



UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL
CAMPUS DO SERTÃO

DIMAS CRESCENCIO VERISSIMO SANTOS

ANÁLISE DE DESEMPENHO DE INTERSEÇÕES
ESTUDO DE CASO: RODOVIA AL-110 – ARAPIRACA/AL

Delmiro Gouveia
2017



DIMAS CRESCENCIO VERISSIMO SANTOS

**ANÁLISE DE DESEMPENHO DE INTERSEÇÕES
ESTUDO DE CASO: RODOVIA AL-110 – ARAPIRACA/AL**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Colegiado do Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal de Alagoas como parte dos requisitos para obtenção do título de Engenheiro Civil.

Orientador: Prof. MSc. David Anderson Cardoso Dantas.

Delmiro Gouveia
2017

S237a Santos, Dimas Crescencio Verissimo

Análise de desempenho de interseções estudo de caso:
rodovia AL – 110 – Arapiraca/AL / Dimas Crescencio Verissimo
Santos – 2017.

99f.: il.

Monografia (Engenharia Civil) – Universidade Federal de
Alagoas, Delmiro Gouveia, 2017.

Orientação: Prof. Me. David Anderson Cardoso Dantas.

1. Rodovia. 2. Interseção. I. Título. II. Arapiraca

CDU 711 (813.5)

Folha de Aprovação

AUTOR: DIMAS CRESCENCIO VERISSIMO SANTOS

ANÁLISE DE DESEMPENHO DE INTERSEÇÕES ESTUDO DE CASO: RODOVIA AL-110 – ARAPIRACA/AL

Este trabalho de conclusão de curso foi julgado adequado para a obtenção do título de Engenheiro Civil e aprovado em sua forma final pelo professor orientador e pelo Colegiado do Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal de Alagoas – Campus do Sertão, em 12 de dezembro de 2017.



Prof. Msc. David Anderson Cardoso Dantas – UFAL Campus Sertão (Orientador)


Banca Examinadora:



Prof. Msc. David Anderson Cardoso Dantas – UFAL Campus Sertão (Avaliador interno)



Prof. Msc. Jonhatan Magno Norte da Silva – UFAL Campus Sertão (Avaliador interno)



Prof. Msc. Vinicius Costa Correia – UFAL Campus Sertão (Avaliador interno)

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Damião e Valmira, por todo suporte, incentivo, e amor em todos os momentos;

Ao meu irmão, Daniel, que ao dizer que sou sua inspiração, me incentivou ainda mais a dar o meu melhor sempre;

Aos docentes do curso de Engenharia Civil do Campus do Sertão pelos conhecimentos compartilhados e por todo o esforço em promover uma educação superior de qualidade;

À Universidade Federal de Alagoas, pela oportunidade de ingressar no curso de Engenharia Civil;

Ao meu orientador, David Dantas, por todo apoio, tempo e cuidado dispensados em prol da conclusão deste trabalho;

Ao Programa Ciências Sem Fronteiras do Governo Federal, pela oportunidade de participar de intercâmbio acadêmico em outro país, e aos professores do *Illinois Institute of Technology* por todo o aprendizado compartilhado;

Aos meus familiares, pela alegria demonstrada sempre ao me ver e por compreenderem a minha ausência durante o período de curso;

À Danielle, pela amizade, apoio e incentivo durante todo o período de curso, por caminhar junto comigo e tornar essa jornada mais leve;

Aos colegas de turma, por todo o aprendizado compartilhado durante o curso;

A todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para a conclusão desta etapa tão almejada por mim e pela minha família.

RESUMO

A infraestrutura rodoviária é a principal responsável pela integração dos diversos modais de transporte do Brasil. No entanto, a qualidade das rodovias brasileiras não tem se elevado correspondentemente à sua importância para o desenvolvimento socioeconômico do País. Esse fator, acrescido ao crescimento do número de veículos que circulam nas grandes e médias cidades, faz com que as vias se encontrem próximas do seu ponto de saturação e atinjam sua capacidade de projeto. Assim, o deslocamento de um ponto A para um ponto B de forma eficiente, segura e com a qualidade desejável não tem sido atingido. Nesse aspecto, o presente trabalho apresenta um estudo de caso que tem como objetivo analisar o desempenho de interseções inseridas na Rodovia AL-110, no município de Arapiraca – Alagoas, através da microssimulação de tráfego e propor alternativas para os problemas de congestionamento e conflitos observados em campo. Assim, os resultados simulados obtidos comprovaram que a configuração atual não tem atendido o volume de tráfego de forma satisfatória. Além disso, as alternativas propostas resultaram em melhorias consideráveis na capacidade e fluidez do tráfego, contribuindo para a redução do tempo de viagem e conseqüente consumo de combustível e emissão de poluentes gasosos, dos gastos de manutenção da frota de veículos e na probabilidade de ocorrência de acidentes da região.

Palavras-chave: Microssimulação; Análise de Desempenho; Interseção.

ABSTRACT

The roadway infrastructure of Brazil is the primary mode of transportation for its population. However, the condition of the Brazilian roadways has not improved correspondingly to the rising socio-economic development of the country. Furthermore, the growth in vehicle flows in large and medium-sized cities approaches saturation flow and roadway system capacity. Thus, the traveling from point A to point B in an efficient, safe, and desirable manner has not been achieved. Under current circumstances, this case study set out to analyze the performances of intersections located at AL-110 highway in Arapiraca - Alagoas by performing a traffic microsimulation in addition to proposed alternatives to improve traffic congestion and conflicts observed in the field. Thereby, the results of the simulation show the current configuration has not satisfactorily handled the traffic volume. In addition, the proposed alternatives have resulted in considerable improvements in traffic capacity and fluidity, contributing to the reduction of travel time. These improvements consequently decreased consumption of fuel, emission of gaseous pollutants, the maintenance cost of the fleet's vehicles, and the occurrence of accidents in the region.

Keywords: Microsimulation; Performance Analysis; Intersections.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Comparação entre a área física e a funcional de uma interseção.	16
Figura 2 – Área funcional de uma interseção e seus elementos componentes.	17
Figura 3 – (a) Interseção em nível de três ramos; (b) Interseção em nível de quatro ramos.	19
Figura 4 – Realinhamento de interseções de múltiplos ramos.	20
Figura 5 – (a) Interseção em nível de três ramos com ilhas canalizadoras para os movimentos de giro à direita; (b) Interseção em nível de quatro ramos com ilhas divisórias.	20
Figura 6 – (a) Estrutura de separação dos greides de uma interseção em desnível; (b) Interseção de múltiplos níveis.	21
Figura 7 – Tipos básicos de interconexões.	22
Figura 8 – Interconexões de três ramos com apenas uma estrutura de separação dos greides.	23
Figura 9 – Interconexões de três ramos com mais de uma estrutura de separação dos greides.	23
Figura 10 – (a) Interconexão com dupla rotatória; (b) Interconexão em diamante.	24
Figura 11 – (a) Trevo completo; (b) Interconexão direcional com quatro níveis.	24
Figura 12 – (a) Diamante de ponto único; (b) Completo arranjo de interconexão.	25
Figura 13 – Rótula convencional.	26
Figura 14 – Elementos característicos de uma rotatória moderna.	27
Figura 15 – Rotatória moderna em 3D.	27
Figura 16 – Ramos formadores da interconexão do tipo trombeta.	28
Figura 17 – (a) Interconexão trombeta voltada para à direita; (b) Interconexão trombeta voltada para à esquerda.	29
Figura 18 – Interconexão do tipo trombeta.	30
Figura 19 – Interconexão do tipo trombeta.	31
Figura 20 – Tipos de conflito em uma interseção.	33
Figura 21 – Hierarquização dos movimentos.	34
Figura 22 – Comparação entre a área física e funcional de uma interseção.	36
Figura 23 – Representação visual dos Níveis de Serviço.	38
Figura 24 – Interface e projetos realizados no VISSIM©.	42

Figura 25 – Interface e projetos realizados no VISSIM©.....	43
Figura 26 – Localização geográfica da cidade de Arapiraca no Estado de Alagoas.	44
Figura 27 – Evolução da frota circulante de veículos no município de Arapiraca.....	46
Figura 28 – Congestionamento visualizado em campo.....	47
Figura 29 – Evolução da área em estudo.....	48
Figura 30 – Início das obras de duplicação da Rodovia AL-110.	49
Figura 31 – Regra de prioridade visualizada em campo.	49
Figura 32 – Movimento irregular de convergência e cruzamento.....	50
Figura 33 – Movimento irregular de convergência.	51
Figura 34 – Exemplificação da determinação dos intervalos de pico da área em estudo.	53
Figura 35 – Posicionamento e área de abrangência das câmeras filmadoras CM1 e CM2.....	54
Figura 36 – Posicionamento da CM1.	54
Figura 37 – Posicionamento da CM2.	55
Figura 38 – Gráfico Velocidade x Distância x Elevação obtido através do aplicativo <i>Runtastic</i>	56
Figura 39 – Visão do pesquisador de dentro do carro ao realizar as medições de velocidade nos trechos: Veículo <i>floatar</i>	57
Figura 40 – Superposição entre a imagem de satélite do <i>Google Earth</i> e o projeto executivo da área em estudo.	58
Figura 41 – (a) Representação dos <i>links</i> e conectores; (b) Representação gráfica do sistema viário.	58
Figura 42 – Representação das zonas de conflito e ROW da área em análise.	59
Figura 43 – Representação da área em estudo.	60
Figura 44 – Exemplificação dos pares O/D, sendo estes o A-B e o F-G.....	61
Figura 45 – Aba <i>Vehicle inputs</i> no VISSIM©.....	63
Figura 46 – Definição das rotas dos veículos saindo de A.....	64
Figura 47 – Porcentagem das possibilidades de rotas inseridas no <i>software</i>	64
Figura 48 – Obtenção das velocidades médias e de fluxo livre.....	66
Figura 49 – Parâmetros do modelo psicofísico de <i>Wiedemann 74 (W74)</i>	68
Figura 50 – Parâmetros do modelo psicofísico de <i>Wiedemann 99 (W99)</i>	69

Figura 51 – Projeção geométrica do volume de tráfego da área em análise em UTM.	72
Figura 52 – Parâmetros de simulação inseridos.	74
Figura 53 – Restrições impostas pela licença de uso acadêmico do PTV Vissim© 9.0.	75
Figura 54 – Congestionamento observado na simulação.	79
Figura 55 – Cenário original.	80
Figura 56 – Alternativa 1.	80
Figura 57 – Alternativa 2.	81
Figura 58 – Alternativa 3.	82
Figura 59 – Alternativa 4.	82
Figura 60 – Movimento conflitantes.....	87
Figura 61 – Área conflitante.	88

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Classificação funcional – Característica das vias.....	37
Tabela 2: Variação da frota circulante de veículos de Arapiraca em 15 anos.....	46
Tabela 3: Matriz O/D nos 15 minutos de maior fluxo em UTM.....	61
Tabela 4: Matriz O/D majorada.	62
Tabela 5: Porcentagem das rotas na Matriz O/D.	63
Tabela 6: Composições veiculares.....	65
Tabela 7: Velocidade média e de fluxo livre.....	66
Tabela 8: Velocidade de fluxo livre de acordo com a composição veicular.....	67
Tabela 9: Parâmetros do modelo psicofísico de Wiedemann 74 (W74).....	68
Tabela 10: Parâmetros do modelo psicofísico de Wiedemann 99 (W99).....	69
Tabela 11: Valores recomendados dos principais parâmetros de calibração do modelo psicofísico de <i>Wiedemann 99</i>	70
Tabela 12: Validação do modelo: Teste-t de <i>Student</i>	71
Tabela 13: Estimativa do tráfego em UTM.	73
Tabela 14: Medidas de eficiência (MOEs) do cenário original para T_0 , T_5 e T_{10}	79
Tabela 15: Medidas de eficiência (MOEs) para T_0	83
Tabela 16: Medidas de eficiência (MOEs) para T_5	83
Tabela 17: Medidas de eficiência (MOEs) para T_{10}	84
Tabela 18: <i>Node Evaluation</i> - Impacto da modificação 1 nos pares O/D.	85

LISTA DE ABREVIATURAS

AASHTO	American Association of State Highway and Transportation Officials
CNT	Confederação Nacional do Transporte
DENATRAN	Departamento Nacional de Trânsito
DER	Departamento de Estradas de Rodagem
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transporte
FGSV	Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen
FHWA	Federal Highway Administration (Research, Development, and Technology)
HCM	Highway Capacity Manual
MOEs	Measures of Effectiveness
OSM	OpenStreetMap
ROW	Right-of-Way
SMTT	Superintendência Municipal de Transporte e Trânsito
TRB	Transportation Research Board

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	14
2 INTERSEÇÕES	16
2.1 Tipos de Interseção	18
2.1.1 Interseções em nível	19
2.1.2 Interseções em níveis diferentes.....	21
2.2 Áreas de conflito	31
2.3 Classificação funcional das vias interceptantes	33
2.4 Capacidade e Níveis de Serviço	37
3 MÉTODOS DE ANÁLISE DE TRÁFEGO.....	40
3.1 Métodos determinísticos	40
3.2 Métodos estocásticos	41
3.2.1 PTV VISSIM©	41
4 ESTUDO DE CASO.....	44
4.1 Caracterização da área de estudo.....	44
4.2 Definição do horário de pico	52
4.3 Levantamento de campo.....	53
4.4 Modelagem.....	57
4.4.1 Geometria do sistema viário.....	57
4.4.2 Controle de Tráfego	59
4.4.3 Demanda	59
4.4.3.1 Matriz de origem e destino (O/D)	60
4.4.3.2 Definição das rotas	63
4.4.3.3 Definição das velocidades	65
4.5 Simulação.....	67
4.5.1 Calibração	67
4.5.2 Validação	71
4.5.3 Cenários Futuros.....	71
4.5.4 Rodadas de simulação.....	73
4.5.5 Análise dos Resultados.....	75

4.5.5.1 Animação Gráfica.....	75
4.5.5.2 Valores Numéricos.....	76
5 RESULTADOS.....	79
5.1 Alternativas.....	80
5.2 Análise dos resultados.....	82
5.3 Conflitos adicionais observados em campo.....	86
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	89
6.1 Sugestões para trabalhos futuros.....	89
7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	90
APÊNDICE A: CALIBRAÇÃO - ETAPA DE ITERAÇÕES.....	93
APÊNDICE B: VALIDAÇÃO – TESTE-T DE <i>STUDENT</i>.....	95
APÊNDICE C: LEVANTAMENTO DE CAMPO – IMAGENS ADICIONAIS... 	96
ANEXO 1.....	98

1 INTRODUÇÃO

A infraestrutura rodoviária é a principal responsável pela integração dos diversos modais de transporte de uma nação. De acordo com a Confederação Nacional do Transporte - CNT (2017), o transporte rodoviário no Brasil representa 95% da matriz de transporte de passageiros e 61% da matriz de transporte de cargas do Brasil. No entanto, a qualidade das rodovias brasileiras não tem se elevado em contrapartida à sua importância para o desenvolvimento socioeconômico do país. Ao contrário, de acordo com a mesma entidade, 61,8% das rodovias apresentaram seu estado geral como regular, ruim ou péssimo quando se trata da sua qualidade geral, englobando sinalização, qualidade do pavimento e geometria das vias.

Esses fatores, acrescidos ao crescimento do número de veículos que circulam nas grandes e médias cidades, fazem com que as vias se encontrem próximas do seu ponto de saturação e atinjam sua capacidade de projeto. Essas condições causam elevados gastos ao País, uma vez que devido aos congestionamentos gerados, observa-se um aumento no tempo de viagem e, conseqüente, consumo de combustível, na manutenção da frota de veículos e na probabilidade de ocorrência de acidentes (CNT, 2017). Diante disso, as rodovias têm perdido sua principal funcionalidade, a provisão da mobilidade, dificultando o deslocamento de um ponto A para um ponto B de forma eficiente, segura e com a qualidade desejável.

Diante do exposto, investimentos devem ser feitos de modo a modernizar a infraestrutura do transporte rodoviário brasileiro e aumentar a sua capacidade para que atenda a demanda de tráfego atual e futura. Nesse aspecto, a *American Association of State Highway and Transportation Officials* (AASHTO) e o Departamento Nacional de Infraestrutura de Transporte (DNIT) elucidam a importância do estudo de capacidade dos projetos de interseção pela sua alta criticidade dentro de uma rede viária, uma vez que a capacidade e fluidez de uma rodovia é determinada primariamente pelas restrições presentes nas interseções que a compõe (DNIT, 2005; AASHTO, 2011).

Nesse aspecto, o presente trabalho tem como objetivo analisar o desempenho de interseções inseridas na Rodovia AL-110 no município de Arapiraca – Alagoas, através da microsimulação de tráfego e propor alternativas para os problemas de congestionamento e conflitos observados em campo.

Para tanto, o trabalho está estruturado de forma a estabelecer uma linha de raciocínio sobre o tema. Assim, após essa breve introdução, são apresentados conceitos, informações e exemplos práticos importantes ao entendimento do tema, através de uma revisão bibliográfica que engloba as interseções e os principais métodos de estudo de tráfego. Na seguinte seção, é feita a caracterização da área em estudo e apresentação do estudo de caso, bem como as etapas seguidas na modelagem do problema. Logo depois, os resultados são obtidos para os diferentes cenários de projeto seguidos de uma análise comparativa entre os mesmos. Por fim, as informações foram condensadas na seção de conclusão desse trabalho.

2 INTERSEÇÕES

Uma interseção, confluência ou entroncamento, pode ser definida como uma área onde duas ou mais correntes de tráfego diferentes se interceptam, seja como forma de união ou cruzamento, tendo como principal função possibilitar a mudança de rota dos veículos. Em adição, as interseções são vitais no que se refere aos padrões de fluxo de tráfego, capacidade e segurança de todo o sistema viário em que estão inseridas (GARBER e HOEL, 2009; LAY, 2009).

A interseção pode ser condensada em duas áreas inter-relacionadas, a área física e a área funcional (Figura 1). A área física é delimitada pelos ramos formadores da interseção. A área funcional é uma extensão da área física, tanto a montante, quanto a jusante, incluindo faixas auxiliares de tráfego e canalizações associadas. Em adição, a área funcional (Figura 2) é compreendida por três elementos principais de acordo com a AASHTO, 2001.

- (i) Distância de decisão, percorrida durante o tempo de percepção e reação do condutor ao se aproximar da interseção, vinculada à velocidade do veículo, à familiaridade com a rota e ao grau de alerta do condutor.
- (ii) Distância de manobra, necessária para a desaceleração do veículo ao se aproximar da interseção à medida que o condutor efetuará uma parada total, ou mudança de via.
- (iii) Distância referente à capacidade de armazenamento a partir da formação de filas de veículos, congestionamento, a qual deve ser suficiente para acomodar a fila mais longa prevista na maior parte do tempo.

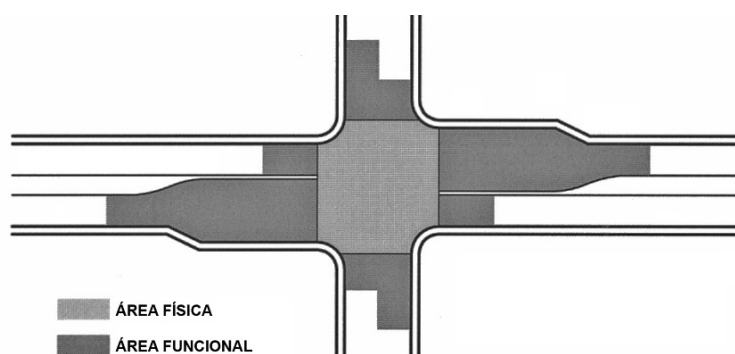


Figura 1 – Comparação entre a área física e a funcional de uma interseção.

Fonte: Adaptado de FHWA (2004).

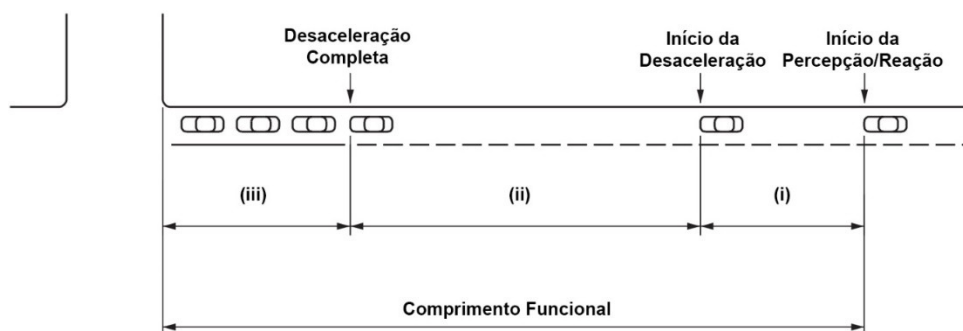


Figura 2 – Área funcional de uma interseção e seus elementos componentes.

Fonte: Adaptado de AASHTO (2011).

Diante do exposto, o projeto das áreas constituintes de uma interseção deve abranger e balancear os diversos modos de transporte: pedestres, ciclistas, motocicletas, carros de passeio, caminhões e o transporte público, bem como suas características intrínsecas, em busca de um traçado de transição que seja o mais natural possível e da eficiência nos movimentos entre estes diversos grupos de usuários. Ademais, este projeto deve englobar componentes que não são normalmente previstos em uma seção transversal típica das vias que se interceptam (LAY, 2009; AASHTO, 2011).

À luz disso, o manual *A Policy on Geometric Design of Highways and Street* da AASHTO (2011), comumente conhecido como *AASHTO Green book*, elucida quatro elementos básicos que devem ser levados em consideração em um projeto de interseção:

I. Fatores Humanos:

- Hábitos de condução;
- Capacidade e tempo de decisão e reação do condutor;
- Expectativa do condutor;
- Conformidade do projeto com o caminho natural dos movimentos;
- Utilização e hábito dos pedestres e ciclistas.

II. Considerações de Tráfego:

- Classificação das vias interceptantes;
- Design e capacidade atual;
- Variedade dos movimentos;

- Velocidade dos veículos;
- Histórico de acidentes;
- Movimento de bicicletas e pedestres;
- Tamanho e características de operação dos veículos;
- Transporte público.

