

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

CECÍLIA LEITE SABAT

**VEÍCULO AUTÔNOMO E SUA INTERFERÊNCIA NA CAPACIDADE DE
INTERSEÇÕES SEMAFÓRICAS:** avaliação dos tempos de deslocamento

Recife

2018

CECÍLIA LEITE SABAT

**VEÍCULO AUTÔNOMO E SUA INTERFERÊNCIA NA CAPACIDADE DE
INTERSEÇÕES SEMAFÓRICAS: avaliação dos tempos de deslocamento**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil do Centro de Tecnologia e Geociências (CTG) da Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Área de concentração: Transportes e gestão das infraestruturas urbanas.

Orientadora: Profa. Dra. Maria Leonor Alves Maia.

Recife

2018

Catálogo na fonte
Bibliotecária Maria Luiza de Moura Ferreira, CRB-4 / 1469

S113v Sabat, Cecília Leite.

**Veículo autônomo e sua interferência na capacidade de interseções
semafóricas:** avaliação dos tempos de deslocamento / Cecília Leite Sabat. - 2018.

99 folhas, il., tabs., abr., sigl.

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Maria Leonor Alves Maia.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, 2018.

Inclui Referências e Apêndices.

1. Engenharia Civil. 2. Veículo autônomo. 3. Interseções semafóricas. 4. Tempos de deslocamento. I. Maia, Maria Leonor Alves (Orientadora). II. Título.

UFPE

624 CDD (22. ed.)

BCTG/2018-398

CECÍLIA LEITE SABAT

VEÍCULO AUTÔNOMO E SUA INTERFERÊNCIA NA CAPACIDADE DE INTERSEÇÕES SEMAFÓRICAS: avaliação dos tempos de deslocamento

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestra em Transportes e Gestão das Infraestruturas Urbanas.

Aprovada em: 29/08/2018.

BANCA EXAMINADORA

Prof^a. Dr.^a Maria Eleonor Alves Maia (Orientadora)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof^o. Dr. Leonardo Herszon Meira (Examinador Interno)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof^a. Dr.^a Isabelle Yruska de Lucena Gomes Braga – UFPB (Examinadora Externa)
Universidade federal da Paraíba

RESUMO

O veículo autônomo é advogado como solução para a diminuição da circulação de veículos individuais no ambiente urbano e para o aumento da eficiência de utilização da capacidade das vias. Além disso, com a difusão da tecnologia, a tendência aponta para mudanças no paradigma de entendimento e uso do ambiente urbano, relações de comércio e posse de veículos. Apesar da nova tecnologia incitar um sentimento de progressão, o efeito da utilização dos veículos autônomos nas cidades ainda carrega elevado grau de incerteza. Portanto, o presente trabalho se propõe a analisar como a direção autônoma interfere nos tempos de deslocamento em vias urbanas, focando o estudo em intercessões semaforicas. Do mesmo modo, será desenvolvido um modelo matemático para análise dos tempos de deslocamento, que englobe as características do veículo autônomo, utilizando metodologia proposta pelo *Highway Capacity Manual* (HCM). Nesse processo, serão consideradas as variáveis de *headway* e percentual de presença de veículos autônomos na frota. Tal modelo será, então, utilizado para a realização de um estudo sobre intercessões semaforicas selecionadas na cidade do Recife, em cenários com diferentes níveis de participação de veículos autônomos no fluxo de demanda. Por fim, espera-se contribuir com elementos para a discussão sobre a inserção de veículos autônomos nas cidades e seus possíveis impactos na mobilidade urbana.

Palavras-chave: Veículo autônomo. Interseções semaforicas. Tempos de deslocamento.

ABSTRACT

Autonomous vehicles are advocated as a solution to reduce the circulation of private individual vehicles in urban's environment and to increase the efficiency of roadway capacity utilization. In addition, with the diffusion of technology, the trend points to changes in the paradigm of understanding and use of urban's environment, market relations and vehicle ownership. Although the new technology prompts a sense of progression, the effect of its use in cities still carries a high degree of uncertainty. Therefore, the present work proposes to analyze how the driveless vehicles interferes in travel times in urban streets, focusing the study in signalized intercessions. To that end, it will be developed a mathematical model for the analysis of travel times, which includes the characteristics of the autonomous vehicle, using methodology proposed by the Highway Capacity Manual (HCM). In this process, the variables of headway and percentage of presence of autonomous vehicles in the fleet will be considered. This model will then be used to carry out a study of semaphore intercessions selected in the city of Recife, in scenarios with different levels of participation of autonomous vehicles in the flow of demand. Finally, the author hopes to contribute with elements to enrich the discussion around insertion of autonomous vehicles in the cities as well as it's possible impats on urban mobility.

Keywords: Autonomous vehicles. Signalized intersections. Travel times.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 –	Eixos de referência para os controles lateral e longitudinal	23
Figura 2 –	Passo-a-passo para determinação de medidas de desempenho - visão geral	38
Figura 3 –	Etapas para o cálculo do LOS	38
Figura 4 –	Passo-a-passo da análise dos impactos dos V.A. na eficiência de interseções localizadas na cidade do Recife, Brasil	43
Figura 5 –	Localização das vias estudadas	44
Figura 6 –	Mapa mostrando a localização da região estudada	54
Figura 7 –	Rede do Sistema Integrado de Transporte público de passageiros do Recife	56

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 –	Ciclo de vida das tecnologias emergentes, adaptado para veículos autônomos	19
Gráfico 2 –	Tendência de evolução na buscas de termos relacionados à veículos autônomos no site de buscas Google, segundo a ferramenta Google Trends, acessada em 08/03/2018	20
Gráfico 3 –	Evolução da frota de veículos individuais na RMR	55
Gráfico 4 –	Percentual de giros à direita ou esquerda, por movimento	60
Gráfico 5 –	Evolução dos atrasos de acordo com presença de V.A. – todas as vias	61
Gráfico 6 –	Evolução dos atrasos de acordo com presença de V.A. - Exceto semáforo 364	62
Gráfico 7 –	Evolução dos atrasos - Vias principais	64
Gráfico 8 –	Evolução dos atrasos - Vias Principais - Exceto semáforo 364	65
Gráfico 9 –	Evolução dos atrasos - Vias secundárias	66
Gráfico 10 –	Evolução dos atrasos - Vias Saturadas	69
Gráfico 11 –	Evolução dos atrasos - Vias Não Saturadas	69
Gráfico 12 –	Relação entre % de saturação e % de diminuição no <i>delay</i> das vias saturadas	70
Gráfico 13 –	Relação entre % de saturação e % de diminuição no <i>delay</i> das vias não saturadas	70

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 –	Classificação do nível de automação segundo os institutos SAE, NHTSA e BASt	21
Tabela 2 –	Experiências com Veículos Autônomos	31
Tabela 3 –	Níveis de LOS	38
Tabela 4 –	Cenários - % de V.A. versus Headway médio da via	45
Tabela 5 –	Percentuais e Headways dos veículos autônomos	52
Tabela 6 –	Cálculo de Capacidade de aproximação dos semáforos e % de saturação	67

