for Land and Infrastructure Management; MLIT. **Progress of "ITS Spot Services" in Japan.** Fot-Net 4th International Workshop. Orlando: 2011. 15 p.

SAYER J. University of Michigan Transportation Research Unit. **Connected Vehicle Safety Pilot.** Detroit: [s.n.] 201-. Paginação irregular

_____. _____. **Connected Vehicle Safety Pilot Model Deployment.** Detroit: [s.n.] 201-. 11 p.

_____; LIU H. University of Michigan Transportation Research Unit. **Deployment of Connected and Automated Vehicles.** Detroit, 2014. Disponível em: <http://www.connectedvehicleworkshop.com/wp-content/uploads/2014/12/Henry-Liu-Presentation.pdf>. Acesso em: 21.jun.2015.

TESTFELD TELEMATIK. **For a sustainable mobility with cooperative services.** Viena, 201-. 8 p.

TIENTRAKOOL, P.; YA-CHI HO; MAXEMCHUK N.F. **Highway Capacity Benefits from Using Vehicle-to-Vehicle Communication and Sensors for Collision Avoidance**. Department of Electrical Engineering – Columbia University. Nova Iorque: IEEE, 2011. 5 p.

TRANSPORTATION RESEARCH BOARD. AASHTO. FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION. **HCM2010 Highway Capacity Manual**. 5th edition. Washington: Transportation Research Board, 2010. 1650 p.

UNIVERSIDADE DE MICHIGAN. MTC. **Deployments**. Disponível em <http://www.mtc.umich.edu/deployments>. Acesso em: 21.jun.2015.

WALL J. P. **The CITI Project: Building Australia's first Cooperative Intelligent Transport System test facility for safety applications.** Brisbane: [s.n.], 2013. p. 6.

_____; TYLER P. Journal of the Australasian College of Road Safety. **The CITI Project - Australia's first Cooperative Intelligent Transport System Test Facility for safety applications**., v. 25, n. 2, p. 64-65, 2014.

WALTON, C.M.; PERSAD, K.; WANG Z.; SVICAROVICH, K.; CONWAY, A.; ZHANG G. **Arterial Intelligent Transportation Systems:** Infrastructure Elements and Traveler Information Requirements**.** Texas: Center for Transportation Research, The University of Texas at Austin, 2009. 272 p.

WANGHAM, M.; NOGUEIRA, M.; FERNANDES, C.; PAVIANI, O.; DA SILVA, BENEVID. SBC – SOC. BRAS. DE COMPUTAÇÃO. **Minicursos do XIV Simpósio Brasileiro em Segurança da Informação e de Sistemas Computacionais — SBSeg 2014.** Universidade Federal do Paraná, Universidade do Vale do Itajaí. [S.l]: SBC, 2014. 50 p.

WASHINGTON POST. **New wireless technology could help drastically reduce vehicle crashes.** 2014. Disponível em: <http://www.washingtonpost.com/opinions/new-wireless-technology-could-help-drastically-reduce-vehicle-crashes/2014/10/03/a3b93 6d8-4a31-11e4-891d-713f052086a0_story.html>. Acesso em: 21.jun.2015.

WEILAND R. J.; PURSER L. B. **Intelligent Transportation Systems.** [S.l.: s.n.], 201-. 3 p.