III. Elementos Físicos

- Áreas de conflito;
- Características do projeto geométrico;
- Faixas de mudança de velocidade;
- Fatores ambientais;
- Passeios, passarelas e faixas de segurança/ pedestre;
- Dispositivos de controle de tráfego;
- Tratamento e gerenciamento de acessos;
- Alinhamentos horizontais e verticais.

IV. Fatores econômicos:

- Custo de modificações;
- Consumo de energia/ combustível.

Diante do exposto, alguns desses elementos são abordados nas sessões seguintes, uma vez que são de devida importância para o entendimento da problemática apresentada.

2.1 Tipos de Interseção

O tipo de interseção a ser utilizado em uma determinada região é determinado primariamente pelo número de vias que se interceptam e suas características, aspectos topográficos, o volume, padrão e velocidade do tráfego e ainda pelo nível de operação desejada. Assim, as interseções podem ser categorizadas em: interseções em nível ou interseções em níveis diferentes de acordo com o plano em que as correntes de tráfego realizam seus respectivos movimentos.

2.1.1 Interseções em nível

As interseções em nível podem ser tipificadas conforme a quantidade de ramos que apresentam, a solução a ser adotada e o controle de sinalização implantado. Quanto ao número de ramos, as interseções são subdivididas em interseções de três, quatro ou múltiplos ramos. No que se refere à solução adotada, tem-se a mínima, em gota, canalizada ou rótula (rotatória). Por fim, em função do controle de sinalização, as interseções em nível podem ter ou não sinalização semafórica (DNIT, 2005).

Quanto ao número de ramos

A terminologia ramo de interseção refere-se ao eixo da via secundária que parte de uma rodovia, em nível, bem como uma pista de intercâmbio que possibilita a união entre duas vias que se interceptam, a níveis diferentes (DNER, 1997). As interseções de três ramos são comumente designadas pela letra “T” ou “Y”, a depender do ângulo de interseção entre seus ramos integrantes. Exemplos de interseções em nível de três e quatro ramos são apresentados na Figura 3.

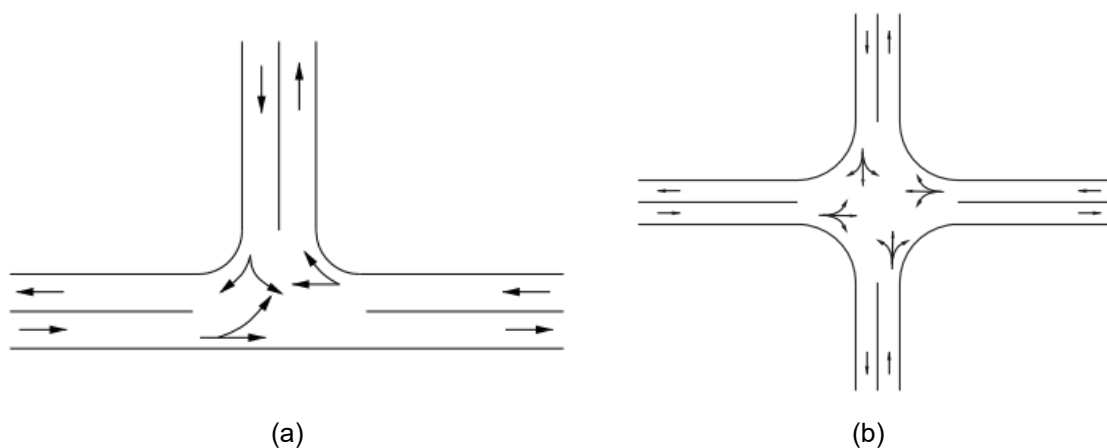


Figura 3 – (a) Interseção em nível de três ramos; (b) Interseção em nível de quatro ramos.

Fonte: Adaptado de AASHTO (2011).

Interseções compostas por cinco ou mais ramos devem ser evitadas quando praticável, devido a periculosidade inerente. Nesse sentido, em locais onde existam esse tipo de disposição, reconfigurações podem ser feitas através do realinhamento de um ou mais ramos em adição a modificação de alguns movimentos de tráfego por

meio da geração de interseções subsidiárias adjacentes como pode ser visto na Figura 4 (AASHTO, 2011).

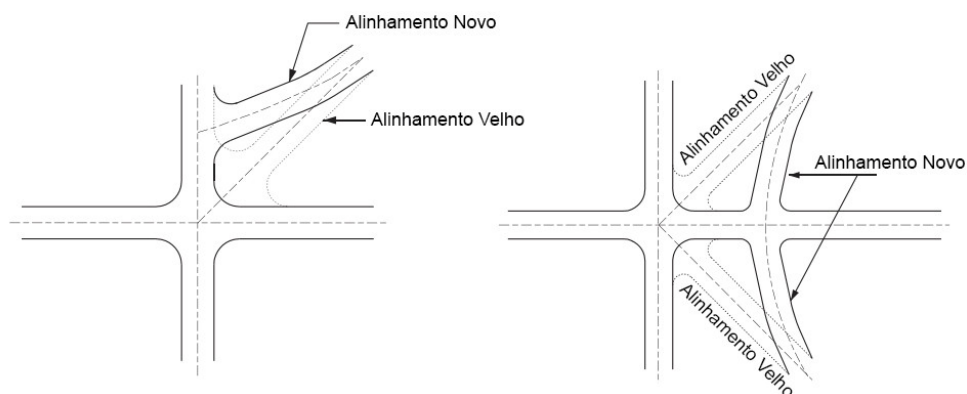


Figura 4 – Realinhamento de interseções de múltiplos ramos.

Fonte: Adaptado de AASHTO (2011).

Quanto à solução adotada

A solução mínima está relacionada ao tipo de interseção que não apresenta controles especiais, geralmente utilizada para baixos volumes de tráfego. A canalização utilizada nas interseções refere-se à separação ou regulação dos movimentos conflitantes de tráfego em caminhos definitivos de viagem através de ilhas de trânsito ou marcação de pavimento, com a finalidade de facilitar a ordenação dos movimentos dos veículos e pedestres (DNIT, 2005). Exemplos de interseções canalizadas podem ser observadas na Figura 5.

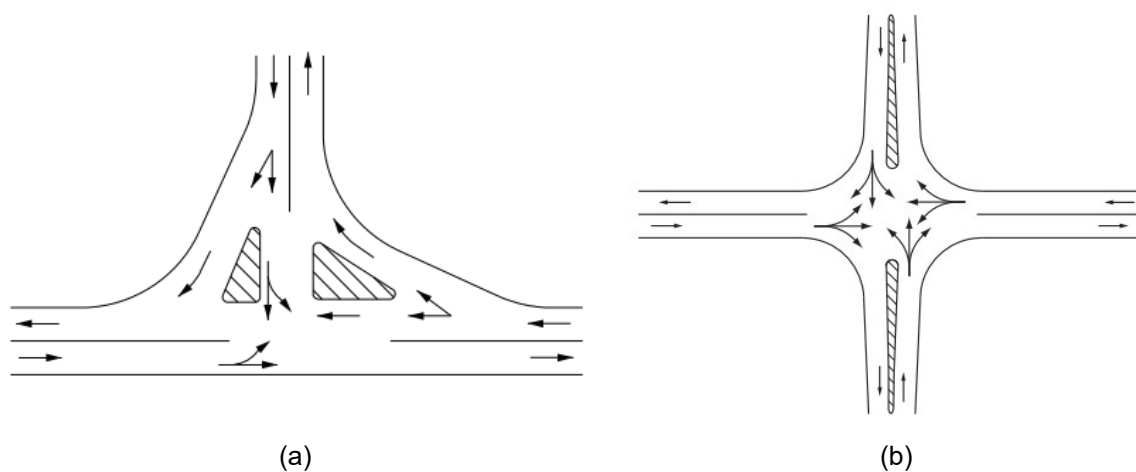


Figura 5 – (a) Interseção em nível de três ramos com ilhas canalizadoras para os movimentos de giro à direita; (b) Interseção em nível de quatro ramos com ilhas divisórias.

Fonte: Adaptado de AASHTO (2011).

2.1.2 Interseções em níveis diferentes

A capacidade de acomodar altos volumes de tráfego com segurança e eficiência através das interseções depende em grande parte dos arranjos previstos para o tratamento do tráfego que se cruza. Uma maior eficiência, segurança e capacidade são alcançadas quando as vias que se interceptam são separadas em níveis diferentes, ou em desnível. Essa separação se dá através de duas tipologias básicas, o cruzamento em níveis diferentes sem ramos e a interconexão.

Cruzamento em níveis diferentes sem ramos

O cruzamento em níveis diferentes sem ramos (Figura 6) é caracterizado pela ausência de ramos de conexão, o que impossibilita a transição direta de fluxos de tráfego entre as vias que se interceptam. No entanto, essa ausência deve ser compensada através de outras rotas ou locais já existentes que possibilitem essa troca de fluxo. Nesse contexto, a rodovia principal pode passar sobre ou sob a rodovia secundária, através da separação dos greides por meio de estruturas físicas, ou obras-de-arte, configurando respectivamente um cruzamento de passagem superior ou inferior (DNIT, 2005).



Figura 6 – (a) Estrutura de separação dos greides de uma interseção em desnível; (b) Interseção de múltiplos níveis.

Fonte: AASHTO (2011).

Interconexão

Caracteriza-se por possuir, em adição ao cruzamento em desnível, ramos com a finalidade de conduzir o tráfego de veículos de uma via a outra. As configurações básicas de interconexão podem ser visualizadas na Figura 7. No entanto, essas configurações podem variar amplamente em forma e escopo, além de existirem inúmeras combinações que dificultam a designação por nomes específicos.

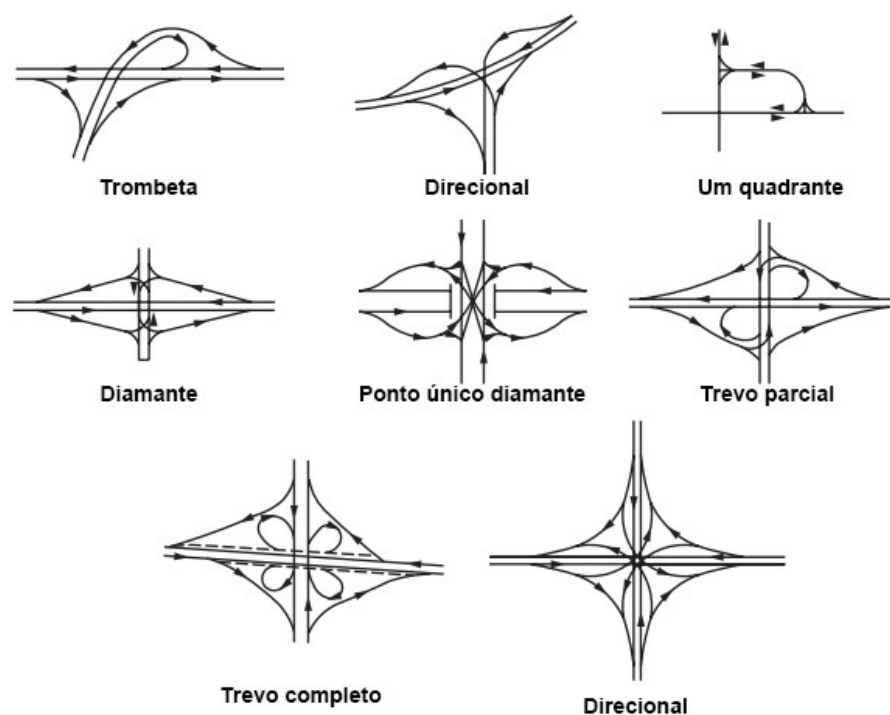


Figura 7 – Tipos básicos de interconexões.

Fonte: Adaptado de DNIT (2005).

As interconexões podem ser subdivididas em: de três ou de quatro ramos.

Interconexões de Três Ramos

As interconexões de três ramos são caracterizadas pela rodovia secundária apresentar apenas fluxos de conversão de ou para a rodovia principal, consistindo de uma ou mais estruturas de separação dos greides. Ainda, esse tipo de interconexão, pode ser denominada de interconexão em T, caso o ângulo entre as rodovias que se interceptam esteja próximo de 90° ; interconexão em Y, caso o ângulo seja agudo.

Cabe ressaltar que ao optar por esse tipo de configuração, deve ser levado em consideração na fase de viabilidade do projeto, a dificuldade e até a impossibilidade de futuras expansões no quadrante inutilizado das interconexões de três ramos (AASHTO, 2011; DNIT, 2005).

A Figura 8 ilustra interconexões de três ramos com apenas uma estrutura de separação dos níveis.

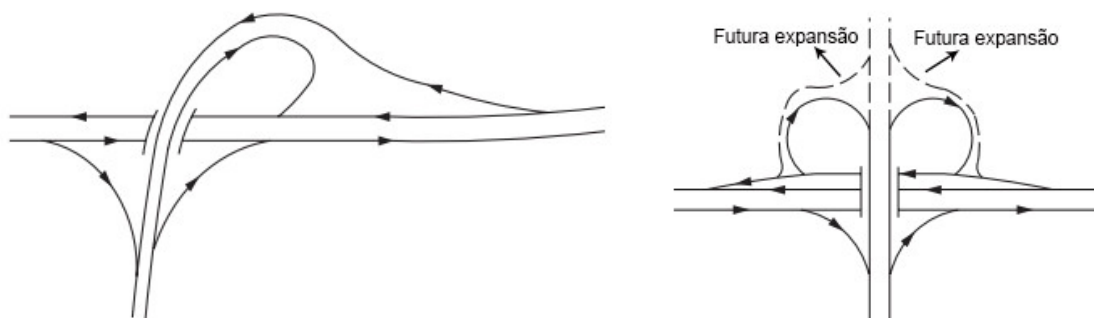


Figura 8 – Interconexões de três ramos com apenas uma estrutura de separação dos greides.

Fonte: Adaptado de AASHTO (2011).

A Figura 9 enfatiza interconexões em T e em Y que proveem todos os movimentos necessários sem a necessidade de *loops*, mas com uma ou mais estruturas de separação dos greides e até múltiplos níveis. Essas configurações são mais onerosas, sendo justificáveis apenas quando os volumes de tráfego forem elevados.

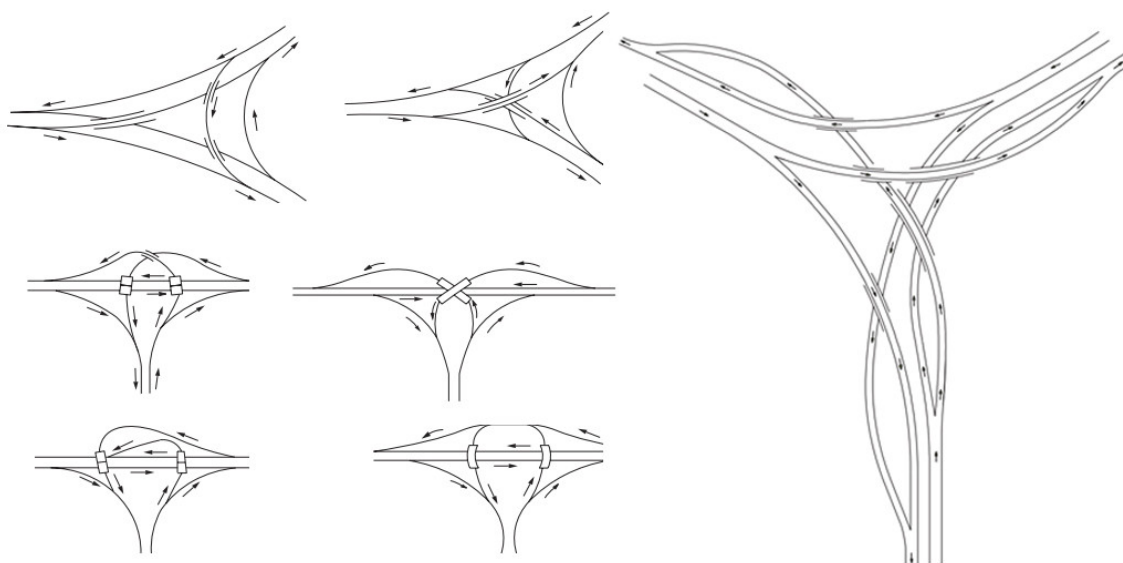


Figura 9 – Interconexões de três ramos com mais de uma estrutura de separação dos greides.

Fonte: Adaptado de AASHTO (2011).

Interconexões de Quatro Ramos

As interconexões possuidoras de quatro ramos podem ser agrupadas em seis configurações gerais: (1) um quadrante, (2) em diamante, (3) dupla rotatória, (4) trevo completo ou parcial, (5) diamante de ponto único e (6) direcional, além das adaptações que cada configuração desta pode apresentar. Sendo assim, as ilustrações abaixo referem-se a tipologias já implementadas.



Figura 10 – (a) Interconexão com dupla rotatória; (b) Interconexão em diamante.

Fonte: AASHTO (2011).



Figura 11 – (a) Trevo completo; (b) Interconexão direcional com quatro níveis.

Fonte: AASHTO (2011).



(a)

(b)

Figura 12 – (a) Diamante de ponto único; (b) Completo arranjo de interconexão.

Fonte: AASHTO (2011).

O estudo de caso do presente trabalho é composto por dois tipos de interseção, uma rótula convencional e uma trombeta, interseções em nível e interconexão, respectivamente. Suas principais características serão delineadas na sequência.

Rótula (Rotatória)

As interseções circulares possibilitam o movimento rotatório dos veículos no sentido anti-horário em torno de uma ilha central, a partir da convergência de diversas vias de sentido único ou não. Assim, essas interseções podem ser subdivididas em duas configurações principais, as rótulas convencionais e rótulas modernas.

As rótulas convencionais ou *rotaries* (Figura 13) são soluções ultrapassadas de rotatória onde a preferência do tráfego é geralmente concedida aos veículos que entram na rotatória, admitindo a regra prioritária à direita do condutor, ao invés de ser dada aos veículos que já se encontram efetuando o movimento rotatório. Desse modo, essa configuração não atende satisfatoriamente volumes de tráfego elevados, podendo apresentar tempos de atraso e números de parada significativos e consequentemente comprometer a fluidez do tráfego devido aos congestionamentos formados (TRB, 2010).



Figura 13 – Rótula convencional.

Fonte: TBR (2010).

Ainda, as rótulas convencionais não necessariamente apresentam formato circular e geralmente possuem raios de curvatura grandes acrescidos de faixa tangencial de acesso, possibilitando os veículos adentrarem na interseção com elevada velocidade e, conseqüentemente, acréscimo do risco de acidente.

Esse tipo de configuração não deveria ser utilizado no Brasil, uma vez que o Código de Trânsito Brasileiro – CTB, instituído pela Lei N° 9.503, estabelece regras de prioridade especificamente para as rotatórias. No Capítulo III – Das Normas Gerais de Circulação e Conduta, Artigo 29, referente ao trânsito nas vias terrestres abertas à circulação, inciso III, tem-se que (BRASIL, 1997):

Quando veículos, transitando por fluxos que se cruzem, se aproximarem de local não sinalizado, terá preferência de passagem:

- a) No caso de apenas um fluxo ser proveniente de rodovia, aquele que estiver circulando por ela;
- b) No caso de rotatória, aquele que estiver circulando por ela;
- c) Nos demais casos, o que vier pela direita do condutor.

Diferentemente das rotatórias convencionais, as rotatórias modernas possuem uma definição quanto a sua geometria circular e dispositivos de controle de tráfego, tais como canalização, prioridade para o tráfego que está circulando na rotatória, sinalização horizontal e vertical etc. Ainda, apresenta melhorias substanciais em termos de eficiência operacional e redução na frequência e severidade de acidentes.

As rotatórias modernas conseguem atender a um volume de tráfego elevado através da utilização de diâmetros menores e velocidade inferior em comparação com as rotatórias convencionais, apresentando uma redução no número de paradas e alcance do fluxo de tráfego contínuo e elevado nível de serviço. As rotatórias modernas apresentam categorias diversas, mas que possuem elementos intrínsecos ilustrados na Figura 14.

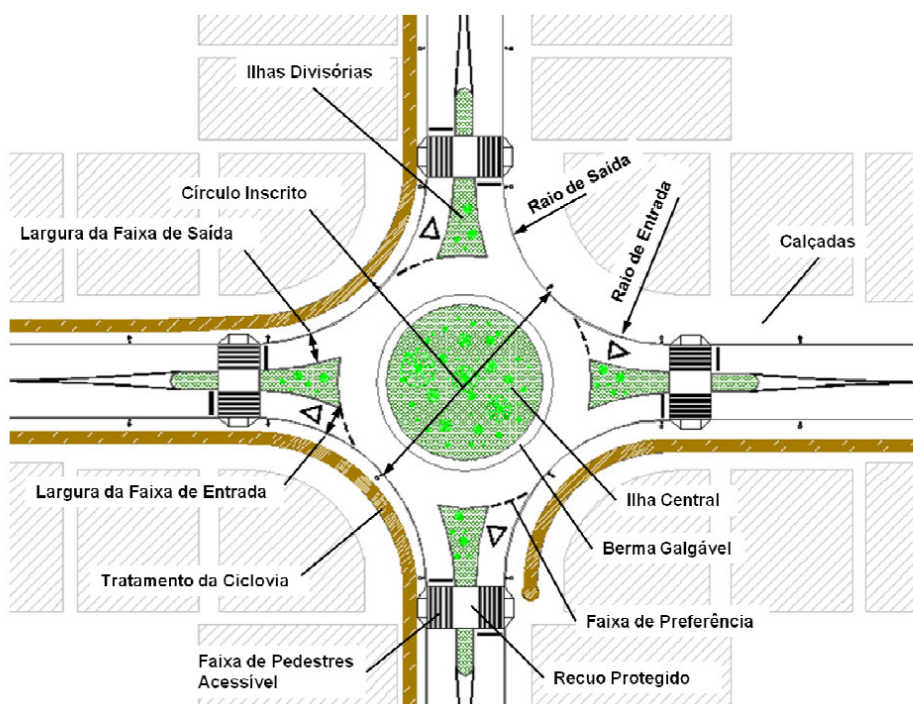


Figura 14 – Elementos característicos de uma rotatória moderna.