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ACC	<i>Adaptive Cruise Control</i>
ADS	<i>Automated Driving System</i>
ADS-DV	<i>Ads-Dedicated Vehicle</i>
CACC	<i>Cooperative Adaptive Cruise Control</i>
CTB	Código de trânsito brasileiro
CTTU	Autorarquia de Trânsito e Transporte Urbano
DDT	<i>Dynamic Driving Task</i>
et al.	<i>e outro</i>
FRT	<i>Freight Rapid Transit</i>
GPS	<i>Global Positioning System</i>
HCM	<i>Highway Capacity Manual</i>
ICPS	Instituto da Cidade Pelópidas Silveira
LiDAR	<i>Light Detection And Ranging</i>
LOS	<i>Level of Service</i>
NHTSA	<i>National Highway Traffic Safety Administration</i>
ODD	<i>Operational Design Domain</i>
PRT	<i>Personal Rapid Transit</i>
SAE	<i>Society of Automotive Engineers</i>
RMR	Região Metropolitana de Recife
SEI	Sistema Estrutural Integrado
UITP	<i>Union Internationale de Tramways</i>
V.A.	Veículo Autônomo
VAD	<i>Vehicle Awareness Device</i>

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	12
1.1	JUSTIFICATIVA	15
1.2	OBJETIVOS DA DISSERTAÇÃO.....	17
1.3	LIMITAÇÕES	17
1.4	ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	18
2	VEÍCULOS AUTÔNOMOS.....	19
2.1	O QUE É UM VEÍCULO AUTÔNOMO?.....	19
2.1.1	Definições e Terminologias de Automação Veicular	20
2.2	FUNCIONAMENTO E TECNOLOGIAS IN-VEHICLE	24
2.3	ESTUDOS E EXPERIÊNCIAS COM V.A.....	28
2.3.1	Desempenho Da Rede De Transporte e os V.A.....	28
2.3.2	Experiências com V.A.	30
2.4	DESAFIOS PARA A IMPLANTAÇÃO DO V.A.	32
3	CAPACIDADE DAS VIAS.....	35
3.1	DEFINIÇÕES E CONCEITOS	35
3.2	INTERSEÇÃO: PONTO CRÍTICO DO TRÁFEGO.....	36
3.3	O HCM E O QUE ELE FALA SOBRE CAPACIDADE DE INTERSEÇÃO	36
3.4	CAPACIDADE DA VIA E VEÍCULO AUTÔNOMO	39
4	METODOLOGIA.....	42
5	MODELO MATEMÁTICO PARA ESTUDO DO COMPORTAMENTO DO TEMPO DE VIAGEM COM V.A. E APLICAÇÃO PRÁTICA.....	46
5.1	MODELO PARA CÁLCULO DO TEMPO DE VIAGEM	46
5.1.1	Detalhado a Equação do Uniform Delay	47
5.1.2	Taxa de Saturação do Fluxo e Adaptações para Modelar V.A.	49
5.1.3	Construção do Modelo e Considerações	52
5.2	APLICAÇÃO DO MODELO MATEMÁTICO EM UMA SITUAÇÃO REAL	54
5.2.1	Região e Interseções.....	54
5.2.2	Obtenção de Dados	56
5.2.3	Definição de Parâmetros	56

6	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	60
6.1	RESULTADOS OBTIDOS	60
6.1.1	Análise do Agrupamento de Todos os Dados de Delay, Sem Distinção de Características das Vias ou Níveis de Saturação	61
6.1.2	Análise do Agrupamento dos Dados do Delay Segundo Classificação da Via, em Vias Principais e Vias Secundárias	63
6.1.3	Análise do Agrupamento dos Dados de Delay Segundo o Nível de Saturação do Semáforo, em Saturados e Não Saturado	66
6.2	DISCUSSÕES	70
7	CONCLUSÃO	76
	REFERÊNCIAS.....	79
	APÊNDICE A – TABELA DE PROGRAMAÇÃO SEMAFÓRICA	84
	APÊNDICE B – INTERSEÇÕES, HORÁRIOS DE PICO E VOLUME DE VEÍCULOS	88
	APÊNDICE C – TABELA DE SEMÁFOROS DESCONSIDERADOS COM % DE GIROS À ESQUERDA OU À DIREITA MAIOR QUE 10,5%	91
	APÊNDICE D – TABELA DE CÁLCULO DA TAXA DE SATURAÇÃO.....	92
	APÊNDICE E – TABELA DE CÁLCULO DAS CONSTANTES C, G E K.....	95
	APÊNDICE F – TABELAS DE DELAYS VERSUS PERCENTUAL DE V.A. NA FROTA	98

1 INTRODUÇÃO

Esta dissertação irá estudar o que acontece quando veículos tradicionais são substituídos por veículos autônomos (V.A.) nas frotas de automóveis privados individuais que circulam nas vias urbanas. Mais especificamente, será analisado o impacto dos V.A. no tempo de espera em interseções semaforicas.

O Código de Trânsito Brasileiro (CTB) de 1997, define o automóvel como um “veículo automotor destinado ao transporte de passageiros, com capacidade para até oito pessoas, exclusive o condutor”. Considera ainda que veículo automotor é todo

veículo a motor de propulsão que circule por seus próprios meios, e que serve normalmente para o transporte viário de pessoas e coisas ou para a tração viária de veículos utilizados para o transporte de pessoas e coisas. O termo compreende os veículos conectados a uma linha elétrica e que não circulam sobre trilhos (ônibus elétrico) (BRASIL, 1997).

Ferreia (1989), define automóvel (do grego αὐτός ["autós"], "por si próprio", e do latim mobilis, "mobilidade"), como um “veículo que se locomove por seus próprios meios”. Fala ainda que

Em termos gerais, designa-se automóvel ao veículo composto de quatro rodas, com autopropulsão à base de combustão interna, alimentada por álcool, gasolina, gás, diesel, biogolina, biodiesel ou qualquer outra mistura de combustível, ou ainda que se movam por meio de motores elétricos ou a vapor com a finalidade de transporte de passageiros e carga (FERREIRA, 1989).

Com o passar dos tempos, a tecnologia automotiva evoluiu, acrescentando várias funcionalidades às máquinas. Uma recente mudança na forma como os veículos funcionam foi materializada pela introdução da automação. “O veículo autônomo é um veículo capaz de planejar seu caminho e executar seu plano sem necessitar de intervenção humana” (MCGRAW-HILL, 2003)

Veículo autônomo é um tema que desperta interesse desde o ano de 1925, quando foi apresentado um protótipo de carro movido a rádio (STAYTON, 2015). Esse tema vem sendo

estudado pela comunidade acadêmica e tem, igualmente, interessado a indústria automotiva, e empreendedores ligados ao desenvolvimento e uso de tecnologias disruptivas, como o consórcio da Audi, BMW e Daimler que adquiriu o HERE, um software de navegação da Nokia que lhes ajudará a guiar a próxima geração de seus veículos autônomos.

Além disso, é possível testemunhar a movimentação de empresas de outros ramos, como a Bosh, o Tom-Tom, o Uber, o Google e a Apple, em direção à corrida pelo desenvolvimento de soluções que irão apoiar a direção autônoma (SEIF; HU, 2016).

Acredita-se que essa nova tecnologia mudará o paradigma de entendimento e uso do ambiente urbano. A pesquisa da *Singularity University* (SINGULARITY, 2018) estima que, em 2026, prevalecerá a tendência do compartilhamento de veículos e que os veículos autônomos irão estar dominando as estradas.

O engajamento de empresas de diversos ramos no desenvolvimento da tecnologia autônoma expande as possibilidades de uso do automóvel além do essencial, que é o deslocamento de pessoas e cargas. Por exemplo, em recente matéria divulgada pela SAE Internacional (SAEa, 2018), a Toyota revela sua perspectiva de utilização da automação como uma porta para o *e-commerce* autônomo.

Olhando-se a realidade das cidades, tem-se que a situação ideal seria a diminuição do quantitativo de veículos presentes no ambiente urbano. Através disso, seria possível devolver a cidade para as pessoas, liberando espaços destinados a estacionamento e diminuindo a necessidade de expandir a malha viária, por exemplo.

Além desses aspectos, a diminuição da frota ajudaria a reduzir os custos de manutenção das vias, os níveis de poluição e de ruídos provocados pelos veículos, resultando em uma consequente melhora do quadro geral de bem-estar da população.

Pissardini (2013) defende que o progresso no uso e no desenvolvimento dos V.A. trará os seguintes benefícios para as cidades:

- (1) Redução dos acidentes de trânsito provocados por fatores humanos;
- (2) Possibilidade de deficientes (motoras ou visuais) utilizarem o automóvel sem auxílio de terceiros;
- (3) Otimização dos recursos veiculares através da utilização adequada dos componentes; e
- (4) Aumento da capacidade de tráfego das vias com a redução das distâncias entre os veículos, em função de menor tempo de reação para frenagens (PISSARDINI, 2013).

De fato, durante a condução do veículo tradicional, a comunicação entre os motoristas se resume a sinais sonoros e luminosos, a padronização dos movimentos é mínima e os mesmos possuem vícios, e a percepção, pelo condutor, dos eventos que ocorrem no tráfego é limitada ao seu campo de visão ou a informações recebidas de aplicativos. Ainda assim, mesmo que receba informações por aplicativos de compartilhamento colaborativo, o modo como cada motorista irá reagir é incerto e descoordenado.

Portanto, a habilidade do motorista humano para a maximização do aproveitamento da capacidade das vias é limitada (ZHENG *et al.*, 2017). Nesse ponto, pode-se compreender um dos motivos pelos quais o V.A. se torna atrativo. A tecnologia de automação permitirá a coordenação de informações e respostas às mesmas, entre veículos em si e também entre veículos e infraestrutura, de modo a alcançar um sistema mais eficiente.

Frente a esse contexto, o veículo autônomo é advogado como solução para o alcance de melhores índices de qualidade de vida nas cidades. Entretanto, apesar de estudos otimistas reiterarem essa posição, como o realizado pelo UITP – o qual defende ser possível diminuir a frota de carros em 80% e, ainda assim, garantir que cada cidadão realize as viagens de que precise no seu dia-a-dia (UITP, 2015) –, é necessário que se ampliem os estudos, levando em consideração uma maior quantidade de variáveis, permitindo uma prospecção mais fidedigna do futuro.

Isto porque entende-se que, sim, o V.A. acarretará mudanças positivas, as quais devem ser pontuadas e incentivadas. Porém, ele é igualmente capaz de fomentar ou potencializar situações desfavoráveis. Apesar da nova tecnologia incitar um sentimento de progressão e evolução na mobilidade, o efeito da utilização dos veículos autônomos nas cidades ainda carrega elevado grau de incerteza.

Seu uso pode, de fato, representar um avanço para a mobilidade no mundo. Entretanto, a depender do modo como serão empregados, pode surtir o efeito inverso, causando o aumento da quantidade de veículos nas vias e ainda maiores engarrafamentos, transformando as cidades em lugares desagradáveis para se viver (THOMOPOULOS; GIVONI, 2015).

Por outro lado, tem-se que toda a rede de deslocamento das cidades é baseada em vias, ou seja, espaços planejados e construídos para atender à necessidade de movimentação das pessoas e dos automóveis.

Nas vias, os pontos mais vulneráveis são as interseções, pois é onde acontece, com maior intensidade, a interação entre motoristas, ciclistas e pedestres. Por esse motivo, é lá onde se percebe maiores probabilidades de acidentes (FARS, 2018) e onde se tem início os

congestionamentos, pois também são pontos de interrupções nas vias (PAPAGEORGIU, 1999).

Por sua vez, o congestionamento do tráfego tornou-se uma constante nas redes urbanas devido ao aumento do número de veículos e das demandas por transporte (GANIYU, 2011) acarretando inúmeros problemas sociais como os acidentes de trânsito e a poluição ambiental (ZHENG, 2016). Dito isso, é verificada a importância de se estudar possíveis formas de otimizar o uso das interseções – principal componente da rede responsável pelos atrasos no fluxo de veículos – em busca do aumento de capacidade e consequente diminuição de congestionamento.

As quase infinitas possibilidades prometidas pela conectividade e automação dos veículos e os recentes avanços de implementação observados causam uma natural expectativa que podem levar a uma visão enviesadamente positiva do uso de veículos autônomos.

Portanto, no presente trabalho, considerando os cenários apresentados, e visando compreender melhor o alcance da introdução dos VA, pretende-se responder às seguintes questões:

- Em que medida o veículo autônomo pode interferir na capacidade das interseções ou no tempo de espera?
- Em caso positivo, em que proporção?

1.1 JUSTIFICATIVA

A direção autônoma se apresenta como uma inovação disruptiva que se propõe a modificar a forma como as pessoas se deslocam pelas cidades. Além disso, criam novas dimensões de interação, onde os atores humanos do sistema de mobilidade não serão os únicos responsáveis pela inserção de informação no sistema.

No cenário de automação, softwares serão os principais responsáveis por processar dados e incitar uma reação, compatível à informação obtida, em dispositivos e veículos. A questão a considerar é que os dispositivos e veículos impactam diretamente em variados aspectos da rotina dos indivíduos, em pontos que vão desde as relações humanas até questões de engenharia de tráfego.

Sob o viés econômico, o impacto da direção autônoma pode se dar, negativamente, pela extinção de certas carreiras profissionais, como a de motoristas de ônibus, e até de setores

inteiros de mercado, como o setor de seguro automotivo. Este último quando imaginamos um cenário onde a maior parte da frota é auto-dirigível e, conseqüentemente, os acidentes tenderiam a zero e esse mercado não mais se justificaria.

Entretanto, também é capaz de criar novas oportunidades de negócios, novas carreiras e novos mercados. Um veículo autônomo irá exigir novas especializações dos profissionais que com ele lidarão. Serão necessários programadores para se ocupar de seus softwares, mecânicos especializados em suas peças, indústrias para produzir a tecnologia necessária do próprio veículo e do ambiente externo a ele. Além disso, surgirá um campo rico para ser explorado pela área de programação, produção de tecnologias vestíveis e internet das coisas.

No campo da medicina também é possível enxergar impactos da automação. Por exemplo, ao facilitar o transporte porta- a- porta, os veículos autônomos podem desestimular a caminhada, o que poderia culminar em problemas de saúde pública, como o aumento da obesidade e hipertensão, por tornar as pessoas mais sedentárias.