Fonte: Coelho (2012).



Figura 15 – Rotatória moderna em 3D.

Fonte: Coelho (2012).

Trombeta

A trombeta é uma interconexão de três ramos com uma estrutura física destinada à separação dos níveis. Essa nomenclatura advém da sua similaridade visual com o instrumento musical de sopro trompete. A trombeta é formada por dois ramos direcionais, um ramo semidirecional e outro em laço (*loop*), explicitados na sequência e enumerados na Figura 16.

De acordo com DNIT (2005), o ramo direcional (1) deve ser constituído de um traçado que apresente a menor variação angular possível na interligação das duas vias, com o intuito de proporcionar um percurso intuitivo entre as direções inicial e final. O ramo semidirecional (2) apresenta ao menos uma reversão na sua variação angular, possibilitada pela inserção de curvas de transição. O ramo em laço ou em *loop* (3) deve facilitar uma conversão decorrente de um giro contínuo à esquerda ou à direita por meio de um ângulo central aproximado de 270°.

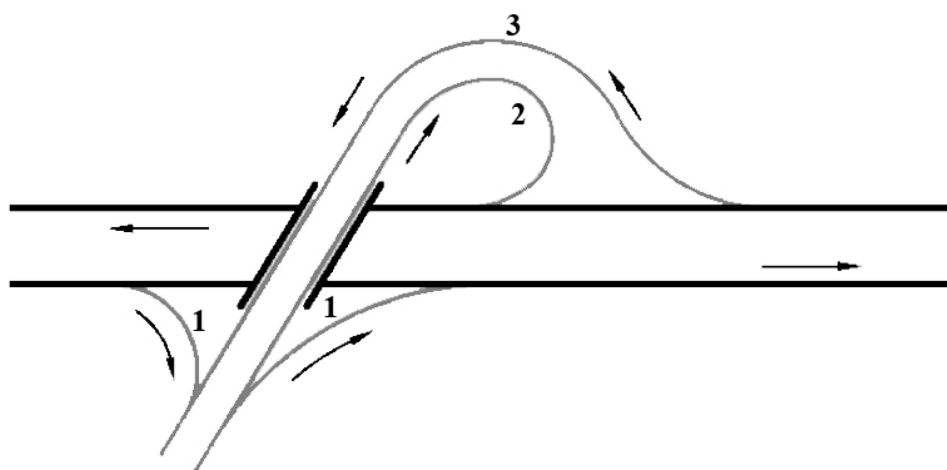


Figura 16 – Ramos formadores da interconexão do tipo trombeta.

Fonte: Adaptado de DNIT (2005).

Além disso, a interconexão do tipo trombeta apresenta duas tipologias principais de projeto, apresentadas na Figura 17.

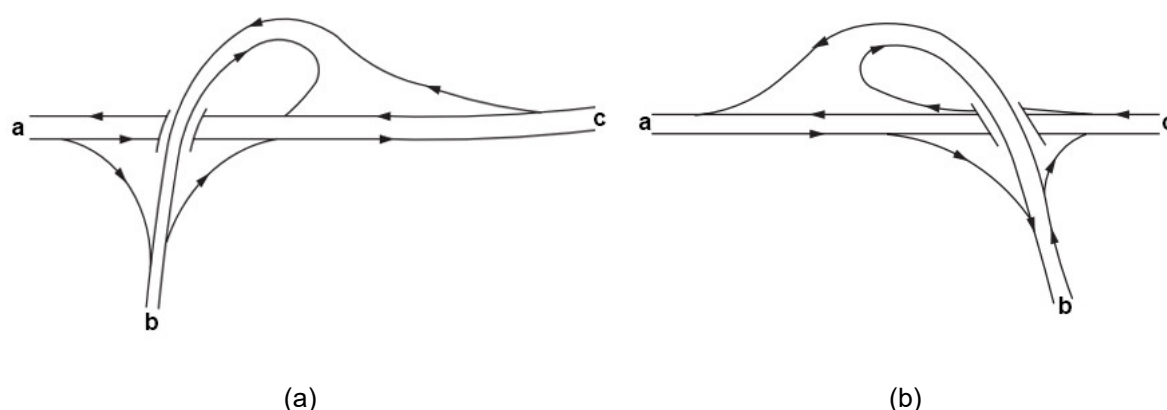


Figura 17 – (a) Interconexão trombeta voltada para à direita; (b) Interconexão trombeta voltada para à esquerda.

Fonte: Adaptado de AASHTO (2011).

O critério de seleção de uma ou da outra tipologia está relacionado com o volume relativo dos veículos que efetuam a conversão à esquerda, obtido a partir das projeções de tráfego. Ambas as configurações, caso apresentem a mesma adaptabilidade às condições locais, possuem custos de implantação de mesma ordem.

No entanto, alguns detalhes devem ser levados em consideração no projeto de uma interconexão do tipo trombeta conforme a *Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen* - FGSV (2008) e AASHTO (2011):

- A trombeta voltada para a esquerda, configuração apresentada na Figura 17b, é mais favorável à segurança rodoviária. Sempre que possível deve ser considerada como solução padrão, devido ao movimento de conversão da rodovia secundária em direção à rodovia principal (b-a) ser dado através de um ângulo esconso. Enquanto que na trombeta voltada para a direita, apresentada na Figura 17a, o movimento de conversão é promovido através de um ângulo reto.
- O movimento a-c apresentado em ambas as configurações, refere-se ao fluxo de tráfego da rodovia principal e, conseqüentemente, ao maior volume, devendo ser posicionado no alinhamento direto.
- A curvatura do ramo em *loop* e do ramo semidirecional, movimento b-a da Figura 17a e Figura 17b, respectivamente, devem ser iniciadas antes da estrutura de separação dos greides, com o intuito de alertar ao condutor acerca

da modificação brusca em curvatura. Essa modificação pode ser obtida se utilizando de curvas de transição em espiral. Caso essa modificação não seja possível ou prevista em projeto, sinais direcionais e de redução de velocidade devem ser instalados a fim de neutralizar essas desvantagens.

- Na Figura 17b, o movimento c-b de saída do ramo em *loop* deve ser posicionado com o intuito de propiciar um comprimento de desaceleração suficiente em virtude da modificação sequencial na curvatura.

A Figura 18 apresenta um exemplo real de uma interconexão do tipo trombeta. A Figura 19 retrata outra configuração dessa interconexão, utilizando duas estruturas de separação dos greides, onde a rodovia secundária efetua um cruzamento de passagem superior e sequencialmente um movimento de passagem inferior em relação à rodovia principal, devido à inclinação íngreme do terreno. Além disso, esse *design* remonta a um maior fluxo de veículos sendo atendido pelo ramo semidirecional, e o menor fluxo pelo ramo em *loop*.



Figura 18 – Interconexão do tipo trombeta.

Fonte: AASHTO (2011).

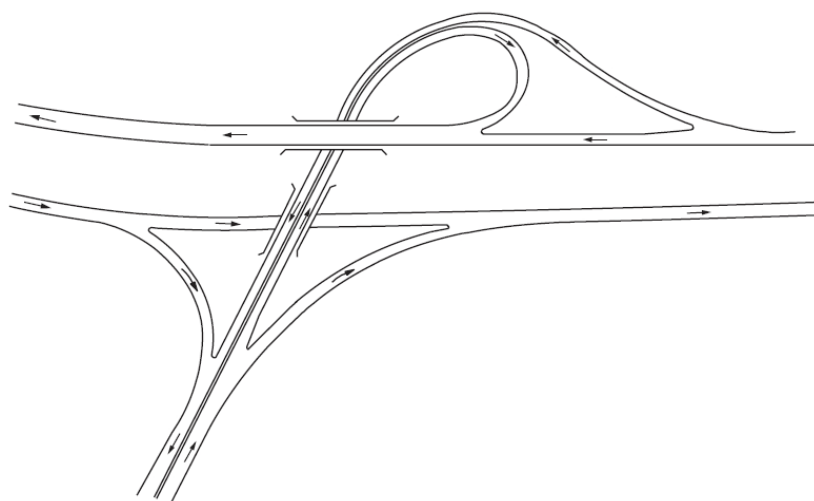


Figura 19 – Interconexão do tipo trombeta.

Fonte: AASHTO (2011).

Como vantagens, a interconexão do tipo trombeta apresenta ausência de entrecruzamentos; alta capacidade de tráfego; movimentos direcionais e semidirecionais. Além disso, esse tipo de interconexão apresenta relativo baixo custo de implantação em comparação com as demais configurações de interconexões apresentadas.

2.2 Áreas de conflito

Dentro de uma interseção existem áreas onde veículos individuais inseridos em correntes de tráfego distintas devem decidir qual o movimento/manobra deve ser realizado para o prosseguimento do fluxo. Esse fator decisório potencializa o decréscimo da capacidade da via e o risco de acidentes, já que a natureza dos movimentos realizados pelos condutores encadeia pontos conflitantes inerentes, através da ocupação de uma mesma área pavimentada ao mesmo tempo (GARBER e HOEL, 2009; LAY, 2009). Na sequência, apresenta-se os quatro tipos possíveis de movimentos em interseções e seus pontos de conflitos intrínsecos de acordo com o DNIT (2005):

Movimentos de Cruzamento

Os movimentos de cruzamento são realizados quando os veículos inseridos em corrente de tráfego transpõem a trajetória de outra corrente, o que pode acarretar conflitos de cruzamento.

Movimentos Convergentes

Os movimentos convergentes ou incorporações são realizados quando duas ou mais correntes de tráfego, inicialmente em trajetórias distintas, se unificam. Os movimentos convergentes podem gerar conflitos de convergência.

Movimentos Divergentes

Os movimentos divergentes são realizados quando uma corrente de tráfego se desagrega a partir da formação de correntes em trajetórias distintas, o que pode gerar conflitos tidos como de divergência.

Movimentos de Entrecruzamento

Trechos de entrecruzamento ou entrelaçamento se caracterizam pela junção entre os movimentos convergentes e divergentes, ou seja, os veículos inseridos em correntes de tráfego distintas se unificam formando uma só corrente (convergência) e sequencialmente se separam em correntes independentes (divergência). Observa-se inicialmente conflitos de convergência prosseguidos de conflitos de divergência.

A ilustração abaixo (Figura 20) caracteriza as possibilidades de pontos de conflito de acordo com os movimentos executados pelos condutores.

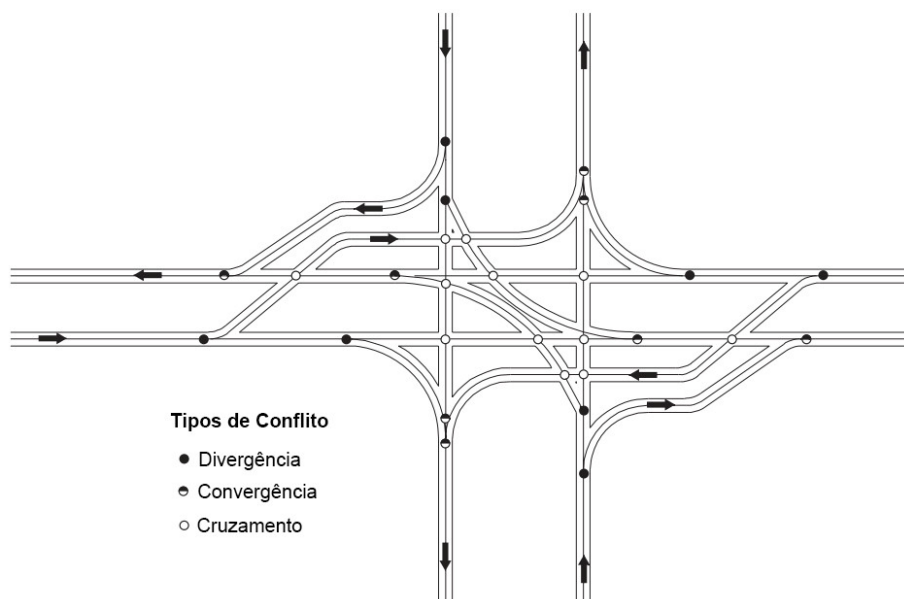


Figura 20 – Tipos de conflito em uma interseção.

Fonte: Adaptado de AASHTO (2011).

2.3 Classificação funcional das vias interceptantes

As vias componentes da malha viária apresentam características distintas, necessitando de critérios de classificação que as associem de acordo com a sua operação, funcionalidade ou tipo de geometria empregada, com o intuito de possibilitar a comunicação e atender os objetivos de caráter administrativo, técnico e dos usuários em geral. Nesse sentido, diversos esquemas de classificação têm sido propostos para as malhas viárias urbana e rural, à exemplo da classificação de caráter administrativo, a técnica e a funcional.

A classificação administrativa ordena as vias componentes da malha urbana de acordo com a jurisdição (federal, estadual ou municipal) em que estão inseridas, geralmente através de siglas alfanuméricas, objetivando a organização racional das atividades como o planejamento, funcionamento, construção, operação e relacionamento com os usuários das vias. A classificação técnica está relacionada com a promoção de características geométricas, como raios de curvatura, largura da pista, distância de visibilidade etc. condicionadas às restrições impostas pelo relevo (plano, montanhoso ou ondulado), que possibilitem o atendimento dos volumes de tráfego previstos com economia, conforto e segurança aos usuários em seus trajetos.

No entanto, o método predominante de classificação é a funcional, uma vez que se inter-relaciona com as classificações administrativa e técnica (DNER, 1999).

Embora a acomodação de ciclistas, pedestres, e usuários do sistema de transporte público seja necessária no planejamento e projeto de vias urbanas ou rurais, a classificação funcional é primariamente derivada das características de viagem de veículos motorizados. Nesse sentido, grande parte das viagens (Origem-Destino ou O/D) realizadas por esses veículos, apresentam seis estágios reconhecíveis de movimentos, apresentados na Figura 21 e descritos na sequência.

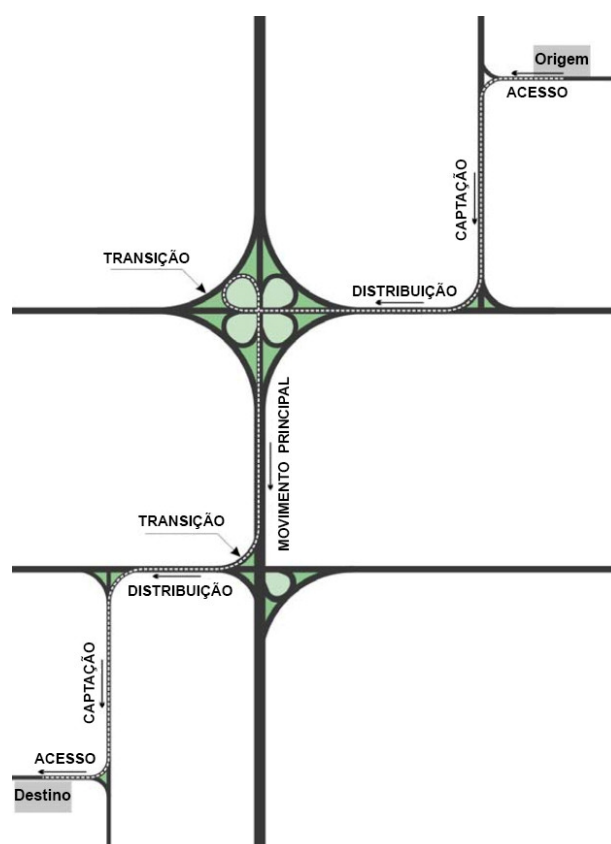


Figura 21 – Hierarquização dos movimentos.

Fonte: Adaptado de DNER (1999).

O estágio inicial da viagem hipotética apresentada na Figura 21 tem seu início no acesso do veículo a uma via local, geralmente de tráfego reduzido em comparação às demais. Na sequência, o condutor passa para um segundo estágio da viagem que se dá através da captação, por uma via de maior tráfego, denominada de coletora, uma vez que capta os veículos das vias locais. Após a captação, tem-se o estágio de distribuição, onde o condutor passa para uma via com características geralmente

superiores às da captação, à exemplo tem-se uma via arterial secundária; o quarto estágio é dado pela transição, que retrata elementos de tráfego como rampas de acesso ou ramais de interseção. Sequencialmente, tem-se o movimento principal, quinto estágio, onde a viagem é executada em uma via de padrão mais elevado, como uma via arterial principal. Por fim, tem-se o último estágio que seria o acesso à propriedade na qual irá se estacionar o veículo, chegando ao destino almejado (AASHTO, 2011).

Diante do exposto, a hierarquização da classificação funcional é representada pelas vias: Arterial, coletora e local, sendo definidas de acordo com DNER (1999):

Sistema Arterial

Caracterizado por proporcionar um elevado grau de mobilidade para grandes volumes de tráfego, tendo como principal função o atendimento do tráfego de longa distância, preferencialmente em caráter interestadual ou internacional, e servindo o tráfego local ocasionalmente. O sistema arterial subdivide-se em arterial principal, primário e secundário.

Sistema Coletor

Complementa o sistema arterial, tendo como função principal atender o tráfego intermunicipal e centros geradores de tráfego não englobados na hierarquia superior. Possui distâncias de percurso inferiores aos das rodovias arteriais, independentemente dos volumes de tráfego. Em adição, o sistema coletor possibilita a ligação das áreas rurais e centros urbanos à malha arterial, com o intuito de proporcionar mobilidade e acesso a uma determinada área do Estado. Além disso, o sistema coletor subdivide-se em coletor primário e secundário.

Sistema Local

Constituinte por rodovias de pequena extensão, as quais proporcionam a interligação do tráfego intramunicipal de áreas rurais e de pequenas localidades às rodovias situadas em uma hierarquia superior.

A Figura 22 ilustra a classificação funcional em áreas rurais e urbanas.

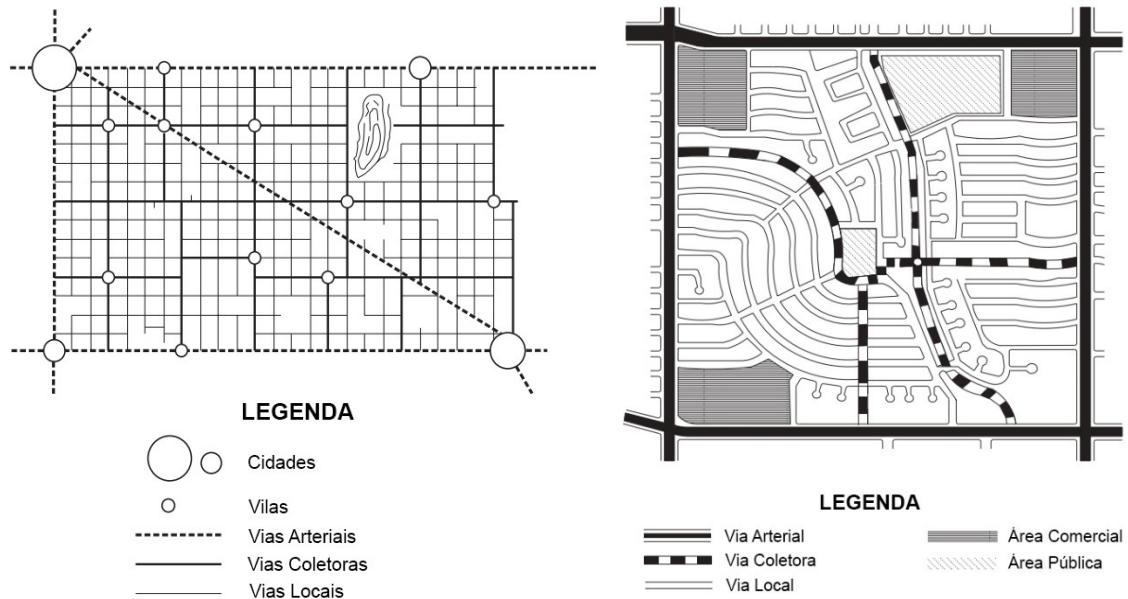


Figura 22 – Comparação entre a área física e funcional de uma interseção.

Fonte: Adaptado de AASHTO (2011).

Em suma, a classificação funcional reconhece que vias individuais não permitem a realização de uma viagem de forma independente, ao invés disso, a maioria dos movimentos das viagens ocorrem através de redes de vias integradas que podem ser agrupadas de forma lógica, consistente e contínua, onde cada movimento realizado pelo condutor é atendido por uma via projetada especificamente para a função a ser atendida.

Cada categoria dentro da classificação funcional é diretamente relacionada com o volume de tráfego, a variação de velocidade apresentada pelos veículos e a mobilidade e acessibilidade requeridas nas viagens. Nesse contexto, as vias locais enfatizam o acesso às propriedades; as vias arteriais, buscam um alto nível de mobilidade para que haja um movimento contínuo na viagem; as vias coletoras são projetadas para que se tenha um traçado intermediário entre acessibilidade e mobilidade.

A Tabela 1 apresenta as características das vias componentes do sistema funcional e a sua inter-relação com as classes de projeto decorrentes da classificação técnica.

Tabela 1: Classificação funcional – Característica das vias.

Sistema Funcional		População	Extensão (%)	Veíc -km (%)	Viagem (km)	TMD	Vmédia (km/h)	Classes de Projeto
Arterial	Principal	150.000	2,0 - 3,5	30-35	120	1000	60 - 120	0 e I
	Primário	50.000	1,5 - 3,5	15-20	80	500	50-100	I
	Secundário	10.000	2,5 - 5,0	10-20	60	250	40-80	I e II
Coletor	Primário	5000	4,0 - 8,0	8-10	50	150	30-70	II e III
	Secundário	2000	10 – 15	7-10	35	50	30-60	III e IV
Local		-	65 – 80	5-30	20	10	20-50	III e IV

Fonte: Adaptado de ANTAS et al. (2010).