Outro aspecto importante é que a direção automatizada traz consigo um necessário sistema de conectividade entre os veículos, a infraestrutura e os usuário do sistema. Essa rede de comunicação é uma das responsáveis por viabilizar o deslocamento do veículo sem a interferência humana, por permitir que este “leia” o ambiente no qual se desloca. Portanto, pode-se dizer que essa modalidade de direção incita o desenvolvimento de aplicações e equipamentos capazes de trocar dados entre si. Esses fatos, o incentivo à conectividade e a conectividade em si, abrem um leque de possibilidades no campo da mobilidade.

Do ponto de vista do transporte público, a automação apresenta algumas características que podem servir de apoio a essa atividade. Veículos autônomos de pequena capacidade podem captar passageiros nos subúrbios, com rotas personalizadas e buscando o usuário na localidade em que se encontra, sem a necessidade de deslocamento até uma estação. Esses pequenos veículos, serviriam, então, como alimentadores dos sistemas de transporte de grande capacidade, por exemplo.

Ainda, por eliminar a intervenção humana na direção, elimina também conseqüências destas, como possíveis desconfortos no modo de dirigir provocados por inabilidade ou alterações emocionais do motorista e riscos de acidentes por fadiga ou erro humano. Portanto, tem o potencial de tornar o transporte público mais agradável e seguro aos passageiros.

Além das questões citadas aqui, outras questões irão surgir à medida que a direção autônoma for sendo progressivamente introduzida na rotina dos cidadãos. Por esse motivo, pelos demais já citados e considerando que é reconhecível que esta nova tecnologia, cujo

impacto permeia diversos campos de estudo, está se aprimorando e trilhando seu caminho para a popularização e entrada no mercado, afirma-se a importância do estudo proposto.

1.2 OBJETIVOS DA DISSERTAÇÃO

Esta dissertação tem como objetivo geral analisar em que medida a direção autônoma interfere nos tempos de deslocamento em vias urbanas, focando o estudo em interseções semaforicas.

Como objetivos específicos, esta pesquisa apresenta:

- Desenvolver um modelo matemático para análise dos tempos de deslocamento, que englobe as características do veículo autônomo, considerando as variáveis de *headway* e percentual de presença de veículos autônomos na frota. Este modelo será testado em avaliações de interseções semaforica na cidade do Recife.
- Contribuir com elementos para a discussão sobre a inserção de veículos autônomos nas cidades.

1.3 LIMITAÇÕES

Este trabalho se propôs a estudar os veículos autônomos especificamente do ponto de vista da eficiência que o mesmo pode agregar ao tempo de deslocamento de veículos trafegando em vias urbanas.

O modelo proposto neste trabalho usa como base a metodologia do *Highway Capacity Manual* e está, portanto, sujeito a todas as limitações de escopo imposta pela mesma. Dito isto, esse trabalho se limita a estudar interseções semaforicas em meios urbanos.

O modelo proposto é replicável apenas para regiões com o mesmo perfil da região estudada na aplicação prática. São necessárias modificações para a aplicação do modelo à situações diversas.

Para efeitos de cálculo, foram desconsiderados grupos de movimento que apresentam mais de 10,5% do total da sua demanda para giros à direita ou à esquerda.

1.4 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Nos Capítulos 2 e 3, é feita a revisão da bibliografia. No Capítulo 2 são apresentados conceitos relacionados à veículos autônomos, englobando definições e terminologias, funcionamento e tecnologias envolvidas e estudos e experiências com tais máquinas.

No Capítulo 3, é abordado o tema de capacidade das vias. Nesse capítulo serão discutidos conceitos, será apresentado o *Highway Capacity Manual*, assim como fatores que interferem no cálculo da capacidade e como eles se relacionam com veículos autônomos. Lá também será explicada a importância das variáveis escolhidas para compor o modelo proposto neste trabalho.

No Capítulo 4 é descrita a metodologia da dissertação, onde serão explanadas as etapas da análise dos possíveis impactos na eficiência de interseções, advindos da inserção de veículos autônomos nas vias, a partir da aplicação do modelo considerando dados de interseções da cidade do Recife, Brasil. Nesse capítulo também serão pontuadas questões sobre o HCM, fronteiras do escopo do trabalho, uma breve apresentação da região onde será feita uma aplicação prática e dos cenários adotados.

No Capítulo 5 será apresentado o modelo para cálculo de tempo de viagem, com detalhes quanto ao passo a passo que levou à construção da equação final, assim como algumas considerações sobre o mesmo. Em seguida, é apresentada a região onde será feita a aplicação do modelo, relata-se o processo de obtenção de dados e definição de parâmetros. o modelo será usado para a realização de uma aplicação a um caso prático, com dados reais de tráfego da cidade do Recife, capital de Pernambuco, nordeste do Brasil. Posteriormente, ainda no mesmo capítulo, serão apresentados os dados e resultados obtidos e será feita uma análise crítica acerca dos mesmos.

O Capítulo 6 detalhará os resultados da aplicação do modelo, dividindo-o em três critérios: (1) Agrupamento de todos os dados de *delay*, sem distinção de características das vias ou níveis de saturação; (2) Agrupamento dos dados do *delay* segundo classificação da via, em vias principais e vias secundárias; e (3) Agrupamento dos dados de *delay* segundo o nível de saturação do semáforo, em saturados e não saturados. Em seguida, será tecida uma discussão em cima das informações levantadas, culminando em inferências sobre o tema tratado.

No Capítulo 7 será retratada a conclusão do trabalho e serão sugeridas algumas recomendações para trabalhos futuros.