Sendo,

População: número de habitantes das cidades interligadas pelo sistema;

Extensão: extensão das rodovias do sistema dentro da malha viária;

Veíc - km: veículos-quilômetros realizados;

Viagem: extensão média de percurso das viagens realizadas;

TMD: tráfego médio diário;

Vmédia: velocidade média de operação;

Classes de Projeto: Classe 0 refere-se a rodovias do mais elevado padrão técnico; Classe IV refere-se a rodovias de pista simples, com apenas revestimento primário.

2.4 Capacidade e Níveis de Serviço

O *Highway Capacity Manual* (HCM) é uma publicação da *Transportation Research Board* (TRB), a qual compila o estado da arte quando se trata de metodologias para a quantificação do desempenho operacional do tráfego e capacidade de utilização das vias, ou nível de congestionamento, para diferentes instalações de transporte. Uma das bases do HCM é o conceito de Nível de Serviço (NS), do inglês *Level of Service* (LOS), o qual caracteriza as condições de operação da rodovia em termos de medidas de desempenhos do tráfego, tais como velocidade e tempo de viagem, liberdade de manobra, interrupções no trânsito, conforto e conveniência do condutor etc. (MANNERING; WASHBURN, 2012).

O NS é designado pelas letras A, B, C, D, E e F, onde A representa um nível menos congestionado, de fluxo livre, e F o nível mais congestionado, com um fluxo forçado ou com interrupções. Uma perspectiva visual dos níveis de serviço é ilustrada na Figura 23.

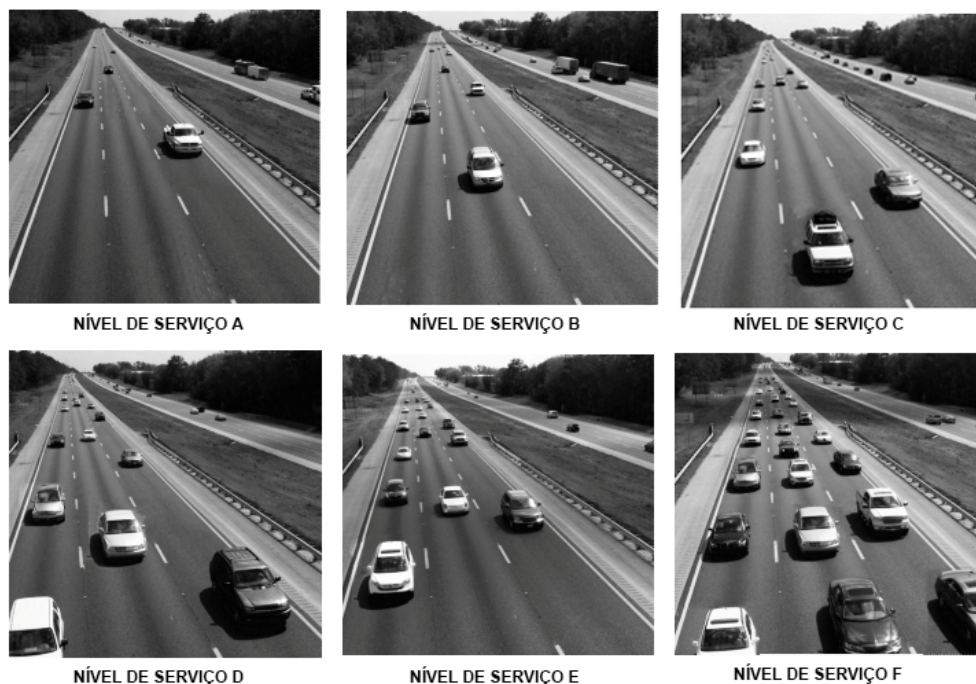


Figura 23 – Representação visual dos Níveis de Serviço.

Fonte: Adaptado de Mannering; Washburn (2012).

Quando o volume de tráfego está próximo da capacidade da rodovia, esta encontra-se operando no NS E, o que não seria desejável, uma vez que condições como esta podem acarretar no desconforto do condutor, e conseqüentemente elevar a possibilidade de acidentes e um congestionamento generalizado.

No projeto de uma rodovia, a degradação para o NS E, definido como sendo um fluxo instável limitado pela capacidade, deve ser evitada, embora isso não seja sempre possível devido às restrições financeiras e ambientais que podem limitar a velocidade de projeto, número de faixas e outros fatores que afetam diretamente a capacidade da mesma. No entanto, as autoridades rodoviárias responsáveis pelo projeto, operação e manutenção das vias devem buscar o fornecimento do maior grau de serviço de acordo com as condições impostas. Por exemplo, em setores muito desenvolvidos de áreas metropolitanas, as vias e seus elementos auxiliares podem ser projetadas para atender a um NS D. No entanto, esse nível de serviço deve ser usado com moderação e pelo menos o nível de serviço C deve ser almejado (DNIT, 2010).

Diante do exposto, a análise da capacidade e o do nível de serviço em uma interseção é tida como uma das mais importantes considerações que devem ser feitas

em seu projeto, uma vez que a capacidade e fluidez de uma rodovia é determinada primariamente pela capacidade das suas interseções.

3 MÉTODOS DE ANÁLISE DE TRÁFEGO

Nas diversas cidades brasileiras, o nível de congestionamento continua a crescer em ritmo acelerado, afetando diretamente a qualidade de vida das pessoas e potencializando o risco de acidentes e atrasos generalizados. Nesse aspecto, de acordo com FHWA (2004), a engenharia de tráfego entra em ação com o intuito de aumentar a produtividade dos sistemas de transportes existentes através do uso de melhorias operacionais. A fim de avaliar a eficácia potencial de uma estratégia em específico, ferramentas ou metodologias de análise de tráfego devem ser utilizadas.

São várias as ferramentas e metodologias de análise de tráfego disponíveis para uso, as quais variam em escopo, método, capacidade, dados de entrada requeridos e de saída. Em adição, não há uma ferramenta única que possa abordar todas as necessidades analíticas de um determinado problema. No entanto, as ferramentas de análise de tráfego são projetadas para auxiliar os profissionais de transporte na avaliação das estratégias que melhor atendam às necessidades impostas pelo projeto. Além disso, essas ferramentas emergem como um dos métodos mais eficientes para avaliar projetos de melhoria de transporte, incluindo pacotes de *software*, metodologias e procedimentos a serem utilizados de acordo com a complexidade e objetivos do projeto.

Diante do exposto, são apresentados dois dos métodos mais utilizados.

3.1 Métodos determinísticos

Os métodos determinísticos ou analíticos são amplamente utilizados. Estes se baseiam em formulações pré-definidas as quais necessitam assumir hipóteses e possuem diversas restrições, especialmente quando se trata de variáveis de difícil mensuração. Além disso, esse método descarta fenômenos aleatórios atrelados ao tráfego de veículos, resultando na perda de precisão e representatividade. Em contrapartida, sua utilização demanda reduzido tempo e custo, uma vez que necessitam de requerimentos mínimos.

Diversos softwares para finalidades específicas utilizam-se desses métodos. Alguns deles são: *SIDRA Intersection*, *Rodel*, *TORUS* e *Arcady*. Em adição, tem-se a metodologia recomendada pelo *Highway Capacity Manual* (HCM 2010).

3.2 Métodos estocásticos

Os métodos estocásticos de análise permitem a reprodução do tráfego em situações reais com o intuito de se buscar alternativas para os problemas através da incorporação de variáveis aleatórias nas análises de tráfego, uma vez que possibilitam avaliar modificações futuras na rede através de indicadores de desempenho. Nesse aspecto, a microsimulação de tráfego utiliza-se dos métodos estocásticos, permitindo análises detalhadas de áreas complexas e a obtenção de resultados que geralmente não são possíveis pelos métodos determinísticos.

Alguns dos *softwares* de microsimulação são: *Integration*, *CORSIM*, *AIMSUN*, *SimTraffic*, *Paramics* e o *VISSIM*.

3.2.1 PTV VISSIM©

Pelas vantagens descritas anteriormente e considerando o objetivo deste trabalho, a metodologia adotada contempla a utilização de um microsimulador estocástico avançado, o PTV VISSIM©. Ainda, dentre os diversos *softwares* com licença acadêmica disponíveis, este é o que apresenta maior facilidade de interação e vasta literatura, além de diversos estudos comprobatórios da sua eficácia.

O VISSIM© permite a simulação do fluxo de tráfego de diferentes modais de transporte, incluindo o transporte rodoviário de passageiros ou de carga, ferroviário, pedestres e ciclistas. Ainda, o programa possibilita a interação entre esses modais dentro de um único modelo realista, ou a parametrização individual de veículos e pedestres. Em adição, o *software* é flexível, possibilitando a modelagem de geometrias diversas e a integração com sistemas externos de controle e gerenciamento de tráfego, bem como com modelos de emissão de gases poluentes. Ademais, o PTV VISSIM© permite a obtenção de resultados numéricos detalhados ou animações em 3D. Ilustrações do *software* são apresentadas na Figura 25 e Figura 25 (PTV, 2017).



Figura 24 – Interface e projetos realizados no VISSIM©.

Fonte: PTV (2017).

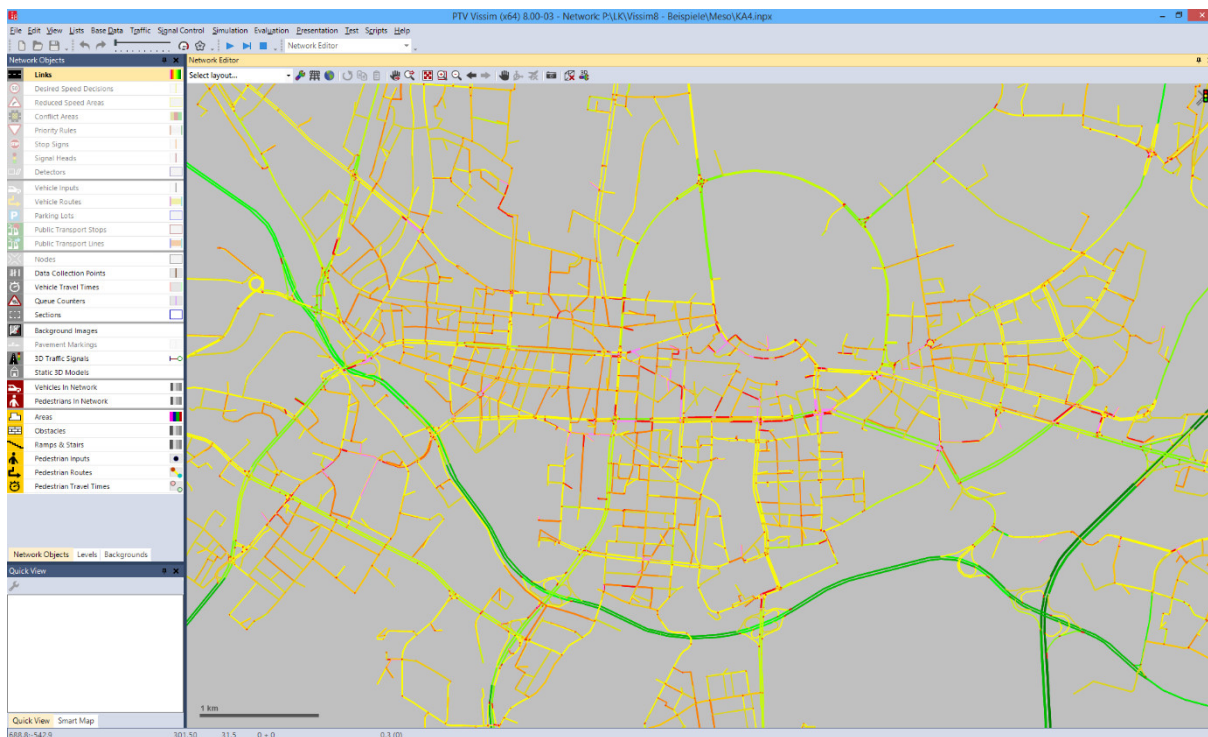
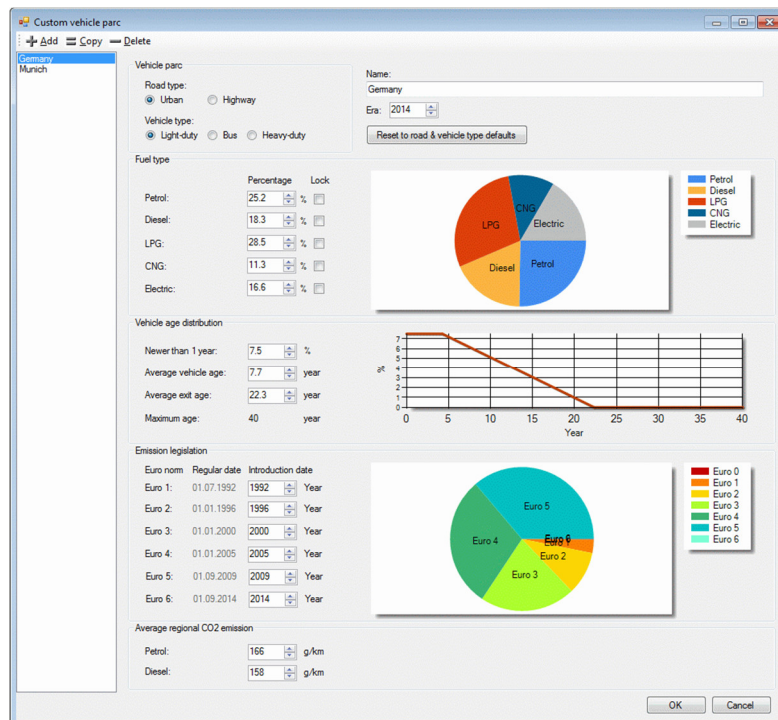


Figura 25 – Interface e projetos realizados no VISSIM®.

Fonte: PTV (2017).

4 ESTUDO DE CASO

4.1 Caracterização da área de estudo

Arapiraca é um município localizado na mesorregião do agreste alagoano. Sua população foi estimada em 234.185 habitantes pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) em 2017, sendo o segundo município mais populoso do estado, atrás apenas da capital Maceió, distando desta cerca de 128 km (IBGE, 2017).

A cidade ficou conhecida como a “Capital Brasileira do Fumo” em meados dos anos 70 devido ao seu potencial para a cultura agrícola do tabaco, conhecido naquela época como “Ouro Verde”, tornando-a uma das maiores produtoras de tabaco do Brasil naquele período. Essa cultura entra em decaimento a partir da década de 80, sendo substituída gradativamente pelo comércio, aquecido pelas tradicionais feiras livres, e serviços, propiciando um crescimento econômico significativo (ARAPIRACA, 2016).

De acordo com Romão (2008), Arapiraca é considerada a principal cidade do interior de Alagoas e importante centro comercial da região agreste. A área de influência direta do município atinge uma população de aproximadamente 500 mil habitantes devido a sua posição geográfica estar situada na região central do Estado de Alagoas conforme ilustrado na Figura 26.



Figura 26 – Localização geográfica da cidade de Arapiraca no Estado de Alagoas.

Fonte: Adaptado de conteúdo da internet, disponível em:

https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Alagoas_Municip_Arapiraca.svg.

Nesse aspecto, Arapiraca passa a atender diversas cidades circunvizinhas, tendo como limites ao norte, o município de Igaci; ao sul, o município de São Sebastião; a leste, os municípios de Coité do Nória e Limoeiro de Anadia; à oeste, os municípios de Lagoa da Canoa, Girau do Ponciano e Feira Grande; à noroeste, o município de Craíbas, e a sudeste, o município de Junqueiro.

Diante do exposto, Arapiraca é o centro de diversas rotas interestaduais e intermunicipais, tendo como principais rodovias estaduais, a AL-115, AI-220, AL-485, AL-486 e a AL-110. A rodovia AL-110, ao adentrar no município de Arapiraca, recebe o nome de Rodovia Dr. Geraldo Cavalcante Cajueiro. Esse posicionamento central atrai diversas viagens diárias, e conseqüente crescimento do número de veículos que circulam na região. Esse fator, atrelado ao não planejamento adequado da hierarquização do sistema viário da cidade, tem acarretado inúmeros problemas de capacidade nas vias do município, as quais apresentam sinais de decaimento do nível de serviço e proximidade do seu ponto de saturação, especialmente quando se trata das interseções.

Em adição, a frota de veículos circulante da cidade de Arapiraca tem crescido consideravelmente conforme ilustrado na Figura 27. De acordo com o levantamento feito no Departamento Nacional de Trânsito (DENATRAN), a cidade apresentou uma frota de 94.237 veículos no ano de 2016, dos quais 54% são motocicletas e 40% automóveis (DENATRAN, 2017). Ademais, em 15 anos, a frota arapiraquense apresentou um incremento de 307% de acordo com a Tabela 2. Contudo, os investimentos na melhoria da malha viária da cidade não têm acompanhado esse mesmo crescimento.

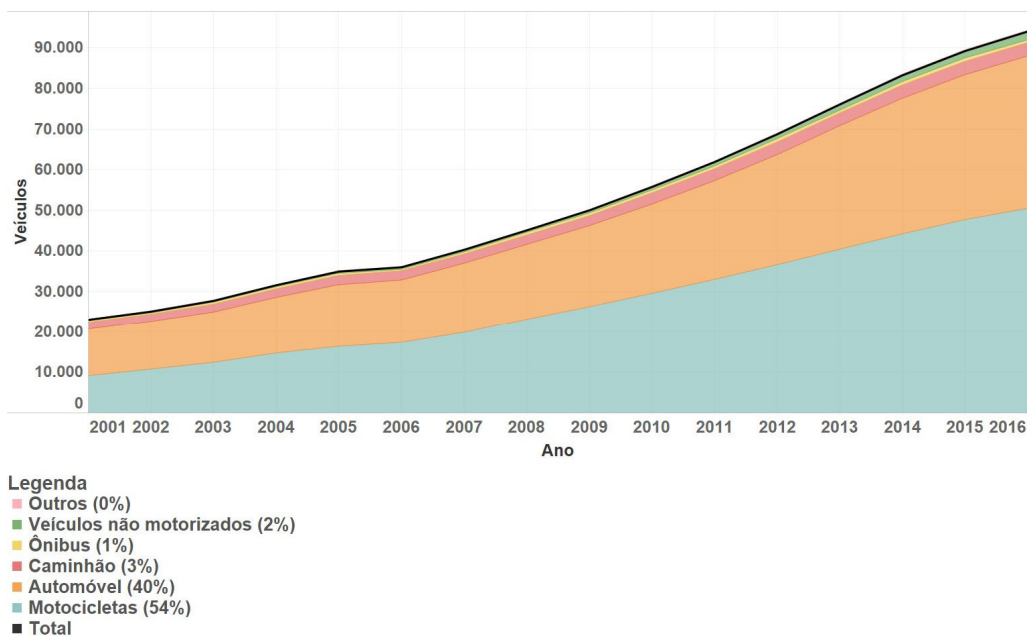


Figura 27 – Evolução da frota circulante de veículos no município de Arapiraca.

Fonte: Adaptado de DENATRAN (2017).

Tabela 2: Variação da frota circulante de veículos de Arapiraca em 15 anos.

	Automóvel	Motocicleta	Ônibus	Caminhão	Veículo não-motorizado	Outros	Total
2001	11490	9105	368	1844	335	3	23145
2016	37372	50504	769	3279	2310	3	94237
Variação	225%	455%	109%	78%	590%	0%	307%

Fonte: Adaptado de DENATRAN (2017).

Diante do exposto, buscou-se junto às entidades de trânsito competentes, a Superintendência Municipal de Transporte e Trânsito (SMTT) da cidade de Arapiraca e o Departamento de Estradas de Rodagem (DER) do estado de Alagoas, locais críticos na cidade que apresentassem problemas de tráfego. Após observações em campo nos locais críticos pré-definidos, uma área se destacou por apresentar congestionamentos recorrentes e áreas conflitantes visíveis em comparação as demais áreas analisadas, conforme observado nas figuras (Figura 28) que seguem:



Figura 28 – Congestionamento visualizado em campo.

Fonte: Autor (2017).

A área é composta por duas interseções interligadas, uma rótula convencional em nível e uma interconexão do tipo trombeta. De acordo com o DNIT (2005), não é pertinente o uso de interconexões e rotatórias em uma mesma rodovia conforme a configuração apresentada.

Essa área tem passado por modificações ao longo dos anos, ilustrada na evolução apresentada na Figura 29.



Figura 29 – Evolução da área em estudo.

Fonte: *Google Earth.*

A última modificação está relacionada com a duplicação da Rodovia AL-110 e consequente modificação da área em estudo, conforme projeto executivo no Anexo 1. Nesta, além da inserção de uma segunda estrutura de separação dos greides no intuito de duplicar a rodovia AL-110 no perímetro da interconexão, tem-se o alargamento da rotatória com o intuito de minimizar os problemas de congestionamento apresentados e adequá-la à duplicação da via principal vigente, conforme ilustração abaixo:



Figura 30 – Início das obras de duplicação da Rodovia AL-110.

Fonte: Google Earth.

Contudo, embora a duplicação da área ainda não esteja completamente finalizada, especialmente nos ramos de entrada e saída da interconexão, diversos problemas já foram constatados através das observações em campo. O primeiro deles, pela definição de rotatória convencional, é a prioridade dada aos veículos que estão acessando a rotatória, conforme ilustrado na Figura 31:



Figura 31 – Regra de prioridade visualizada em campo.

Fonte: Google Earth e Autor (2017).

A formação de filas de veículos é constante, especialmente nos horários de pico, se estendendo por toda área adjacente, acarretando em um congestionamento generalizado.

Sequencialmente, diversos movimentos irregulares e conflituosos foram observados, devido a não finalização do projeto e instalação dos dispositivos físicos de separação dos sentidos das vias, acrescido da imprudência dos condutores e fiscalização insuficiente ou permissiva da área em análise.



Figura 32 – Movimento irregular de convergência e cruzamento.

Fonte: Autor (2017).



Figura 33 – Movimento irregular de convergência.

Fonte: Autor (2017).

Conforme observado em outros locais críticos da cidade, essa área ainda é agravada pelo não atendimento da hierarquia das vias, uma vez que a rodovia, que deveria possuir um caráter arterial, tem funcionado como via coletora e até local. Esse fato acarreta a diminuição da capacidade viária e decréscimo da sua vida útil.

Portanto, o presente trabalho objetiva analisar o tráfego de toda essa região através da microssimulação de tráfego com o intuito de buscar alternativas de melhoria para a área em estudo. Assim, houve a necessidade de se obter dados em quantidade e qualidade representativa, uma vez que estes seriam utilizados no processo de calibração e validação dos cenários a serem modelados, com o intuito de representar o mais fidedigno possível as condições de tráfego locais.

4.2 Definição do horário de pico

Com o intuito de se obter dados de tráfego que caracterizassem a área em estudo, busca-se as entidades responsáveis, a SMTT Arapiraca e o DER/AL, nos âmbitos municipal e estadual, respectivamente. Contudo, ambas entidades não possuíam um banco de dados de contagem volumétrica e classificatória que possibilitassem a determinação da hora de pico e caracterização do tráfego, conforme recomendado pelo DNIT. Alternativamente, opta-se pela utilização de uma ferramenta externa, o *Google Traffic*, embutido no *Google Maps*, o qual possibilita a visualização das condições típicas e em tempo real do tráfego de uma determinada localidade.

De acordo com o Google (2009), o funcionamento do *Google Traffic* se dá através do processo conhecido como *crowdsourcing*, onde os usuários, embutidos de aparelhos móveis com GPS, os chamados *smartphones*, passam a enviar dados de suas localizações dentro da malha viária de forma anônima e automática. A partir dessa informação pontual, acrescida a de outros usuários, o Google pode prever a velocidade dos veículos e conseqüentemente a velocidade com que o tráfego está se movendo em tempo real. Além disso, o *Google Traffic* mantém em sua base um histórico do tráfego da área, o que possibilita a sua caracterização e visualização.

Nesse sentido, a Figura 34 retrata a utilização da escala de cores presente no *Google Traffic*, a qual possibilita a visualização do grau de congestionamento da área em estudo englobando todas as horas e dias da semana. A partir da observação e comparação da área em todos os dias e horas da semana no *Google traffic*, definem-se os dois possíveis horários de pico, o primeiro englobando o período da manhã, de 11:30 até 12:30 horas, e o outro no período da tarde, entre 17:00 e 18:00 horas. Nesses horários, o tráfego local apresentou um comportamento mais lento em comparação às demais horas do dia, recorrente nos diversos dias da semana, excetuando os finais de semana que não caracterizam o comportamento de fluxo intenso.

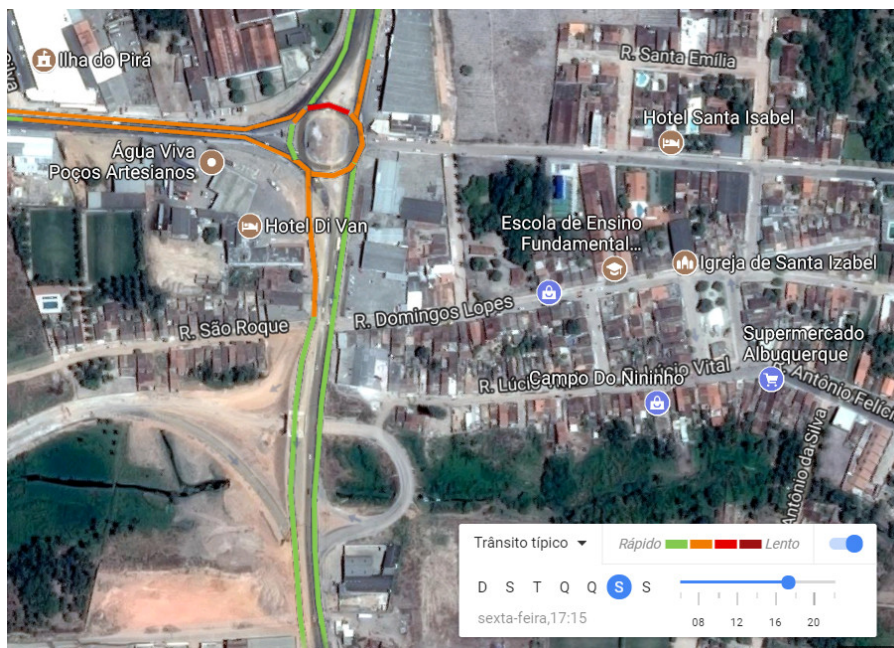


Figura 34 – Exemplificação da determinação dos intervalos de pico da área em estudo.

Fonte: Google Traffic.

4.3 Levantamento de campo

A partir da definição dos intervalos de pico nos períodos da manhã e tarde, parte-se para a obtenção dos dados *in loco* a serem utilizados no processo de modelagem da área em estudo. Assim, o primeiro passo foi buscar locais que permitissem a visualização de todos os movimentos de entrada e saída de veículos das interseções componentes do sistema viário em questão para a instalação dos equipamentos de filmagem. Desse modo, duas câmeras filmadoras (CM1 e CM2) de alta resolução foram utilizadas no processo de filmagem, sendo posicionadas de acordo com a Figura 35.



Figura 35 – Posicionamento e área de abrangência das câmeras filmadoras CM1 e CM2.

Fonte: Adaptado de *Google Maps*.

As filmagens tiveram início às 11:00 horas, se estendendo até às 14:00 horas do dia 6 de outubro de 2017, permitindo a obtenção de dados referentes ao horário de pico da manhã. Semelhantemente, para o horário de pico do período da tarde, as filmagens tiveram início às 16:00 se estendendo até às 18:00 horas. As câmeras filmadoras foram acionadas simultaneamente com o intuito de caracterizar toda a área em estudo e possibilitar uma calibração adequada do modelo a ser simulado. Assim, a Figura 36 apresenta o posicionamento da CM1 e a vista que se tinha através desta, bem como a Figura 37 refere-se ao posicionamento da CM2 e sua respectiva vista.



Figura 36 – Posicionamento da CM1.

Fonte: Autor (2017).



Figura 37 – Posicionamento da CM2.

Fonte: Autor (2017).

No processo de validação do modelo, houve a necessidade de se obter dados reais da velocidade média dos veículos que circulavam na área estudada no intervalo temporal de análise definido. Para isso, utiliza-se o conceito de veículo *float*, referente a veículos equipados com *GPS data logger*, que ao serem acionados, permitem o registro de diversos dados referenciados por tempo e posição do veículo.

Devido à falta de tais recursos no presente estudo, e baseado em uma solução adotada em Victorino (2014), opta-se alternativamente pela utilização do GPS integrado do *smartphone* em conjunto com o aplicativo *Runtastic*. Semelhantemente a um *GPS data logger*, essa integração permitiu a obtenção de dados georreferenciados, que ao serem computados pelo aplicativo móvel no momento em que as leituras estão sendo feitas, possibilita a visualização da variação da velocidade ao longo do percurso realizado. Ainda, o mesmo permitiu a plotagem de gráficos de Velocidade x Distância x Elevação (Figura 38), e consequente obtenção da velocidade média de trajeto, as quais puderam ser visualizadas dentro do próprio aplicativo e na interface web complementar.

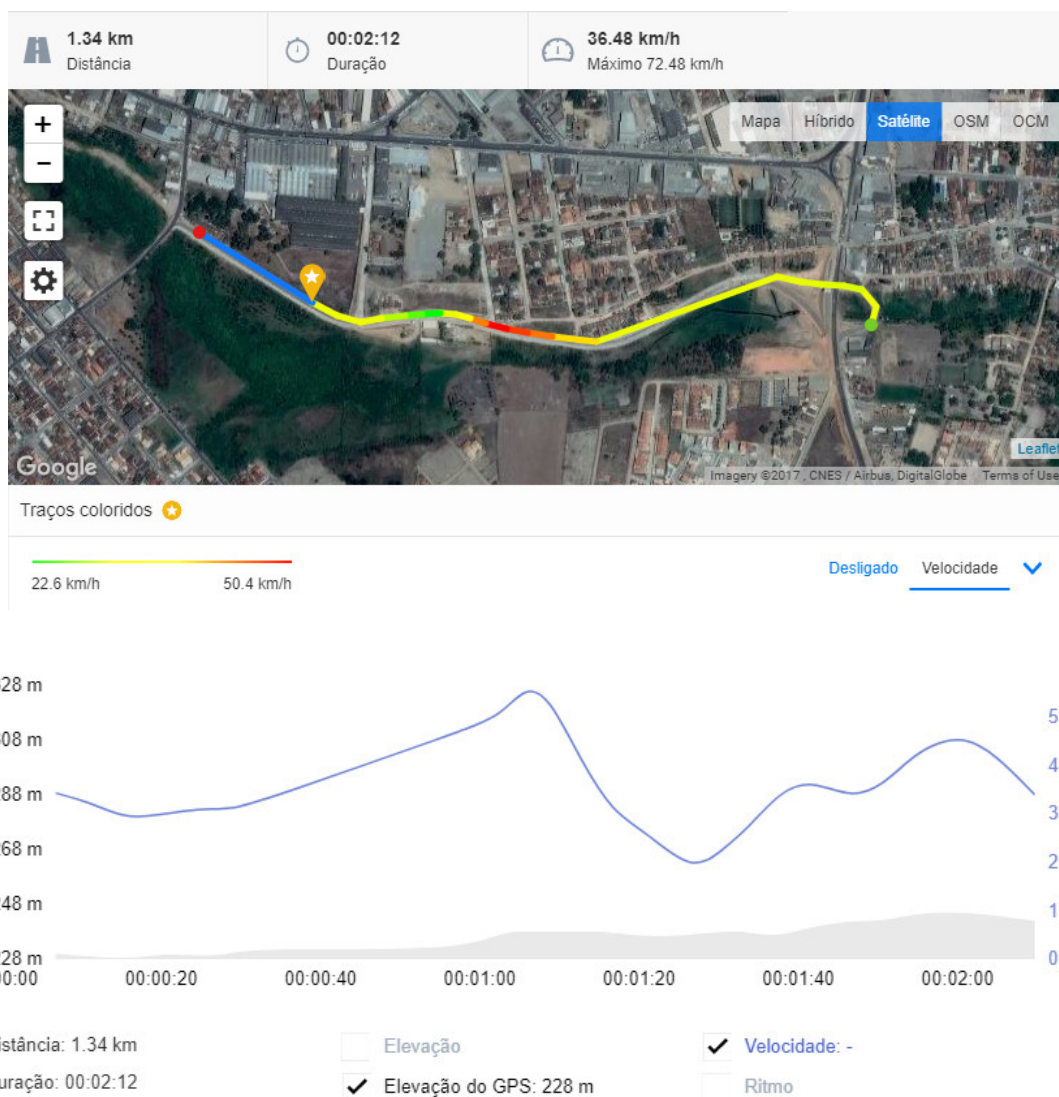


Figura 38 – Gráfico Velocidade x Distância x Elevação obtido através do aplicativo *Runtastic*.

Fonte: *Runtastic.com* (2017).

Nesse aspecto, foram realizadas um total de 12 medições veiculares nos diversos trajetos componentes da área em estudo. Em adição, conforme proposto em Victorino (2014), para que se viesse garantir o cálculo significativo da velocidade média que representasse o comportamento do fluxo de veículos, a postura de condução adotada foi a de que só iriam ser realizadas ultrapassagens à medida em que se fosse ultrapassado.



Figura 39 – Visão do pesquisador de dentro do carro ao realizar as medições de velocidade nos trechos: Veículo *floatar*.

Fonte: Autor (2017).

4.4 Modelagem

4.4.1 Geometria do sistema viário

Com o intuito de modelar as vias componentes de um sistema viário com elevado grau de autenticidade, o PTV VISSIM© permite a inserção de imagens de fundo ou a utilização do *OpenStreetMap* (OSM) e do *Bing Maps* nele embutido. Nesse aspecto, optou-se pela primeira alternativa, inserindo uma imagem da área em análise, a qual foi obtida com a ferramenta *Google Earth*, que possibilitou a superposição da imagem de satélite com a do projeto executivo (Figura 40), e posterior correção através da aplicação de sua escala real.



Figura 40 – Superposição entre a imagem de satélite do *Google Earth* e o projeto executivo da área em estudo.

Fonte: Adaptado de *Google Earth* (2017).

Sequencialmente, parte-se para a inserção dos *links* e conectores (Figura 41), os quais representam as vias, bem como as especificidades de cada uma, à exemplo do sentido, quantidade e largura das faixas de tráfego, entre outras informações que caracterizam o sistema viário, sendo estas transcritas diretamente do projeto executivo. Além disso, como a área em estudo apresenta uma separação entre níveis, houve a necessidade dessa representação através da inserção de cotas nos *links* e conectores.

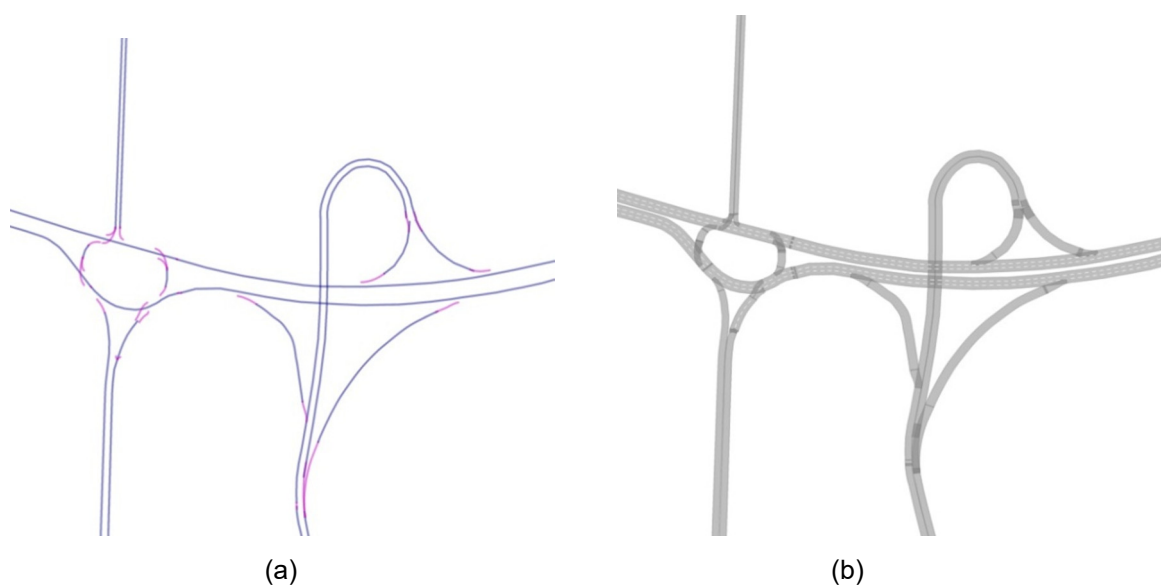


Figura 41 – (a) Representação dos *links* e conectores; (b) Representação gráfica do sistema viário.

Fonte: Autor (2017).

4.4.2 Controle de Tráfego

A partir da definição dos *links* e conectores e suas características, de modo a representar o comportamento dos veículos na área de interesse, o PTV VISSIM© permite a utilização de diversas ferramentas para o controle do tráfego. Especialmente quando se trata de interseções, tem-se a possibilidade da instalação de dispositivos semafóricos e seus devidos ciclos, placas de parada obrigatória, áreas de redução de velocidade, regras de exclusividade e regras de prioridade, do inglês *Right-of-Way* (ROW), que se estendem até a utilização de faixas específicas, entre outras ferramentas que se aplicam também para todo o sistema viário.

No presente estudo, o principal recurso utilizado foram as zonas de conflito, as quais retratam as possibilidades de conflito de movimento entre os veículos ao interagirem na rede. A partir dessa identificação, define-se o ROW de acordo com as observações feitas em campo. Para isso, o programa oferece três possibilidades de acordo com um sistema de cores específico, onde a cor verde indica movimento prioritário em relação a vermelha, não prioritária, e a cor amarela retrata uma área de conflito neutra, sem prioridade definida (Figura 42).

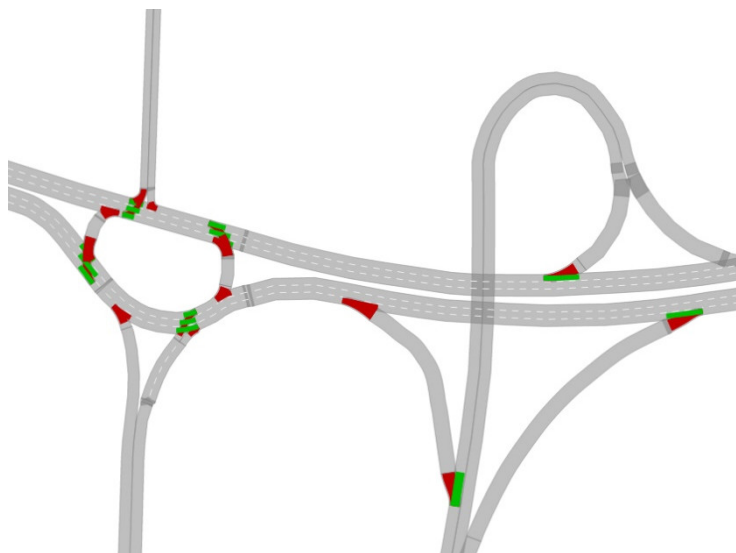


Figura 42 – Representação das zonas de conflito e ROW da área em análise.

Fonte: Autor (2017).

4.4.3 Demanda

A identificação dos volumes de tráfego, ou demanda, bem como suas características, foram obtidas através da análise laboratorial dos vídeos provenientes

das filmagens CM1 e CM2. Essa análise permitiu a realização de uma contagem manual volumétrica e classificatória, bem como a obtenção de outras informações que caracterizariam o sistema viário, a serem descritas nas subseções posteriores. No entanto, para que houvesse a integração dos dados provenientes das análises de CM1 e CM2, atribui-se letras para as entradas e saídas de veículos do sistema viário, conforme ilustrado na Figura 43.

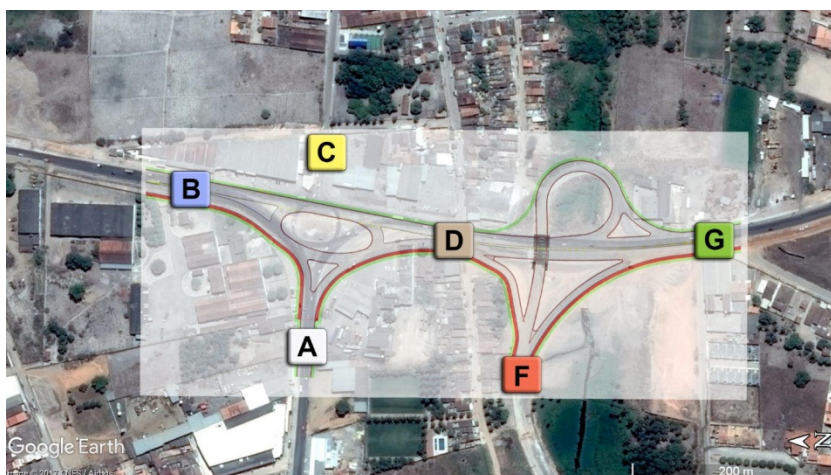


Figura 43 – Representação da área em estudo.

Fonte: Adaptado de *Google Earth* (2017).

Em que,

- A:** Avenida Governador Antônio Simeão Lamenha Filho;
- B:** AL-110 – Rodovia Dr. Geraldo Cavalcante Cajueiro;
- C:** Rua José Fernandes Lopes (Bairro Canafistula);
- D:** AL-110 – Rodovia Dr. Geraldo Cavalcante Cajueiro;
- F:** Marginal do Piauí;
- G:** AL-110 – Rodovia Dr. Geraldo Cavalcante Cajueiro.

4.4.3.1 Matriz de origem e destino (O/D)

O levantamento dos movimentos de entrada e saída do sistema viário permitiram a definição de matrizes origem/destino (O/D), retratando as viagens realizadas pelas diferentes classes veiculares dentro do horário considerado de pico, nos períodos da manhã e da tarde. De modo a exemplificar a elaboração das matrizes O/D, a Figura 44 retrata duas das possibilidades de viagens analisadas na elaboração das matrizes, ilustrando os percursos de um veículo saindo de A em direção a B, e outro saindo de F em direção a G.

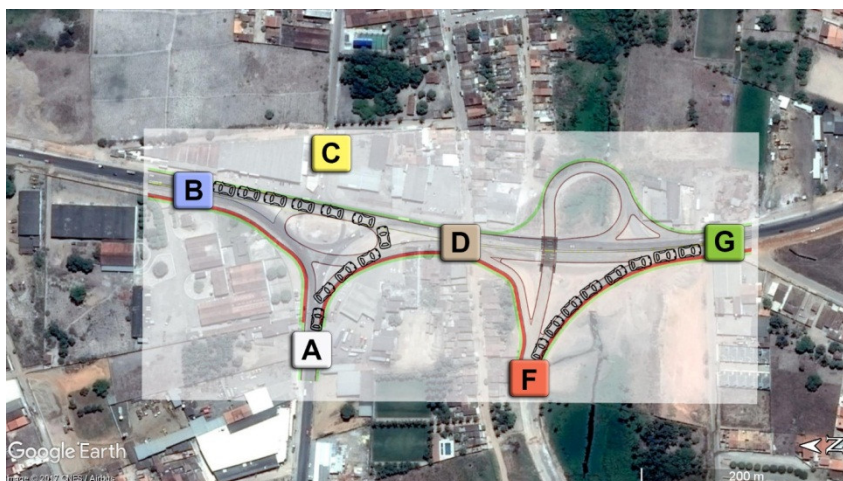


Figura 44 – Exemplificação dos pares O/D, sendo estes o A-B e o F-G.

Fonte: Adaptado de *Google Earth* (2017).

A partir da análise das matrizes O/D e seus respectivos pares, obtém-se a hora de pico correspondente ao maior volume de veículos, verificada no período da tarde, entre 17:00 e 18:00 horas, a qual apresentou um acréscimo de 10% no volume de tráfego em comparação ao período da manhã, de 11:30 até 12:30 horas. Ademais, dentre os intervalos de 15 minutos inseridos na hora de pico, o maior volume de tráfego foi apresentado nos 15 minutos finais, entre 17:45 e 18:00 horas.