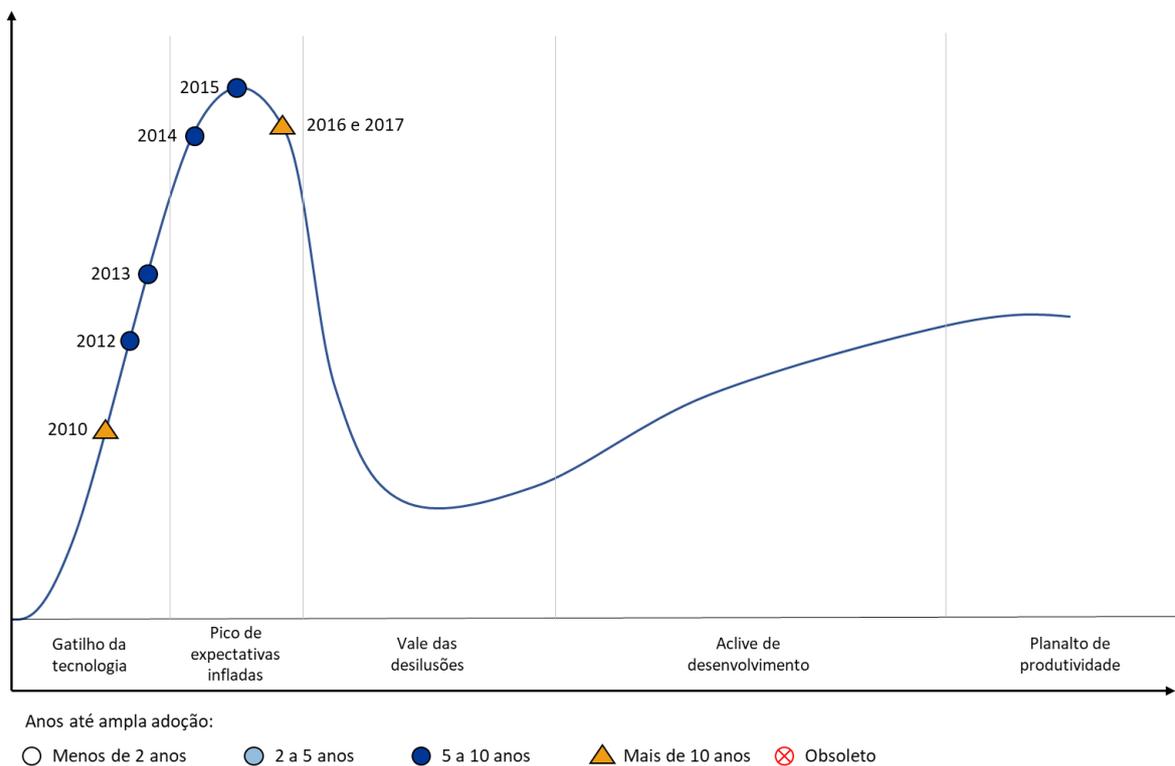
2 VEÍCULOS AUTÔNOMOS

Este capítulo trata das definições acerca dos veículos autônomos, seus componentes, questões de nomenclatura, tecnologia interna e externa envolvida, desafios para sua implantação e experiências com veículos autônomos.

2.1 O QUE É UM VEÍCULO AUTÔNOMO?

Como pode ser observado nos gráficos de ciclo de vida das tecnologias emergentes publicados pela Gartner (FORBES, 2018) (sistematizados no Gráfico 1) uma das maiores empresas norte americanas de pesquisa e consultoria, a menção ao veículo autônomo como uma tecnologia emergente só aparece a partir do ano 2010.

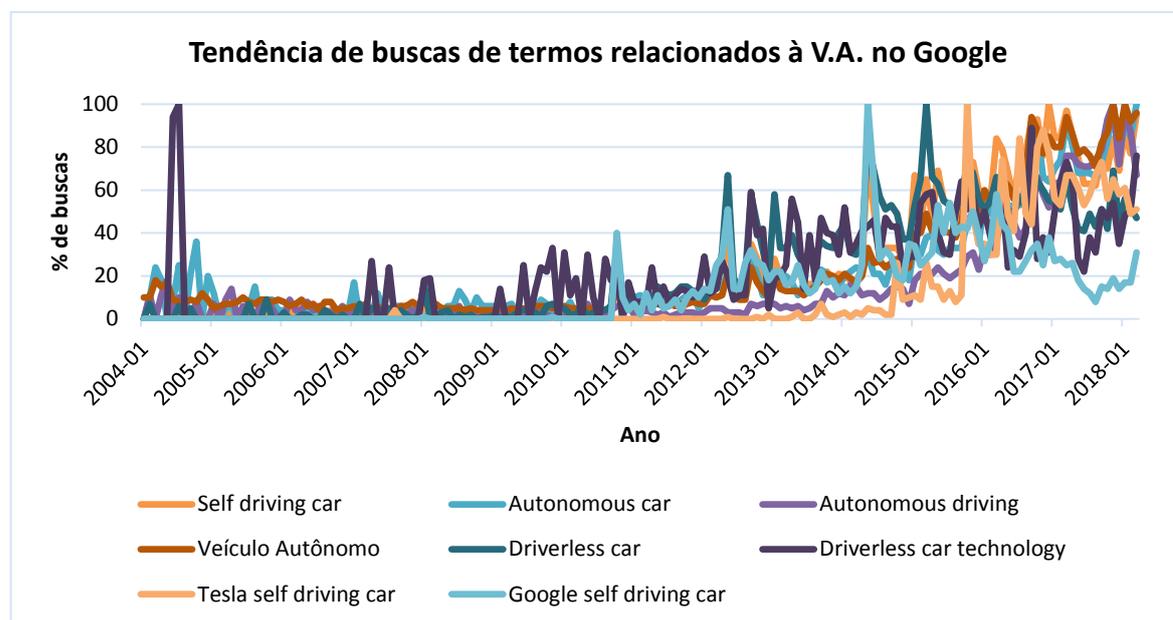
Gráfico 1 - Ciclo de vida das tecnologias emergentes, adaptado para veículos autônomos



Fonte: Forbes, 2018

Do mesmo modo, observa-se que no *google trends*, os termos *autonomous vehicles*, *driveless vehicles*, *self driving cars* e similares tiveram um aumento repentino por volta da mesma época (Gráfico 2).

Gráfico 2 - Tendência de evolução na buscas de termos relacionados à veículos autônomos no site de buscas Google, segundo a ferramenta *Google Trends*, acessada em 08/03/2018



Fonte: Adaptado de Google Trends, 2018

Por isso, o termo veículo autônomo pode causar estranhamento para algumas pessoas, o que é natural, visto que esta é uma tecnologia ainda em ascensão. Portanto, para promover a familiarização com o assunto, será feita uma breve explanação sobre conceitos básicos acerca do tema.

2.1.1 Definições e Terminologias de Automação Veicular

A classificação do nível de automação de um veículo não é uma medida padronizada mundialmente, e diferentes organizações propõem diferentes escalas. As três escalas mais comumente utilizadas usam critérios de: (1) Nível de atenção que a direção exige do condutor; (2) Nível em que o veículo “compreende” o que acontece ao seu redor; e (3) Nível de habilidade do sistema de ter controle lateral e longitudinal, podendo ter controle dos dois ao mesmo tempo, apenas de um ou de nenhum (DOKIC; MÜLLER; MEYER, 2015). A relação entre essas escalas é mostrada na Tabela 1.

Neste trabalho, irá se adotar a escala utilizada pelo *National Highway Traffic Safety Administration* (NHTSA), que está em concordância com a *Society of Automotive Engineers* (SAE). Em seu documento *Surface Vehicle Recommended Practice*, a SAE descreve a

taxonomia e detalha definições de termos relacionados à direção autônoma, inclusive a escala de automação (SAE, 2016). Tal escala é apresentada abaixo.

- Nível 0: Motorista humano controla todas as funções da direção;
- Nível 1: Algumas funções específicas são mantidas sem a interferência do motorista humano. Um exemplo seria o sistema assistente de bordo que mantém a aceleração do veículo constante.
- Nível 2: O motorista já pode ser liberado de funções mais robustas. Seria o caso da automação de pelo menos um sistema de assistência que controla ambos a aceleração/desaceleração e a direção. Por exemplo, o sistema que mantém o veículo dentro da faixa ou aquele que o conserva em controle de cruzeiro.

Nesse nível o motorista tem a possibilidade de retirar as mãos do volante e os pés dos pedais. Entretanto, deve sempre estar atento e engajado para reagir rapidamente e retomar o controle caso seja necessário.

- Nível 3: Em determinadas situações de tráfego e do ambiente em que se encontra, o motorista pode passar o controle de funções críticas de segurança para o veículo. Nota-se, portanto, que um motorista humano ainda é necessário. Entretanto, o mesmo não precisa supervisionar a atividade do carro do mesmo modo como o faz no nível 2.
- Nível 4: O primeiro nível em que se pode falar em autonomia completa. Veículos classificados nesse nível são projetados para monitorar todas as funções críticas de segurança e as condições da estrada, sem interferência alguma do motorista humano. Entretanto, esse modo de operação está limitado ao *Operational Design Domain* (ODD) do veículo, ou seja, não é aplicável a todos os cenários. O significado de ODD será detalhado mais à frente.
- Nível 5: O veículo é completamente autônomo e pode funcionar em qualquer cenário.

Tabela 1 - Classificação do nível de automação segundo os institutos SAE, NHTSA e BASt

	Guiado exclusivamente por humano	Direção assistida	Automação parcial	Automação condicional	Alto grau de automação	Automação completa	Instituto
Nível de automação	0	1	2	3	4	5	SAE
	0	1	2	3	4	5	NHTSA
	0	1	2	3		4	BASt

Fonte: A autora, 2018

Por hora, pode-se se questionar o porquê da importância de se estabelecer ou conhecer uma escala. A relevância de se determinar uma convenção dos níveis de automação passa, primeiramente, pela necessidade de alinhamento de discurso, tornando a comunicação mais eficaz.

Entretanto, outras questões estão presentes, como por exemplo a necessidade de se classificar o tipo de veículo para fins de definição de a qual tipo de seguro ele estaria sujeito. A título de ilustração, a KPMG, empresa de consultoria, estima que existe um potencial de redução de 90% na frequência de acidentes até 2050, o que obrigaria as seguradoras a mudarem seu modo de atuação.

Quando se trata da terminologia usada para se falar de veículos autônomos na literatura acadêmica, nota-se que, por vezes, um termo carrega significados díspares para diferentes pesquisadores. Por se tratar de ramo de estudo relativamente novo ao qual se agrega, constantemente, novos conceitos, e por ser esse um ramo de estudo vasto e abordado em várias partes do mundo simultaneamente, é natural que surjam inconsistências de significado atribuído a cada termo.

Outra dificuldade encontrada em relação à nomenclatura em pesquisas é quando se traduz termos de uma língua para a outra. A tradução pode não ser ideal ou fiel ao significado original. Daí surge a necessidade de padronização para evitar-se desencontros e tornar a comunicação mais eficaz.

Portanto, para que se tenha clareza quanto ao significado que se deseja atribuir aos termos empregados neste trabalho, seguiu-se as recomendações da SAE em seu relatório *Surface Vehicle Recommended Practice* (SAE, 2016) quanto aos termos relacionados a veículos autônomos. A seguir, são apresentados alguns dos termos utilizados e seus significados, assim como termos adicionais que auxiliam no entendimento dos demais.

- *ACTIVE SAFETY SYSTEM*

Sistema que percebe e monitora situações dentro e fora do veículo para prever eventos perigosos e danosos para o veículo, seus ocupantes e outros usuários da via, interferindo automaticamente para reaver o status de segurança. Por definição, entende-se que esses sistemas são criados com o propósito primário de aumentar a segurança e não o conforto.

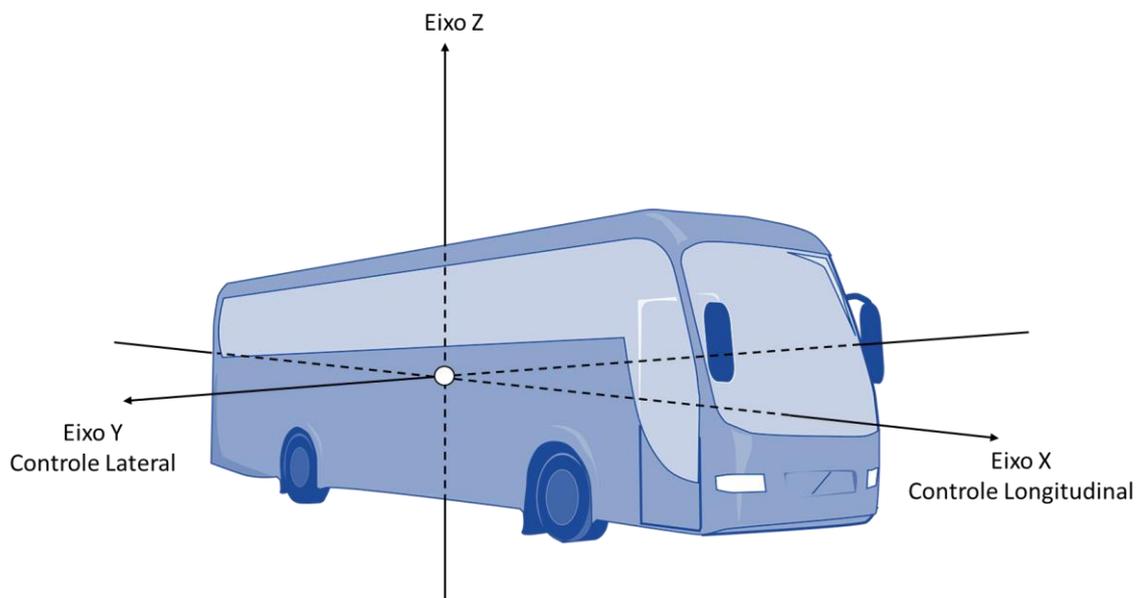
- *DYNAMIC DRIVING TASK (DDT)*

Todas as funções operacionais e táticas, em tempo real, necessárias para operar um veículo em tráfego, incluindo:

- Funções Operacionais: Controle lateral e longitudinal de movimento (Figura 1), via direção e aceleração/desaceleração, respectivamente;
 - Funções simultaneamente Operacionais e Táticas: Monitoramento do ambiente através da detecção, reconhecimento, classificação e preparação para resposta a eventos e objetos; Execução de resposta a eventos e objetos;
 - Funções táticas: Planejamento de manobras; Aumento da visibilidade com o uso de lanternas, sinalização etc.
- *OBJECT AND EVENT DETECTION AND RESPONSE (OEDR)*

Termo usado para se referir às funções Simultaneamente Operacionais e Táticas, descritas anteriormente.

Figura 1 - Eixos de referência para os controles lateral e longitudinal



Fonte: A autora, 2018

- *DRIVING AUTOMATION*
Execução de parte ou todas as DDT de forma contínua.

- *AUTOMATED DRIVING SYSTEM (ADS)*

Hardware e software capazes de, em conjunto, executar todas as funções DDT de maneira continuada. Usado para descrever especificamente sistemas de nível 3, 4 ou 5.

- *DRIVING AUTOMATION SYSTEM or TECHNOLOGY*

Hardware e software capazes de, em conjunto, executar parte ou todas as funções DDT de maneira continuada. Usado para descrever genericamente qualquer sistema capaz de proporcionar automação de condução em todos os níveis (1 a 5). Uso de sigla para descrever essa função não é recomendado, dada a similaridade com termo anterior.

- *ADS-DEDICATED VEHICLE (ADS-DV)*

Veículo projetado para ser operado por um ADS de nível 4 ou 5, exclusivamente, em todas as viagens. O verdadeiro veículo sem motorista. Única categoria que não requer motorista, seja ele convencional ou remoto, apesar de poder ser operado por um motorista temporariamente nos casos de:

- Desvios das funções operacionais;
- Falha no sistema; e
- Enquanto estiver no pátio de triagem, antes de ser despachado.

Chama-se atenção para o fato de que um ADS-DV deve ser desenhado sem interface para o usuário, ou seja, sem freios, direção ou transmissão, por exemplo.