A Tabela 3 retrata as matrizes O/D do sistema viário e seus devidos pares, entre 17:45 e 18:00 horas em Unidades de Tráfego Misto (UTM), já que o volume de tráfego é determinado pela soma dos veículos, independente da categoria que estejam inseridos.

Tabela 3: Matriz O/D nos 15 minutos de maior fluxo em UTM.

O/D	A	B	C	D	Total
A	0	73	80	117	270
B	71	28	43	145	287
C	67	13	0	12	92
D	105	123	21	0	249
Total	243	237	144	274	898

O/D	D	F	G	Total
D	0	53	221	274
F	16	0	19	35
G	233	9	0	242
Total	249	62	240	551

Fonte: Autor (2017).

De acordo com a metodologia explicitada no HCM (2010) e DNIT (2006), uma vez que se dispõe da contagem volumétrica de tráfego e identificação dos 15 minutos que apresentaram o maior fluxo contidos na hora de pico, esta demanda deve ser majorada, a favor da segurança, a partir da expressão que segue:

$$FHP = \frac{V_{hp}}{4 \cdot V_{15max}} = 1 \quad (1)$$

$$V_{hp} = 4 \cdot V_{15max} \quad (2)$$

Em que,

FHP: Fator Horário de Pico;

V_{hp}: Volume da hora de pico (veic/hora);

V_{15max}: Volume do período de 15 minutos com maior fluxo de tráfego dentro da hora de pico (veic/15 minutos).

A Tabela 4 apresenta a matriz O/D majorada, apresentando um acréscimo de 4% em comparação ao que fora observado em campo.

Tabela 4: Matriz O/D majorada.

O/D	A	B	C	D	Total
A	0	292	320	468	1080
B	284	112	172	580	1148
C	268	52	0	48	368
D	420	492	84	0	996
Total	972	948	576	1096	3592

O/D	D	F	G	Total
D	0	212	884	1096
F	64	0	76	140
G	932	36	0	968
Total	996	248	960	2204

Fonte: Autor (2017).

Observa-se na Tabela 4, a inter-relação entre as duas matrizes devido a simultaneidade das filmagens e correto procedimento de contagem, proporcionada pela igualdade entre os volumes de tráfego que saíram de D (em direção à A, B e C) e que adentraram em D (provenientes de F e G).

Os valores apresentados na Tabela 4 foram inseridos na aba entrada de veículos (*Vehicle inputs* no VISSIM©) para o cenário atual (T_0) conforme ilustrado na Figura 45. Desse modo, as entradas em veic/hora no sistema se deram em A, B, C, F e G e seus respectivos *links*.

Count: 5	No	Name	Link	Volume(0)
1	7	B	1: B	1148,0
2	8	A	7: A	1080,0
3	9	F	5: F	140,0
4	10	C	12: C	368,0
5	11	G	2: G	968,0

Figura 45 – Aba *Vehicle inputs* no VISSIM©.

Fonte: PTV VISSIM© (2017).

4.4.3.2 Definição das rotas

A elaboração da matriz O/D impõe a definição das rotas dos veículos a serem inseridas na aba *vehicle routes* do PTV VISSIM©. Para isso, houve a necessidade de transformar a matriz O/D de acordo com a porcentagem do volume de tráfego aferido em cada viagem conforme apresentado na Tabela 5.

Tabela 5: Porcentagem das rotas na Matriz O/D.

O/D	A	B	C	D	Total
A	0%	27%	30%	43%	100%
B	25%	10%	15%	50%	100%
C	73%	14%	0%	13%	100%
D	42%	50%	8%	0%	100%

O/D	D	F	G	Total
D	0%	19%	81%	100%
F	46%	0%	54%	100%
G	96%	4%	0%	100%

Fonte: Autor (2017).

A Figura 46 representa as possibilidades de rotas inseridas no *software* para os veículos saindo do ponto A em direção a B, C e D, bem como suas respectivas porcentagens em destaque na Figura 47, definidas de acordo com a Tabela 5.

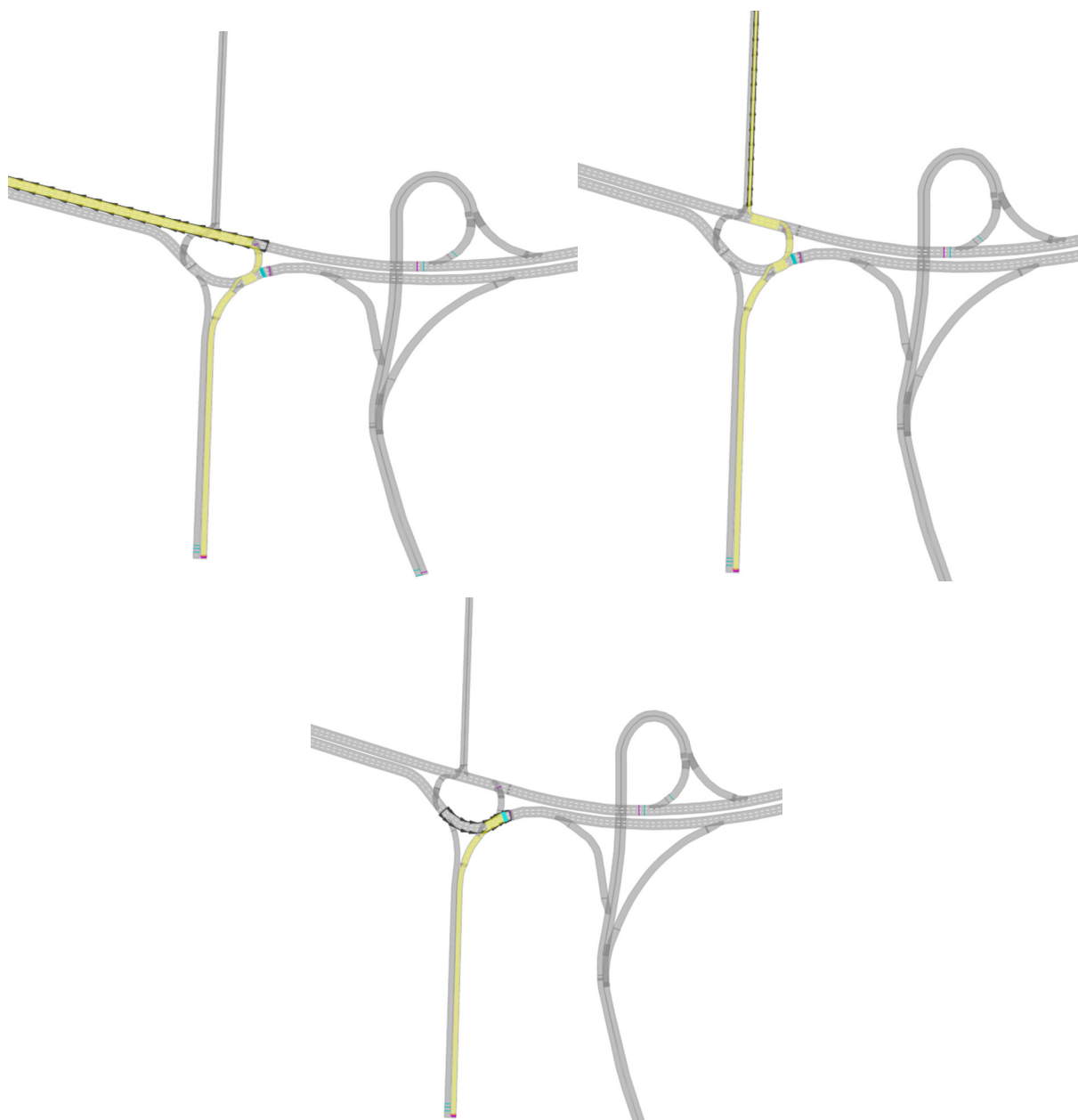


Figura 46 – Definição das rotas dos veículos saindo de A.

Fonte: PTV VISSIM© (2017).

Count:	3	VehRoutDec	No	Name	DestLink	RelFlow(0)
1	1		2	A-C	11: C	0,300
2	1		3	A-B	13: B	0,270
3	1		5	A-D	19: AL-110	0,430

Figura 47 – Porcentagem das possibilidades de rotas inseridas no *software*.

Fonte: PTV VISSIM© (2017).

Além do delineamento das rotas veiculares, houve a necessidade da caracterização dos veículos a serem inseridos na rede de acordo com a classe

veicular. Esses dados foram obtidos a partir da análise de todos os veículos que entraram na rede nos diversos trajetos O/D durante o intervalo temporal de análise. Assim, observa-se dois tipos principais de composição veicular, conforme apresentadas na Tabela 6, onde a composição 1 refere-se às vias de caráter urbano (veículos entrando em A, C e F), enquanto a composição 2 refere-se à via de caráter rural (veículos entrando em B e G). Essas composições foram criadas na aba *vehicle compositions* do *software*.

Tabela 6: Composições veiculares.

Composição	Classe Veicular				Total
	Carro	Moto	Ônibus	Caminhão	
1	56%	33%	3%	8%	100%
2	52%	42%	2%	3%	100%

Fonte: Autor (2017).

4.4.3.3 Definição das velocidades

Outros fatores importantes para a caracterização da demanda e calibração do modelo são as velocidades médias e velocidades de fluxo livre (VFL) das diversas classes veiculares, obtidas a partir das análises laboratoriais das gravações. A VFL é um termo usado para descrever a velocidade média que um motorista viajaria se não houvesse condições adversas, a exemplo de congestionamento ou mau tempo.

Para a sua obtenção, houve a necessidade de se conhecer a distância entre dois pontos físicos visíveis na gravação e aferição da distância real entre eles. Nesse sentido, escolhe-se um trecho retilíneo nitidamente visível na gravação pela CM1 (Figura 48).



Figura 48 – Obtenção das velocidades médias e de fluxo livre.

Fonte: Autor (2017).

Assim, a partir do conhecimento da distância percorrida pelo veículo ($d_f - d_i$) e o tempo em que este levou para percorrê-la, obtido com o auxílio de um cronômetro digital com precisão de milésimos, calcula-se as velocidades médias e de fluxo livre, englobando as quatro classes veiculares. Para a determinação da velocidade de fluxo livre, as medições foram feitas no intervalo de 13:45 até às 14:00 horas, conhecido como fora de pico, enquanto as velocidades médias foram aferidas a partir do intervalo vespertino de pico, entre 17:45 e 18:00 horas.

Tabela 7: Velocidade média e de fluxo livre.

Velocidade (km/h)	Carro	Moto	Ônibus e Caminhão	Horário
Média	35,9	38,4	32	17:45 – 18:00
Fluxo Livre	60	50	40	13:45 – 14:00

Fonte: Autor (2017).

Ademais, atribui-se as velocidades obtidas as duas composições veiculares pré-definidas no *software*.

Tabela 8: Velocidade de fluxo livre de acordo com a composição veicular.

Composição	Velocidade Fluxo Livre (km/h)		
	Carro	Moto	Ônibus e Caminhão
1	60	50	40
2			

Fonte: Autor (2017).

4.5 Simulação

4.5.1 Calibração

Para se obter resultados satisfatórios e condizentes com a realidade, o modelo a ser simulado deve ser calibrado de acordo com as condições locais observadas em campo. Um modelo de microssimulação de tráfego bem calibrado permite uma maior fidelidade no comportamento do tráfego, possibilitando tomadas de decisões que impactam no balanceamento das necessidades e investimentos a serem feitos na área em estudo.

Existem dois tipos predominantes de calibração de modelos de microssimulação, as quais incluem a seleção de uma ou mais medidas de eficácia que guiam o modo com que as informações devem ser obtidas nas observações das condições de tráfego existentes. Essas informações servem como base para que as tentativas de representar a realidade através da microssimulação sejam possibilitadas pelo ajustamento/alteração dos parâmetros do modelo. Nesse aspecto, o primeiro método de calibração se dá pela alteração dos parâmetros de forma manual, no processo de tentativa e erro, enquanto no segundo método, os parâmetros são alterados automaticamente, utilizando-se de algoritmos metaheurísticos de otimização. Independentemente do método utilizado, uma vez que o modelo esteja calibrado, este pode ser aplicado para um novo período de tempo, bem como para outras soluções, comparando-se os resultados obtidos com a situação existente (DONG et al., 2015).

Diante do exposto, o PTV VISSIM© apresenta quatro modelos de comportamento distintos, os quais possuem parâmetros embutidos que podem ser modificados no processo de calibração. Os modelos são: *car-following*, ou de

perseguição, mudança de faixa, aceitação de brechas e escolha de rotas. Devido à grande utilização do modelo de *car-following*, e a modificação de seus parâmetros no processo de calibração observada na literatura, opta-se por este no processo de calibração do modelo em estudo.

O PTV VISSIM© apresenta dois modelos de perseguição baseados nos modelos psicofísicos propostos por *Wiedemann, R.* O primeiro modelo é o *Wiedemann 74 (W74)*, o qual é indicado para simulações de fluxo urbano; o segundo é o *Wiedemann 99 (W99)*, indicado para segmentos rodoviários, sendo este mais complexo e flexível do que o primeiro, uma vez que apresenta uma maior quantidade de parâmetros que podem ser modificados (PTV, 2017).

Os parâmetros embutidos nos modelos podem ser visualizados na Tabela 9 e Figura 49, referente ao modelo psicofísico W74 e na Tabela 10 e Figura 50, referente ao modelo W99.

Tabela 9: Parâmetros do modelo psicofísico de Wiedemann 74 (W74).

Parâmetro	Unidade (SI)	Descrição
ax	m	Definido como sendo a distância média desejada entre dois veículos.
bx_{add}	Adimensional	Utilizado no cálculo da distância de segurança desejada.
bx_{mult}	Adimensional	Valor utilizado para a determinação da distância desejada de segurança.

Fonte: Adaptado de PTV (2017).

Car following model

Wiedemann 74

Model parameters

Average standstill distance:

Additive part of safety distance:

Multiplic. part of safety distance:

Figura 49 – Parâmetros do modelo psicofísico de *Wiedemann 74 (W74)*.

Fonte: PTV VISSIM© (2017).

Tabela 10: Parâmetros do modelo psicofísico de Wiedemann 99 (W99).

Parâmetro	Unidade (SI)	Descrição
CC0	m	<i>Standstill Distance</i> : Distância média desejada entre os veículos parados.
CC1	s	<i>Headway Time</i> : Distância em segundos que o condutor deseja manter a uma certa velocidade.
CC2	m	' <i>Following Variation</i> ': Restringe a diferença de distância que dois veículos devem manter entre si.
CC3	s	<i>Threshold for Entering 'Following'</i> : Controla o processo de desaceleração dos veículos.
CC4	m/s	<i>Negative 'Following' Threshold</i> : Limite negativo do modelo de perseguição.
CC5	m/s	<i>Positive 'Following' Threshold</i> : Limite positivo do modelo de perseguição.
CC6	$1/(m \cdot s)$	<i>Speed dependency of Oscillation</i>
CC7	m/s^2	<i>Oscillation Acceleration</i> : Oscilação durante a aceleração.
CC8	m/s^2	<i>Standstill Acceleration</i> : Aceleração desejada ao iniciar do repouso.
CC9	m/s^2	<i>Acceleration with 80 km/h</i> : Aceleração desejada aos 80 km/h.

Fonte: Adaptado de PTV (2017).

Driving Behavior

No.: 1 Name: Urban (motorized)

Following Lane Change Lateral Signal Control Meso

Look ahead distance
min.: 0,00 m
max.: 250,00 m
4 Observed vehicles

Look back distance
min.: 0,00 m
max.: 150,00 m

Temporary lack of attention
Duration: 0 s
Probability: 0,00 %

Smooth closeup behavior

Standstill distance for static obstacles: 0,50 m

Car following model
Wiedemann 99

Model parameters

CC0 (Standstill Distance): 1,50 m

CC1 (Headway Time): 2,09 s

CC2 ('Following' Variation): 4,00 m

CC3 (Threshold for Entering 'Following'): -8,00

CC4 (Negative 'Following' Threshold): -0,35

CC5 (Positive 'Following' Threshold): 0,35

CC6 (Speed dependency of Oscillation): 11,44

CC7 (Oscillation Acceleration): 0,25 m/s²

CC8 (Standstill Acceleration): 3,50 m/s²

CC9 (Acceleration with 80 km/h): 1,50 m/s²

Figura 50 – Parâmetros do modelo psicofísico de Wiedemann 99 (W99).

Fonte: PTV VISSIM© (2017).

De acordo com Sun *et al.* (2005) *apud* Victorino (2014), os cinco parâmetros que mais interferem no comportamento de condução veicular são CC0, CC1, CC2, CC4 e CC5. Sendo assim, estes foram alterados no processo de calibração do modelo baseando-se em limites recomendados e considerados ótimos em outros trabalhos de acordo com a Tabela 11.

Tabela 11: Valores recomendados dos principais parâmetros de calibração do modelo psicofísico de Wiedemann 99.

Parâmetro	CC0 (m)	CC1 (s)	CC2 (m)	CC4 e CC5 (s)
Padrão	1,5	0,9	4	±0,35
Gomes et al., 2004	1,7	0,9 a 1,4	–	±2
Lownes e Machemehl, 2006	1,45	0,85	–	±1
Zhizhou et al., 2005	1,5	0,8	3,5	–
Park e Qi, 2006	1,74	2,77	0,97	±0,86
Kim e Rillet, 2007	1,5	0,95	2	±0,25
Oliveira, 2008	1,45	0,8	–	±0,25
ODOT, 2011	1,4 a 1,8	0,85 a 1,05	2,15 a 7	–
Utilizado	1,5	0,75	2	±0,25

Fonte: Victorino (2014).

A garantia de que o cenário estava sendo bem calibrado foi obtida a partir da utilização da formulação empírica proposta por *Geoffrey E. Havers* (GEH), a qual possibilita a comparação entre duas amostras de tráfego a partir da consideração da diferença absoluta e percentual entre os fluxos de tráfego observados em campo e os provenientes da simulação.

$$GEH = \sqrt{\frac{2(M - C)}{M + C}} \quad (3)$$

Em que,

M: volume gerado pela simulação (veic/hora);

C: volume observado em campo (veic/hora).

De acordo com WSDOT (2014) e FHWA (2004), a qualidade da calibração do modelo seria satisfatória se em pelos menos 85% de toda a rede viária modelada o valor de GEH for inferior a 5; aceitável para valores entre 5 e 10; e inaceitável para valores superiores a 10. O Apêndice A retrata as iterações manuais realizadas e demonstração dos resultados a partir da obtenção de um GEH inferior a 5.

4.5.2 Validação

O processo de validação consiste numa segunda verificação entre os dados simulados e os dados obtidos em campo, utilizando de dados que ainda não foram utilizados no processo de calibração. Para isso, utiliza-se como parâmetro a velocidade média obtida através das medições realizadas com o veículo *floater* conforme apresentado na seção 4.3 Levantamento de campo. Esses dados são comparados de forma estatísticas com a velocidade média obtida durante as rodadas de simulação do modelo no *software*.

Para isso, utiliza-se uma ferramenta estatística já embutida no *Microsoft Excel*, na aba avançada “Análise de Dados”, denominada de Test-t: duas amostras presumindo variâncias diferentes, e recomendada por Dong *et al.* (2015). O Teste-t de *Student* possibilita uma análise de duas amostras diferentes, avaliando se os valores médios dessas amostras podem ser considerados estatisticamente iguais.

Assim, a partir dessa análise automatizada pelo *Excel*, a validação do modelo é corroborada com o atendimento da hipótese de que o $p - valor$ deve ser maior do que o nível de significância $\alpha = 5\%$, atribuindo um intervalo de confiança de 95%. Esses valores são obtidos de forma direta a partir da seleção das duas amostras a serem comparadas e utilização da ferramenta.

Conforme apresentado na Tabela 12 e detalhada no Apêndice B, a condição foi satisfeita para o Teste-t de *Student*.

Tabela 12: Validação do modelo: Teste-t de *Student*.

Amostra	Leituras	Velocidade Média (km/h)	α	$p - valor$
Simulado	20	33,26	5%	0,13
Real	12	38,04		

Fonte: Autor (2017).

4.5.3 Cenários Futuros

Com o intuito de verificar o impacto do crescimento do tráfego na área em estudo, dois cenários temporais distintos são analisados em adição ao atual (T_0), considerando o tráfego estimado para cinco (T_5) e dez anos (T_{10}). De acordo com o DNIT (2005), o ano de projeto a ser considerado nas interseções não deve ser superior ao 10º de sua vida útil devido a variabilidade existente na predição do tráfego. Além

disso, em seu tempo de operação, as interseções devem ser analisadas através de dados estatísticos e estudos especiais para que as possíveis deficiências sejam constatadas e projetos de ampliação e/ou modificação sejam propostos.

Como não se dispunha de dados de variáveis socioeconômicas da região em estudo, bem como de postos de contagem fixos ou de contagens manuais periódicas que possibilitassem a obtenção de dados históricos da volumetria e classificação dos veículos, opta-se, alternativamente, pela utilização da projeção geométrica com uma taxa conservadora de crescimento do tráfego de 3% ao ano conforme sugerido em DNIT (2005), de acordo com a expressão abaixo:

$$V_n = V_0(1 + a)^n \quad (4)$$

Em que,

V_n : volume de tráfego no ano “n”;

V_0 : volume de tráfego no ano base;

a : taxa de crescimento anual;

n : número de anos decorridos após o ano base.

O resultado da projeção geométrica para toda a malha viária com $a = 3\%$ pode ser visualizado na Figura 51.



Figura 51 – Projeção geométrica do volume de tráfego da área em análise em UTM.

Fonte: Autor (2017).

A projeção geométrica permitiu a obtenção dos volumes horários de pico para os anos de 2022 e 2037, 5 e 10 anos após o ano base, apresentados na Tabela 13 e que serão utilizados na aba entrada de veículos do VISSIM®.

Tabela 13: Estimativa do tráfego em UTM.

Ano	A	B	C	F	G
2017	1080	1148	368	140	968
2022	1252	1331	427	162	1122
2027	1451	1543	495	188	1301

Fonte: Autor (2017).

4.5.4 Rodadas de simulação

Devido à natureza estocástica da simulação, flutuações aleatórias ocorrem nos resultados das rodadas de simulação individuais. Assim, a representatividade dos cenários simulados é obtida a partir da quantidade do número de replicações a serem feitas. Essa aleatoriedade nos resultados é obtida a partir da chamada semente aleatória, do inglês *random seed*, atrelada aos algoritmos do *software*, utilizada na seleção de uma sequência de números aleatórios que são usados para tomar várias decisões (O veículo deve ser carregado na rede agora ou posteriormente?; o condutor deve ser agressivo ou cauteloso? qual classe veicular deve adentrar na rede? o condutor deve escolher o caminho mais curto ou outro mais longo etc.) ao longo de cada rodada de simulação (FHWA, 2004).

Nesse sentido, o resultado de cada simulação deverá ser próximo ao da média de todas as rodadas de simulação, contudo, cada rodada será diferente uma da outra. Assim, conforme observado na Figura 52, a semente aleatória inicial do programa é #42. De acordo com WSDOT (2014), cada simulação deve ser composta por no mínimo 11 replicações. Portanto, opta-se por 20 rodadas de simulação, com incremento da semente aleatória de 12, ou seja, na primeira simulação, a semente aleatória será #42, na segunda será #54 e assim consecutivamente, utilizando a resolução de 10 leituras por segundo simulado (*Time-Steps*).

The image shows a 'Simulation parameters' dialog box with the following settings:

- Comment: (empty text box)
- Period: 600 Simulation seconds
- Start time: 00:02:00 [hh:mm:ss]
- Start date: [DD.MM.YYYY]
- Simulation resolution: 10 Time step(s) / Sim. sec.
- Random Seed: 42
- Number of runs: 20
- Random seed increment: 12
- Dynamic assignment volume increment: 0.00 %
- Simulation speed:
 - 10.0 Sim. sec. / s
 - Maximum
 - Retrospective synchronization
- Break at: 0 Simulation seconds
- Number of cores: use all cores

Figura 52 – Parâmetros de simulação inseridos.

Fonte: PTV VISSIM© (2017).

Outro fator levado em consideração no processo de simulação, refere-se a fase de aquecimento do programa, do inglês *warm-up period*. Essa fase é utilizada antes do sistema atingir o equilíbrio para o intervalo de tempo de simulação, uma vez que a fase inicial de simulação não apresenta veículos em quantidade suficiente que permitam a representação real da interferência que outros veículos exercem no comportamento de condução do motorista. Portanto, a contribuição desse período é descartada dos resultados finais dos cenários simulados.

O período de fase de aquecimento varia entre 10 e 20 minutos conforme constatado na literatura, sendo 15 minutos amplamente utilizado (VICTORINO, 2014). Sendo assim, seriam 900 segundos (15 minutos) nessa primeira fase de aquecimento e 2700 segundos (45 minutos) na simulação propriamente dita, totalizando o intervalo de 1 hora de simulação. No entanto, a licença acadêmica adquirida possui diversas restrições conforme ilustrado na Figura 53. Dentre elas, um período de simulação total de 600 segundos (10 minutos). Assim, para todas as fases de calibração, validação e resultados, foram utilizados 2 minutos para o aquecimento (0 - 120) e 8 minutos (120-600) para obtenção dos resultados.

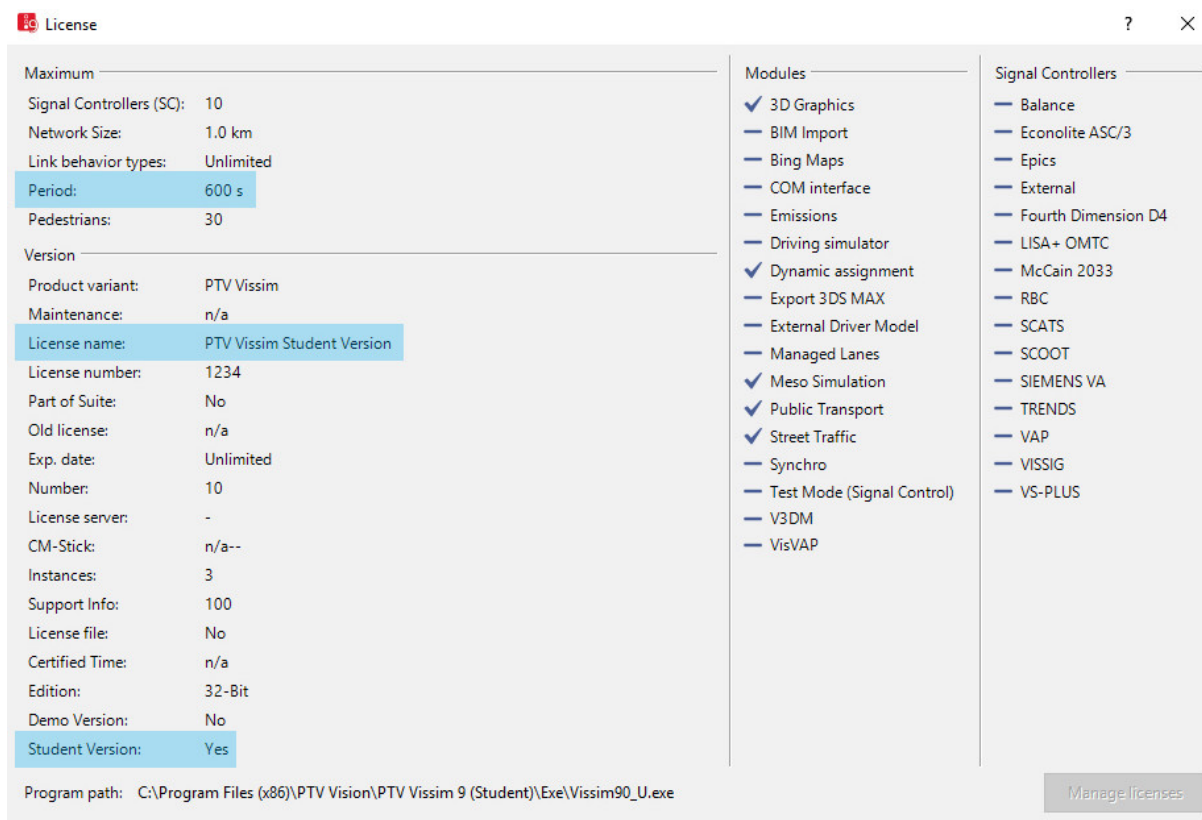


Figura 53 – Restrições impostas pela licença de uso acadêmico do PTV Vissim© 9.0.

Fonte: Adaptado de PTV VISSIM© (2017).

4.5.5 Análise dos Resultados

Os modelos de microssimulação tipicamente produzem dois tipos de resultados: o primeiro é a animação gráfica; o segundo são os valores numéricos. A animação gráfica permite a visualização do movimento dos veículos individuais através da rede durante o período simulado. Os valores numéricos possibilitam a obtenção de dados estatísticos acumulados acerca do desempenho da rede simulada. Para que se tenha uma imagem completa dos resultados, é crucial que a análise leve em conta a animação gráfica em paralelo e de modo complementar aos valores numéricos obtidos.

4.5.5.1 Animação Gráfica

A animação gráfica no *software* pode ser visualizada em 2D ou 3D de acordo com a escolha, representando graficamente o comportamento dos veículos ou

pedestres. Seus resultados consistem em uma ferramenta poderosa que permite a avaliação rápida e qualitativa do desempenho geral da alternativa escolhida. No entanto, revisar todos os resultados da animação gráfica do modelo, quando se trata de inúmeras rodadas de simulação, pode se tornar uma atividade contraproducente. Assim, a análise deve ser concentrada em comportamentos médios ou de pior cenário.

4.5.5.2 Valores Numéricos

Os resultados numéricos são visualizados em relatórios em termos de Medidas de Eficiência, do inglês *Measures of Effectiveness* (MOEs), ao final da rodada de simulação (acumulado) ou valores pontuais no transcorrer da simulação. A seleção das MOEs deve ser feita de acordo com os objetivos do projeto. Nesse sentido, as principais medidas de eficiência utilizadas no presente trabalho e obtidas nas rodadas de simulação foram:

Distância Total - VKT (km)

Do inglês *Vehicle Kilometers Traveled* (VKT), esse indicador refere-se ao somatório da distância total percorrida, em quilômetros, por todos os veículos que estão ou que já deixaram o sistema no intervalo de análise selecionado.

Tempo Total Viajado - VHT (min)

Do inglês *Vehicle Hours Traveled*, refere-se ao somatório do tempo total que os veículos levaram para sair da sua origem e chegar ao seu destino, englobando todos os veículos que estão ou já deixaram a rede. Portanto, a redução dessa medida indica uma melhora no desempenho da rede.

Velocidade Média (km/h)

Obtida pela divisão do VKT sobre o VHT, refere-se à velocidade média de todos os veículos inseridos na rede. Assim, o seu aumento é resultado de uma melhora no desempenho da rede.

Atraso (s)

Do inglês *Delay*, é uma medida de caráter qualitativo, calculada a partir da comparação entre o tempo real gasto pelos veículos ao percorrerem a rede e o tempo teórico ou ideal de percurso, caso não houvesse interferência externa. Assim, essa é uma parcela do tempo total de trajeto que é indesejado pelos usuários do sistema de transporte.

Percentual de Veículos Parados (%)

Do inglês *Stops*, refere-se à quantidade média de veículos que ficam parados ao menos uma vez ao longo da trajetória percorrida. Nesse sentido, o programa considera como parado, veículos com velocidade inferior a 5km/h.

Atraso Parado (s)

Do inglês *Stopped Delay*, refere-se à quantidade média de tempo que os veículos ficam parados, parcela componente do tempo total de atraso.

Veículos Ativos (veic)

Quantidade de veículos que ao fim da simulação, ainda permanecem ativos. Ou seja, não atingiram seu destino final definido pela rota que deveriam fazer (origem-destino) dentro da malha simulada. Seu aumento, indica uma piora do desempenho da rede, bem como a elevação no grau de congestionamento do sistema.

Em adição a esses indicadores de desempenho, o VISSIM© possui um módulo específico para interseções, denominado de *Node Evaluation*, o qual permitiu a obtenção de outros parâmetros para determinados percursos previamente definidos, tais como:

Níveis de Serviço

Conforme apresentado na seção 2.4 Capacidade e Níveis de Serviço, os níveis de serviços representam de forma qualitativa o desempenho da malha simulada.

Comprimento de Congestionamento (m)

Do inglês *queue length*, refere-se ao comprimento da fila formado pelo congestionamento.

Emissões (gramas)

As emissões de gases poluentes são representadas em gramas referente ao monóxido de carbono (CO), óxido de nitrogênio (NOx) e compostos orgânicos voláteis (VOCs). Esses cálculos são baseados nas velocidades e acelerações dos diversos veículos inseridos na malha viária simulada.

Consumo de Combustível (litros)

Refere-se a quantidade de combustível consumida pelos veículos em determinados percursos, sendo estimada em *US liquid gallon*, correspondente a 3,8 litros aproximadamente.

5 RESULTADOS

Conforme evidenciado em campo, os problemas de congestionamento e formação de filas foram também observados e quantificados no processo de simulação, apresentando assim uma degradação do sistema à medida que os dados do tráfego para 5 e 10 anos foram inseridos. Os resultados numéricos das MOEs são apresentados de forma sumarizada na Tabela 14, permitindo a comparação entre os cenários (T_0), (T_5) e (T_{10}) para a situação original.

Tabela 14: Medidas de eficiência (MOEs) do cenário original para T_0 , T_5 e T_{10} .

Cenário	Intervalo	Rodada	VKT (km)	VHT (min)	Vel. Média (km/h)	Atraso (s)	Paradas (%)	Atraso de Parada (s)	Veículos
Original (T_0)	120 - 600	Média	395,81	726,88	33,26	33,46	4,42	15,07	111
Original (T_5)	120 - 600	Média	406,56	1037,84	23,78	60,55	9,13	32,97	162
	120 - 600	Dif.	3%	30%	-40%	45%	52%	54%	31%
Original (T_{10})	120 - 600	Média	408,77	1332,78	18,58	84,68	10,29	58,44	207
	120 - 600	Dif.	3%	45%	-79%	60%	57%	74%	46%

Fonte: Autor (2017).

A Figura 54 ilustra a formação de fila e congestionamento observada na simulação.

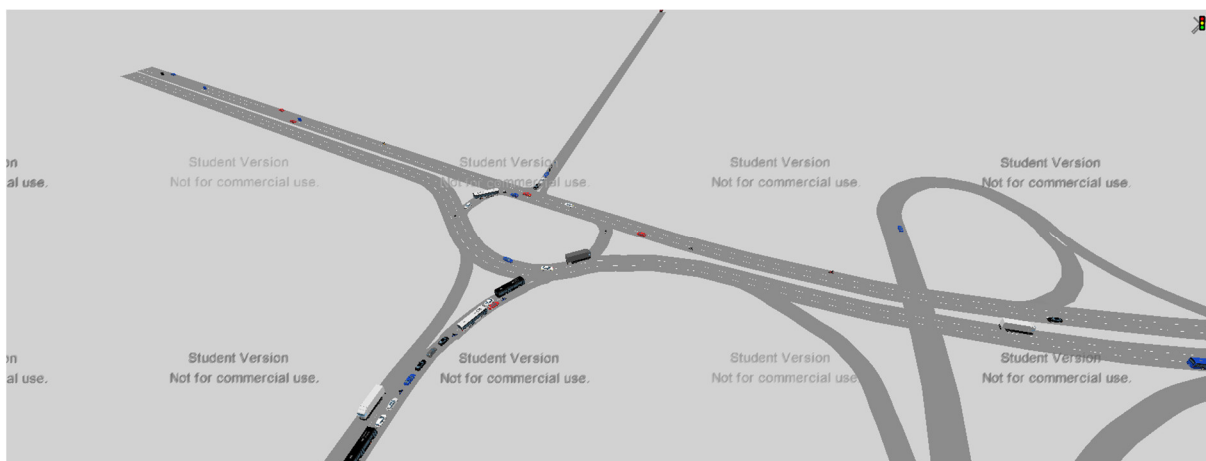


Figura 54 – Congestionamento observado na simulação.

Fonte: Autor (2017).

Analisando o parâmetro velocidade média, observa-se um decaimento significativo após 5 e 10 anos, uma vez que a área ficará mais lenta em até 40% e

79% respectivamente, caso nenhuma modificação seja feita. Além dessa piora na rede, a porcentagem de atraso foi intensificada em 45 e 60% para os anos de 2022 e 2027, o que retrata um aumento no congestionamento e diminuição progressiva da capacidade da área em estudo.

Assim, na tentativa de avaliar possíveis alternativas na correção dos problemas observados, novos cenários são propostos, analisados e comparados com a situação atual. Essas alternativas foram pensadas com o intuito de se manter as rotas pré-estabelecidas (pares O/D) na caracterização do tráfego local.

5.1 Alternativas

(a) Modificação das regras de preferência (ROW) dos veículos na rotatória (Mod_1).

Essa proposta de modificação consiste na priorização do movimento para os veículos que já estão em trajetória circular (Figura 56).

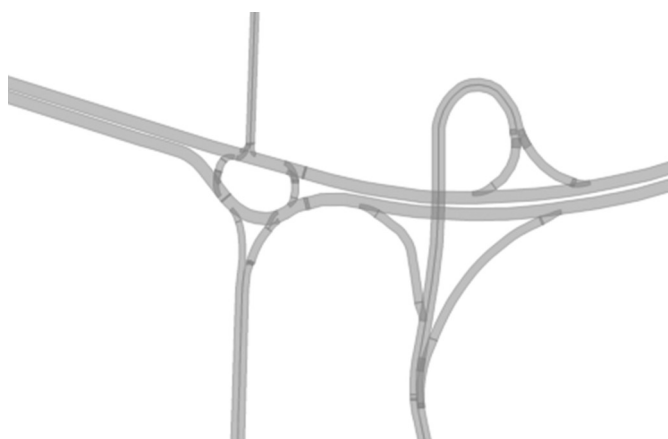


Figura 55 – Cenário original.

Fonte: Autor (2017).



Figura 56 – Alternativa 1.

Fonte: Autor (2017).

(b) Separação dos movimentos de entrada e saída da cidade (Mod_2).

Com o intuito de eliminar o cruzamento das correntes de tráfego na interseção, opta-se pela separação dos movimentos de entrada e saída da cidade. Para isso, houve a necessidade de readequação dos ramos de interseção, tanto da rotatória, quanto da interconexão conforme apresentado na sequência:

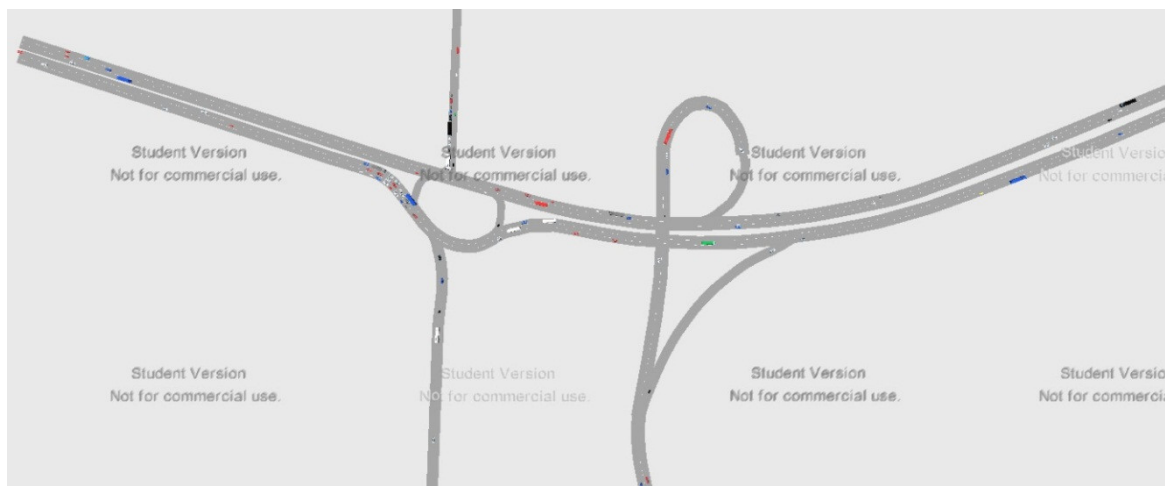


Figura 57 – Alternativa 2.

Fonte: Autor (2017).

Em adição, essa alternativa se deu em conjunto com a modificação da preferência do movimento rotatório. Essa análise foi cogitada pelos próprios representantes das entidades de tráfego da cidade, engenheiros da SMTT e do DER.

(c) Substituição da rotatória por uma interconexão (Mod_3)

Nessa alternativa, opta-se pela substituição da rotatória por uma interconexão, separando os movimentos entre a rodovia principal e a secundária. Desse modo, para que se mantivessem todos os movimentos e pares O/D, houve a necessidade da inserção de retornos, posicionados fora da área de interseção.

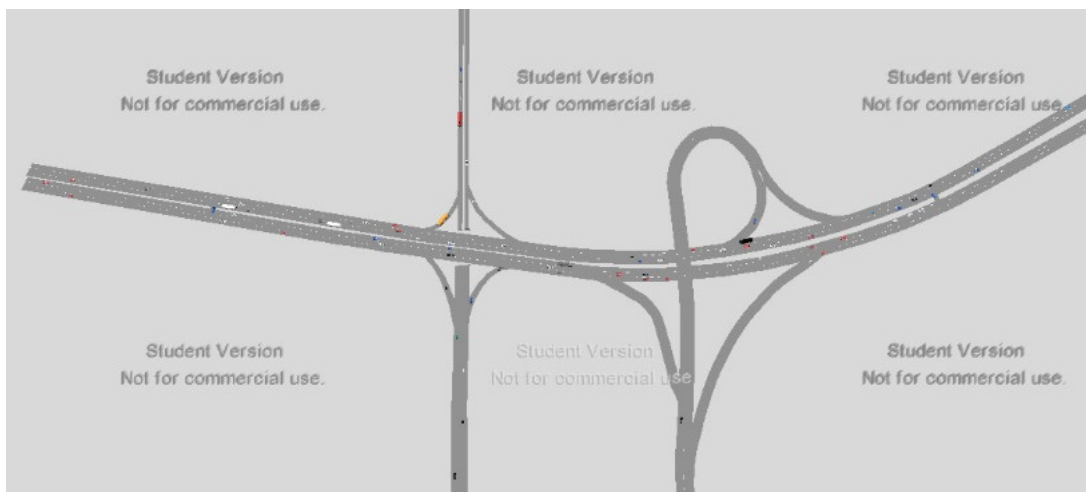


Figura 58 – Alternativa 3.

Fonte: Autor (2017).

(d) Eliminação da rotatória e inserção de retornos na área externa das interseções (Mod_4)

Nessa alternativa, opta-se pela eliminação do movimento rotatório e inserção de retornos adjacentes as áreas de interseção.

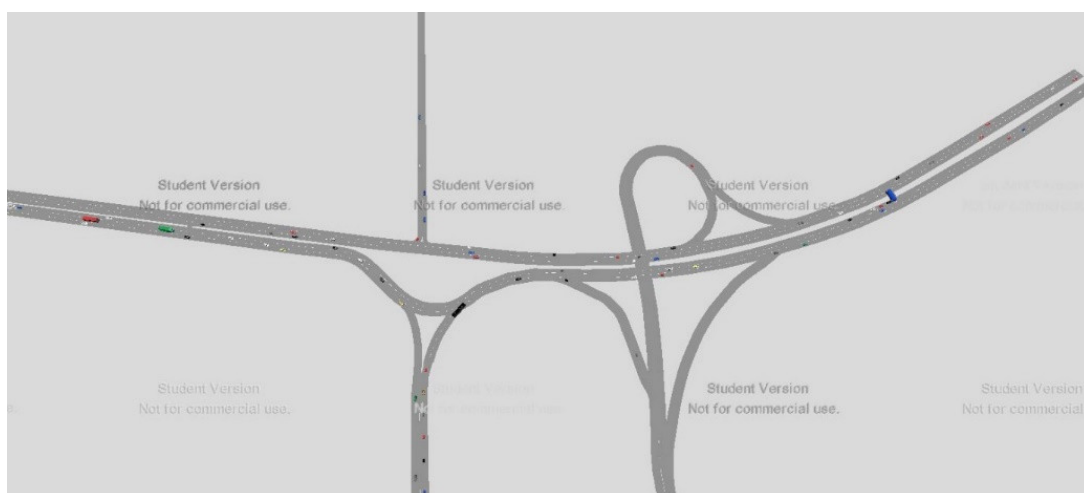


Figura 59 – Alternativa 4.