2.2 FUNCIONAMENTO E TECNOLOGIAS IN-VEHICLE

Em linhas gerais, o princípio de funcionamento do V.A. é a utilização de sensores e aparelhos internos para captar eventos que estejam acontecendo no ambiente ao seu redor e conectar-se com outros veículos e com a infraestrutura urbana para receber informações de eventos que seus sensores não conseguem capturar, como por exemplo, a situação do trânsito ou obstáculos na via, dentro de sua rota, a 1 km de distância do seu ponto atual.

Um V.A. é composto por sensores que lhe permitem escanear e interagir com o ambiente ao seu redor, além de possuir dispositivos de comunicação que lhe conectam a outros veículos

e à infraestrutura urbana, criando uma rede de informação que lhe permite a navegação sem interferência humana.

Um deles é o chamado LiDAR, sigla em inglês para *Light Detection And Ranging*, que se utiliza de sensores para mapear o ambiente a um pequeno raio de distância da lataria do veículo. Outro sensor utilizado é o GPS (sigla em inglês para *Global Positioning System*), que permite a obtenção da localização do carro, ainda que de maneira pouco precisa. Por último, radares, sensores ultrassônicos e câmeras auxiliam na leitura do ambiente imediatamente externo ao veículo. A combinação de todos estes sensores permite que se obtenha a localização do carro a um nível de precisão de 10 centímetros (SEIF; HU, 2016).

Ademais, além de sensores capazes de triangular com alta precisão sua localização, os veículos possuem mecanismos que lhes permitem se comunicar, recebendo e repassando dados a outros veículos, e capturar dados provenientes da infraestrutura urbana (SEIF; HU, 2016). Portanto, diversos carros se movimentando e se comunicando formam uma potente rede de informação para a navegação, o que aumenta ainda mais a capacidade de leitura do ambiente.

Como citado, uma frota de veículos conectados forma uma poderosa rede para trocas de informações, inclusive com a infraestrutura e com pessoas. Segundo a *National Highway Traffic Safety Administration* (NHTSA), do departamento de transporte dos Estados Unidos, a conectividade trará uma série de benefícios para o tráfego e tornará a comunidade mais segura e habitável (ITS, 2017). Dentre elas, citam-se:

- **Aplicação para proteção de conexão**, além de permitir que passageiro e provedor de serviço de transporte se comuniquem em uma via de mão dupla, permite também que o passageiro saiba exatamente quando fará sua próxima conexão. Outro viés dessa aplicação é a possibilidade do provedor de serviço de transporte adaptar as partidas dos seus veículos para garantir que passageiros que estão dentro de outro veículo que sofreu algum tipo de atraso consigam realizar a conexão com a próxima linha.
- **Aplicação para compartilhamento dinâmico de frota de veículos**, conecta veículos a dispositivos móveis, tornando automático e facilitando o agendamento de viagens, criação de rotas e aumentando a confiabilidade do sistema de compartilhamento.
- **Controle de cruzeiro adaptativo cooperativo**, regula a velocidade do veículo de modo que ele permaneça a distância constante do veículo da frente, evitando paradas e/ou

desaceleração e aceleração, poupando combustível. Esse sistema é mais conhecido por sua sigla em inglês ACC (*Adaptative Cruise Control*).

- **Aplicação de detecção de filas**, monitora o tráfego vários carros a frente para identificar trânsito lento e toma a precaução de diminuir a velocidade do veículo a fim de evitar colisões frontais.
- **Aplicações para auxílio a pessoas com mobilidade reduzida**, através de dispositivos móveis é possível enviar para a infraestrutura e veículos a informação de que pessoas com dificuldade de locomoção estão atravessando a via, possibilitando a manutenção do sinal de trânsito até que a pessoa alcance a outra calçada. Além disso, é possível alertar os usuários (motoristas, motociclistas, ciclistas) da presença da pessoa atravessando a rua.
- **Sistema dinâmico de disponibilidade de estacionamento**, troca informação com a infraestrutura para identificar vagas vazias de estacionamento.
- **Aviso de zona de incidente**, identifica áreas onde aconteceram incidentes, como um carro quebrado na via, por exemplo, permitindo que determinada faixa seja temporariamente classificada como inutilizável e que os veículos consigam trocar de faixa antes de chegar ao local.
- **Preferência para veículos de primeiros socorros**, troca de informação com infraestrutura e veículos para que o caminho da equipe de atendimento de primeiros socorros seja mantido descongestionado até o local do acidente antes que a situação do tráfego fuja do controle.
- **Consciência em 360 graus**, uso de sensores, câmeras e troca de informação com o meio em que se locomove para que o veículo tenha ciência dos eventos que acontecem em todo seu entorno.
- **Alertas de situações que representam potencial perigo** (aviso visual, sonoro ou por vibração do acento):
 - Aviso de possível colisão frontal;
 - Assistente de intersecções: avisa ao motorista quando é seguro passar por uma interseção;
 - Aviso de não ultrapasse;
 - Aviso de freios de emergência súbito vários veículos à frente;
 - Aviso de veículo no ponto cego; e

- Aviso de passagem de trem mesmo quando motorista não pode ver ou ouvir o trem.
- **Integração tecnológica, possibilitando:**
 - Alertas sobre condições climáticas da via;
 - Comunicação entre veículos;
 - Aviso sobre perigo a veículos que ainda não alcançaram o ponto de perigo;
 - Troca de informação sobre a situação da via com controladores de tráfego, provendo informações detalhadas em tempo real para o gerenciamento do sistema de transporte, o qual pode, por sua vez:
 - ajustar os limites de velocidade da via;
 - notificar/enviar equipes de manutenção para melhorar situação da via; e
 - informar motoristas através de painéis eletrônicos.
- **Reduzir as pegadas de carbono**
 - mantendo padrão de direção que poupa combustível; e
 - reduzindo as paradas e os reinícios através da comunicação com os sinais de trânsito inteligentes.

Alguns dos artifícios citados acima, como alerta de acidentes e alerta de perigo na via, já são de amplo acesso a portadores de *smartphones* através de aplicativos de monitoramento de trânsito. A diferença entre a situação atual e a situação discutida neste trabalho é que, nos aplicativos de *smartphone*, a entrada de informações se dá pelo usuário, que pode decidir ou não fazê-lo. Ainda assim, mesmo que a informação seja adicionada ao mapa, o veículo não terá acesso a elas, cabendo ao motorista reagir conforme a informação.

Na direção autônoma, tratada aqui, as situações são “lidas” pelos artefatos presentes nos veículos, que as processarão, gerando informação que será repassada para outros veículos, infraestrutura, e centrais de monitoramento. A reação nessa última situação é, portanto, inerente e automática.

2.3 ESTUDOS E EXPERIÊNCIAS COM V.A.

Nesse item, serão explorados temas relacionados às consequências da adoção de veículos autônomos, dos pontos de vista da engenharia de tráfego e de questões comportamentais.

2.3.1 Desempenho da Rede de Transporte e os V.A.

Um primeiro ponto a ser abordado quando se estuda a forma com a qual os V.A. interferem no desempenho do sistema é a noção de que, com os V.A., a performance do sistema ou rede de transporte como um todo será modificada. Ou seja, que capacidades, tempos de deslocamento, velocidade, consumo energético, emissões de gases poluentes e outros parâmetros serão alterados.