Fonte: Autor (2017).

5.2 Análise dos resultados

Os resultados simulados são apresentados nas tabelas que seguem para (T_0) , (T_5) e (T_{10}) .

Tabela 15: Medidas de eficiência (MOEs) para T_0 .

Cenário	Intervalo	Rodada	VKT	VHT	Velocidade Média (km/h)	Atraso (s)	Paradas (%)	Atraso de Parada (s)	Veículos
Original	120 – 600	Média	395,81	726,88	33,26	33,46	4,42	15,07	111
Mod₁	120 – 600	Média	419,26	560,88	45,08	12,52	1,08	3,60	73
	120 – 600	Dif.	6%	-30%	26%	-167%	-309%	-319%	-52%
Mod₂	120 – 600	Média	446,09	525,86	50,93	5,63	0,32	1,21	66
	120 – 600	Dif.	11%	-38%	35%	-494%	-1286%	-1142%	-68%
Mod₃	120 – 600	Média	523,35	580,71	54,09	2,72	0,02	0,05	72
	120 – 600	Dif.	24%	-25%	39%	-1129%	-21126%	-30749%	-54%
Mod₄	120 – 600	Média	530,95	611,00	52,16	5,08	0,08	0,22	76
	120 – 600	Dif.	25%	-19%	36%	-558%	-5151%	-6907%	-46%

Fonte: Autor (2017).

Tabela 16: Medidas de eficiência (MOEs) para T_5 .

Cenário	Intervalo	Rodada	VKT	VHT	Velocidade Média (km/h)	Atraso (s)	Paradas (%)	Atraso de Parada (s)	Veículos
Original	120 – 600	Média	406,56	1037,84	23,78	60,55	9,13	32,97	162
Mod₁	120 – 600	Média	476,49	782,72	36,88	25,70	2,92	8,43	107
	120 – 600	Dif.	15%	-33%	36%	-136%	-212%	-291%	-51%
Mod₂	120 – 600	Média	511,29	660,41	46,63	10,86	1,06	3,53	91
	120 – 600	Dif.	20%	-57%	49%	-458%	-761%	-835%	-78%
Mod₃	120 – 600	Média	606,59	683,59	53,26	3,64	0,04	0,11	85
	120 – 600	Dif.	33%	-52%	55%	-1563%	-22305%	-31069%	-91%
Mod₄	120 – 600	Média	616,10	782,72	49,68	8,37	0,26	0,67	94
	120 – 600	Dif.	34%	-33%	52%	-624%	-3442%	-4798%	-72%

Fonte: Autor (2017).

Tabela 17: Medidas de eficiência (MOEs) para T_{10} .

Cenário	Intervalo	Rodada	VKT	VHT	Velocidade Média (km/h)	Atraso (s)	Paradas (%)	Atraso de Parada (s)	Veículos
Original	120 – 600	Média	408,77	1332,78	18,58	84,68	10,29	58,44	207
Mod₁	120 – 600	Média	520,92	1010,20	31,09	37,19	5,37	11,47	153
	120 – 600	Dif.	22%	-32%	40%	-128%	-92%	-409%	-35%
Mod₂	120 – 600	Média	581,39	853,53	41,07	18,85	2,73	7,34	125
	120 – 600	Dif.	30%	-56%	55%	-349%	-278%	-696%	-66%
Mod₃	120 – 600	Média	704,82	813,38	52,04	5,07	0,08	0,22	105
	120 – 600	Dif.	42%	-64%	64%	-1570%	-12781%	-26372%	-97%
Mod₄	120 – 600	Média	700,38	934,75	45,08	14,94	0,74	1,20	127
	120 – 600	Dif.	42%	-43%	59%	-467%	-1300%	-4765%	-63%

Fonte: Autor (2017).

Diante do exposto, observa-se que todos os cenários alternativos apresentados melhoraram significativamente o desempenho de toda a rede analisada. Em adição, conforme já evidenciado na literatura, a substituição de uma interseção em nível por uma interconexão (Mod_3) demonstrara os melhores resultados para as MOEs, com um acréscimo de 55 e 64% da velocidade média do sistema para os cenários T_5 e T_{10} . Na sequência, a eliminação da rotatória e inserção de retornos na área externa das interseções (Mod_4), apresenta um acréscimo significativo da velocidade média do sistema e redução do atraso em comparação com o cenário original, seguida pela alternativa (Mod_2).

Embora a alternativa (Mod_1), inversão do movimento rotatório, tenha representado o menor ganho de desempenho dentre todas as soluções apresentadas, estes ainda foram significativos, sendo que esta modificação simples pode ser realizada de caráter imediato. Conforme demonstrado, a alternativa poderá aumentar a velocidade média do sistema em 36 e 40% para os cenários T_5 e T_{10} , assim como reduzir o atraso e consequente formação de filas em até 136 e 128% em comparação com o cenário original. Diante disso, uma vez que a única modificação feita foi a preferencial, uma comparação suplementar foi realizada a partir da ferramenta *Node Evaluation* do *software*, com foco exclusivo nos pares O/D da rotatória, sendo os resultados apresentados na Tabela 18.

Tabela 18: *Node Evaluation* - Impacto da modificação 1 nos pares O/D.

(continua)

Cenário	Intervalo (s)	O ⇒ D	Rodada	Qlen (m)	Emissões Gasosas (g)			Consumo de Combustível (L)	NS
					CO	NO	VOCs		
Original	120 - 600	A ⇒ B	Média	89,19	143,09	27,84	33,16	7,75	E
Mod_1	120 - 600		Média	23,00	57,57	11,20	13,34	3,12	A
	120 - 600		Dif.	-288%	-149%	-149%	-149%	-149%	
Original	120 - 600	A ⇒ C	Média	89,19	183,66	35,73	42,57	9,95	E
Mod_1	120 - 600		Média	23,00	60,77	11,82	14,08	3,29	A
	120 - 600		Dif.	-288%	-202%	-202%	-202%	-202%	
Original	120 - 600	A ⇒ D	Média	89,19	146,66	28,53	33,99	7,94	C
Mod_1	120 - 600		Média	23,00	66,38	12,92	15,38	3,59	A
	120 - 600		Dif.	-288%	-121%	-121%	-121%	-121%	
Original	120 - 600	B ⇒ C	Média	47,47	42,93	8,35	9,95	2,32	B
Mod_1	120 - 600		Média	3,06	20,95	4,08	4,86	1,13	A
	120 - 600		Dif.	-1452%	-105%	-105%	-105%	-105%	

Tabela 18: *Node Evaluation* - Impacto da modificação 1 nos pares O/D.

(conclusão)

Cenário	Intervalo (s)	O ⇒ D	Rodada	Qlen (m)	Emissões Gasosas (g)			Consumo de Combustível (L)	NS
					CO	NO	VOCs		
Original	120 - 600	C ⇒ A	Média	80,88	212,75	41,39	49,31	11,52	E
<i>Mod</i> ₁	120 - 600		Média	17,41	104,80	20,39	24,29	5,68	B
	120 - 600		Dif.	-365%	-103%	-103%	-103%	-103%	
Original	120 - 600	C ⇒ B	Média	80,88	38,96	7,58	9,03	2,11	E
<i>Mod</i> ₁	120 - 600		Média	17,41	15,23	2,96	3,53	0,82	B
	120 - 600		Dif.	-365%	-156%	-156%	-156%	-156%	
Original	120 - 600	C ⇒ D	Média	80,88	39,37	7,66	9,12	2,13	F
<i>Mod</i> ₁	120 - 600		Média	17,41	15,41	3,00	3,57	0,83	C
	120 - 600		Dif.	-365%	-155%	-155%	-155%	-155%	
Original	120 - 600	D ⇒ A	Média	116,90	124,86	24,29	28,94	6,76	B
<i>Mod</i> ₁	120 - 600		Média	6,36	67,72	13,18	15,69	3,67	A
	120 - 600		Dif.	-1737%	-84%	-84%	-84%	-84%	

Fonte: Autor (2017).

Diante dos resultados obtidos, observa-se que para todos os parâmetros adicionais apresentados, reduções significativas foram obtidas, sendo corroboradas pela comparação entre os níveis de serviço apresentados.

5.3 Conflitos adicionais observados em campo

As observações em campo permitiram a quantificação de movimentos conflitantes adicionais realizados pelos condutores, os quais não foram levados em consideração na modelagem da região devido a periculosidade e risco de acidentes inerentes.

A Figura 60 retrata os condutores realizando movimentos no sentido contrário da corrente de tráfego. Na resolução desse problema, sugere-se a intensificação da fiscalização rodoviária na área em questão, assim como a inserção de sinalização vertical de proibição desses movimentos.



Figura 60 – Movimento conflitantes.

Fonte: Autor (2017).

A Figura 61 ilustra uma via local construída pelos próprios moradores para terem acesso direto as suas residências. Os movimentos de entrada e saída dessa área foram consideráveis. Contudo, especialmente nessa área que apresenta visibilidade deficiente, esses movimentos conflitantes podem gerar acidentes de proporções significativas. Assim, sugere-se a interdição dessa via improvisada através da implantação de dispositivos físicos, a exemplo dos *guard-rails*. Ademais, toda a área da interseção em trombeta apresenta deficiência no que se refere as sinalizações horizontais e verticais, necessitando de adequação de acordo com as diretrizes apresentadas no Manual de Sinalização Rodoviária (DNIT, 2010) e Manuais Brasileiros de Sinalização de Trânsito do Conselho Nacional de Trânsito - CONTRAN.



Figura 61 – Área conflitante.

Fonte: Autor (2017).

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Esse trabalho teve como objetivo avaliar uma região crítica da cidade de Arapiraca que apresenta problemas de tráfego, com áreas de congestionamento recorrentes e áreas conflitantes visíveis, corroborada a partir de observações de campo. Essa área é composta por duas interseções, uma em nível, a rotatória, e a outra sendo uma interconexão do tipo trombeta.

Dessa forma, os resultados das medidas de eficiência quantificados através da microssimulação de tráfego com o *software* PTV VISSIM© comprovaram que a configuração atual não tem atendido o volume de tráfego de forma satisfatória. Nesse sentido, foram propostas alternativas de modificação, a exemplo da modificação simples da preferência no fluxo rotatório, as quais resultaram em melhorias consideráveis na capacidade e fluidez do tráfego da região, sendo passíveis de implantação pelas autoridades locais.

Nesse contexto, destaca-se a importância da análise de tráfego, principalmente em regiões metropolitanas de maior fluxo, através de métodos de avaliação de desempenho de tráfego que contribuam para a redução do tempo de viagem e consequente consumo de combustível e emissão de poluentes gasosos, dos gastos de manutenção da frota de veículos e na probabilidade de ocorrência de acidentes.

6.1 Sugestões para trabalhos futuros

- Simular o impacto dos pedestres, bicicletas e transporte público na área em estudo;
- Aplicação da metodologia de microssimulação descrita no presente trabalho em outras áreas críticas da cidade.
- Estudo e simulação da mudança da geometria das interseções na capacidade das vias.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AASHTO - American Association of State Highway and Transportation Officials. **A Policy on Geometric Design of Highways and Streets**. 6th Edition. Washington D.C., EUA, 2011. 912 p.

ANTAS, P. M. et al. **Estradas: Projeto Geométrico e de Terraplenagem**. Rio de Janeiro: Interciência, 2010. 282 p.

ARAPIRACA – AL. **Prefeitura: Economia de Arapiraca**. 2017. Disponível em: <http://web.arapiraca.al.gov.br/>. Acesso em: 20 de novembro de 2017.

BRASIL. Presidência da República. **Lei nº 9.503, de 23 de setembro de 1997**: Institui o Código de Trânsito Brasileiro. Diário Oficial da União, Poder Executivo, Brasília, 1997. Disponível em: < http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/L9503.htm>. Acesso em 2 de dezembro de 2017.

CNT - Confederação Nacional de Transporte. **Pesquisa CNT de Rodovias: Relatório Gerencial**. Brasília, DF, Brasil, 2017. 403 p.

COELHO, M. D. **Análise e Sugestões para Projeto Geométricos de Rótulas modernas em Vias Urbanas**. Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa em Engenharia - UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil, 2012.

DENATRAN - Departamento Nacional de Trânsito. **Frota de Veículos do estado de Alagoas**. Disponível em: <<http://www.denatran.gov.br/estatistica>>. Acesso em 20 out. 2017.

DNER - Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. **Glossário de Termos Técnicos Rodoviários**. IPR – Instituto de Pesquisas Rodoviárias, Publicação 700, Rio de Janeiro, Brasil, 1997. 296 p.

DNER - Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. **Manual de Projeto Geométrico de Rodovias Rurais**. IPR – Instituto de Pesquisas Rodoviárias, Publicação 706, Rio de Janeiro, Brasil, 1999. 195 p.

DNIT - Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. **Manual de Projeto de Interseções**. IPR – Instituto de Pesquisas Rodoviárias, Publicação 718, 2ª. Edição, Rio de Janeiro, Brasil, 2005. 532 p.

_____. **Manual de Projeto Geométrico de Travessias Urbanas**. IPR – Instituto de Pesquisas Rodoviárias, Publicação 740, 1ª Edição, Rio de Janeiro, Brasil, 2010. 392 p.

_____. **Manual de Sinalização Rodoviária**. IPR – Instituto de Pesquisas Rodoviárias, Publicação 743, 3ª Edição, Rio de Janeiro, Brasil, 2010. 412 p.

DONG, J. et al. **Vissim Calibration for Urban Freeways**. Iowa State University Digital Repository. 2015.

FGSV - Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen. **The Guidelines for the Design of Motorways (RAA)**. Germany, 2008. Translation 2011.

FHWA - Federal Highway Administration. **Guidelines for applying traffic microsimulation modeling software, volume 3 of Traffic Analysis Toolbox**. US Department of Transportation, Federal Highway Administration, Research, Development, and Technology. 2004.

_____. **Signalized Intersections: Informal Guide**. US Department of Transportation, Federal Highway Administration, Research, Development, and Technology. 2004.

GARBER, N. J.; HOEL, L. A. **Traffic & Highway Engineering**. 4th Edition. University of Virginia: Cengage Learning, 2009.

GOOGLE. **The Bright Side of Sitting in Traffic: Crowdsourcing Road Congestion Data**. 2009. Disponível em: <<https://blog.google/>>. Acesso em: 15 nov. 2017.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Arapiraca: Informações Completas**. Disponível em: <<https://cidades.ibge.gov.br/>>. Acesso em: 15 de novembro de 2017.

LAY, M. G. **Handbook of Road Technology**. 4th Edition. New York: Spon Press, 2009.

MANNERING, F. L.; WASHBURN, S. S. **Principles of Highway Engineering and Traffic Analysis**. 5th Edition. John Wiley & Sons, 2012. 336 p.

PTV - Planug Transport Verkehr AG. **Training PTV VISSIM: Basic Course**. 2015.

_____. **PTV VISSIM 9 User Manual**. 2017.

ROMÃO, S. R. L. **A Cidade do Futuro: Agenda 21 - Arapiraca**. Maceió: Ideario, 2008.

TRB - Transportation Research Board. **Roundabouts: An Informal Guide**. 2nd Edition. NCHRP REPORT 672 - National Cooperative Highway Research Program, Washington D.C, EUA, 2010. 193 p.

VICTORINO, M. J. S. **Análise de Desempenho de uma Interseção Não Semaforizada em Nível (Rotatória) utilizando Microssimulação – Estudo de Caso: Anel Viário da UFRJ**. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil, 2014.

WSDOT - Washington State Department of Transportation. **Protocol for Vissim Simulation**. 2014

APÊNDICE A: Calibração - Etapa de Iterações

Random Seed	42					42+12 = 54					42				
Parâmetros	W94 - Padrão					W94 - Padrão					W99 - Padrão				
Volume	A	B	C	D	F	A	B	C	D	F	A	B	C	D	F
Real 60'	972	948	576	1096	248	972	948	576	1096	248	972	948	576	1096	248
Simulado 60'	803	773	458	825	263	675	728	525	1058	218	750	773	495	1058	210
Real 8'	130	126	77	146	33	130	126	77	146	33	130	126	77	146	33
Simulado 8'	107	103	61	110	35	90	97	70	141	29	100	103	66	141	28
GEH	5,69	5,98	5,21	8,74	0,91	10,35	7,62	2,17	1,17	2,00	7,57	5,98	3,50	1,17	2,51
	54					54					54				
	W99 - Padrão					W99 - Gomes (2004): CC1 = 0,9					W99 - Gomes (2004): CC1 = 1,4				
	A	B	C	D	F	A	B	C	D	F	A	B	C	D	F
Real 60'	972	948	576	1096	248	972	948	576	1096	248	972	948	576	1096	248
Simulado 60'	870	803	555	878	263	787,5	757,5	487,5	1057,5	210	780	757,5	502,5	1050	232,5
Real 8'	130	126	77	146	33	130	126	77	146	33	130	126	77	146	33
Simulado 8'	116	107	74	117	35	105	101	65	141	28	104	101	67	140	31
GEH	3,36	4,92	0,88	6,96	0,91	6,22	6,52	3,84	1,17	2,51	6,49	6,52	3,17	1,40	1,00
	54					54					54				
	W99 - Lowes (2006)					W99 - Zhizhou (2005)					W99 - Park (2006)				
	A	B	C	D	F	A	B	C	D	F	A	B	C	D	F
Real 60'	972	948	576	1096	248	972	948	576	1096	248	972	948	576	1096	248
Simulado 60'	803	780	495	1065	210	833	765	465	1073	210	668	713	443	990	203
Real 8'	130	126	77	146	33	130	126	77	146	33	130	126	77	146	33
Simulado 8'	107	104	66	142	28	111	102	62	143	28	89	95	59	132	27
GEH	5,69	5,72	3,50	0,94	2,51	4,64	6,25	4,87	0,71	2,51	10,64	8,17	5,92	3,28	3,03

APÊNDICE A: Calibração - Etapa de Iterações (Continuação)

Random Seed	54					54					54				
Parâmetros	W99 - Kim (2007)					W99 - Oliveira (2008)					W99 - ODOT: CC1 = 1,4; CC2 = 0,85; CC3 = 2,15				
Volume	A	B	C	D	F	A	B	C	D	F	A	B	C	D	F
Real 60'	972	948	576	1096	248	972	948	576	1096	248	972	948	576	1096	248
Simulado 60'	795	788	495	1103	203	788	758	473	1043	210	788	788	488	1058	210
Real 8'	130	126	77	146	33	130	126	77	146	33	130	126	77	146	33
Simulado 8'	106	105	66	147	27	105	101	63	139	28	105	105	65	141	28
GEH	5,95	5,45	3,50	0,20	3,03	6,22	6,52	4,52	1,64	2,51	6,22	5,45	3,84	1,17	2,51
	54					54					54				
	W99 - ODOT: CC0 = 1,8; CC1 = 1,05; CC2 = 7					W99 - Zhizhou (2005): CC4 E CC5 = 0,25					W99 - Kim (2007): CC1 = 0,85				
Volume	A	B	C	D	F	A	B	C	D	F	A	B	C	D	F
Real 60'	972	948	576	1096	248	972	948	576	1096	248	972	948	576	1096	248
Simulado 60'	690	742,5	510	1065	225	818	803	465	1050	210	818	803	518	1110	210
Real 8'	130	126	77	146	33	130	126	77	146	33	130	126	77	146	33
Simulado 8'	92	99	68	142	30	109	107	62	140	28	109	107	69	148	28
GEH	9,78	7,07	2,83	0,94	1,50	5,17	4,92	4,87	1,40	2,51	5,17	4,92	2,50	0,42	2,51
	54														
	W99 - Kim (2007): CC1 = 0,75														
Volume	A	B	C	D	F										
Real 60'	972	948	576	1096	248										
Simulado 60'	832,5	802,5	495	1087,5	217,5										
Real 8'	130	126	77	146	33										
Simulado 8'	111	107	66	145	29										
GEH	4,64	4,92	3,50	0,26	2,00										

APÊNDICE B: Validação – Teste-t de Student

Rodada de Simulação	Intervalo	Random Seed	Velocidade Média Simulada (km/h)	Leituras Veículo Floater: Runtastic	Velocidade Média Real (km/h)
1	120-600	42	31,87	1	28,45
2	120-600	54	44,07	2	28,09
3	120-600	66	22,33	3	47,23
4	120-600	78	37,31	4	23,48
5	120-600	90	34,44	5	34,1
6	120-600	102	30,70	6	39,46
7	120-600	114	38,40	7	36,15
8	120-600	126	35,92	8	31,71
9	120-600	138	29,79	9	36,48
10	120-600	150	34,20	10	53,05
11	120-600	162	29,51	11	47,33
12	120-600	174	34,31	12	50,94
13	120-600	186	36,23		
14	120-600	198	33,18		
15	120-600	210	36,64		
16	120-600	222	38,17		
17	120-600	234	31,91		
18	120-600	246	30,58		
19	120-600	258	25,60		
20	120-600	270	30,05		

RESUMO

	Velocidade Média Simulada (km/h)	Velocidade Média Real (km/h)
Média	33,26	38,04
Variância	23,51	93,55
Observações	20	12
Hipótese da diferença de média	0	
gl	14	
Stat t	-1,60	
P(T<=t) uni-caudal	0,07	
t crítico uni-caudal	1,76	
P(T<=t) bi-caudal	0,13	
t crítico bi-caudal	2,14	

Verificações:

valor-P > 5%

0,13 > 0,05 **ok**

APÊNDICE C: Levantamento de Campo – Imagens adicionais





ANEXO 1 (Continuação)