Tratando de forma mais específica o tema do desempenho, é necessário dedicar uma análise em separado à ideia de que a entrada de veículos autônomos nas ruas poderá modificar o número de viagens e, conseqüentemente, a quantidade de quilômetros viajados nas cidades. Tal possível efeito dos V.A. é bastante explorado na literatura. Entretanto, não há um consenso sobre a direção ou a intensidade dessa modificação.

Os pontos de vista divergem, alguns autores entendem que não haverá aumento no número de viagens - ou que esse aumento será compensado por algum outro fator, como diminuição de acidentes de tráfego e os atrasos decorrentes deste, algoritmos cujo objetivo é mitigar congestionamentos e investimentos em infraestrutura (ATIYEH, 2012; KPMG, 2012; SHLADOVER *et al.*, 2012);

Outros estudiosos defendem a ideia de que, de fato, ocorrerá o aumento de quilômetros viajados e piora no quadro geral, caso não seja administrada uma estratégia de controle de demanda (GUPTA *et al.*, 2006; LITMAN, 2017).

Entretanto, o entendimento dos autores convergem para afirmar que esta nova tecnologia irá modificar os hábitos de deslocamento, estudos e planejamento da mobilidade e a forma de viver a cidade (ATIYEH, 2012; BANGLOEE *et. al.*, 2016; CHOWDHURY, 2016; GUPTA *et. al.*, 2006; KPMG, 2012; LITMAN, 2017; SHLADOVER *et al.*, 2012)

Nesse sentido, Fagnant e Kockelman (2015) defendem que o impacto dos V.A. na segurança e no congestionamento trará mudanças no padrão de comportamento. Isso porque o V.A. será capaz de prover mobilidade para jovens sem idade para possuir habilitação, idosos e pessoas que possuem algum tipo de deficiência que impossibilite o ato de dirigir ou que o desestimule. Tal cenário, segundo os autores, criará uma nova demanda de capacidade para as

vias. Da mesma forma, defendem que os padrões de estacionamento poderão mudar (para áreas mais baratas/menos valorizadas) e os movimentos de *car-sharing* e *ride-sharing* poderiam expandir-se.

Os autores (FAGNANT; KOCKELMAN, 2015) apontam que a maioria das tendências listadas anteriormente sugerem um aumento de quilômetros viajados e um desenvolvimento orientado ao automóvel – apesar de, talvez, acontecer com menos veículos e vagas de estacionamento. O resultado do aumento nos quilômetros viajados teria como consequências o aumento de emissões, maior consumo de gasolina e maiores índices de obesidade.

Entretanto, no mesmo trabalho, Fagnant e Kockelman (2015) analisam que os benefícios dos V.A. podem superar os impactos negativos do aumento dos quilômetros. Isto porque, segundo defendem, mesmo que os V.A. dobrem a quantidade de quilômetros viajados, ocorreria uma diminuição de 90% nos acidentes e, conseqüentemente, 80% menos interrupções no tráfego. Portanto, a capacidade ofertada atualmente pelas estruturas urbanas seria suficiente para acomodar as novas viagens induzidas.

Uma perspectiva interessante é apresentada por Litman (LITIMANA, 2017). O autor destaca um ponto pouco discutido quando se fala em utilizar veículos autônomos, ou seja, qual seria a influência da sensação ou experiência do usuário no modo como as configurações dos veículos serão programadas – pelo próprio usuário, quando houver essa possibilidade, ou pelo fabricante.

De certo, a experiência vivida pelo motorista e pelo passageiro em um veículo de controle manual são diferentes. O motorista começa a sentir desconforto em níveis mais altos de velocidade e de taxas de aceleração/desaceleração. O passageiro é mais sensível a esses critérios. Como no V.A. todos os ocupantes são passageiros e, inclusive, poderão utilizar o tempo em que estão em deslocamento para se engajar em outras atividades, é provável que a aceleração e a desaceleração sejam feitas de forma mais gradual do que quando motoristas humanos estão no comando. Nesse cenário, a velocidade do tráfego diminuiria (LE VINE *et al.*, 2015).

Ainda sobre o modo como os V.A. terão sua forma de agir programada, Le Vine (2015) destaca que caso os V.A. sejam configurados para maximizar cuidados com, por exemplo, leis de trânsito, espaçamento ideal entre veículos e limites de velocidade eles irão frequentemente atrasar outros motoristas. Ainda, se for estabelecido que V.A. terão que esperar por instruções de um humano sempre que situações inesperadas acontecerem eles irão, por muitas vezes, bloquear o trânsito.

Do ponto de vista da infraestrutura física, Dresner e Stone (2008), defendem que métodos atuais de coordenação de tráfego – voltados para motoristas humanos - ficarão ultrapassados e aparecerá uma demanda por um novo paradigma de controle semaforizado, especialmente em interseções. Eles propõem um modelo onde motoristas e interseções são tratadas como agentes autônomos, em um sistema multiagente.

Além disso, propõem, ainda, uma extensão do modelo onde seria possível dar preferência à veículos de emergência nos cruzamentos semaforizados, sem causar perdas significativas para os outros veículos. Entretanto, para se utilizar de todo o potencial oferecido pela automação, nesse caso, chegando a quase eliminar todo o tempo perdido nas interseções, os autores estimam que seja necessária uma taxa de penetração de mercado de 95% para os V.A (DRESNER; STONE, 2008).

O âmbito comportamental também é uma faceta importante a ser estudada, já que os V.A. podem ser um vetor de mudança. Mais especificamente, é relevante o âmbito das preferências dos indivíduos quanto ao modo de transporte. Beiker (2012), por exemplo, aponta que os V.A. podem impulsionar o mercado de taxis urbanos autônomos e desestimular a propriedade de veículos. Schoettle (2015) faz a mesma análise e conclui que a posse de veículo vai diminuir nos EUA, enquanto que o sistema de compartilhamento irá aumentar.

Com a diminuição de posse de veículos, aumento de compartilhamento da frota e o advento dos V.A., as mudanças no total de quilômetros viajados ainda é incerta. Ainda assim, Bangloee (2015) estima que as milhas viajadas por quilômetros possa aumentar de, aproximadamente 11 mil para 20 mil, nos EUA. Litman (LITMANa, 2015) corrobora com a ideia de que haverá aumento quilômetros viajados, o que ele chama de “*rebound effect*”. Portanto, permanece incerta a real contribuição dos veículos autônomos ao desempenho da rede de transporte.

2.3.2 Experiências com V.A.

Os carros auto-dirigíveis, como também podem ser chamados os V.A., já estão sendo testados em diversas cidades do mundo, em experiências com diferentes níveis de complexidade, como mostra o resumo da tabela 2.

Tabela 2 - Experiências com Veículos Autônomos

Local	Atividade	Objetivo e Características	Período	Fonte
Sion, Suíça	Operação de dois ônibus elétricos autônomos no centro da cidade de Sion, em um circuito de 1,5km.	Testar a aceitação do público; Testar a integração da frota autônoma com os pedestres; Oferecer serviços onde antes não existia.	Desde junho de 2016	UITP, 2017
Lyon, França	Serviço de ônibus autônomo nas margens do rio Saône.	Prover fácil acesso a áreas de negócios, lazer, compras e alimentação; Prover intermodalidade com as estações de tram do eco-distrito <i>Confluence</i> .	Desde setembro de 2016	UITP, 2017
Londres, Inglaterra	Serviço de <i>Personal Rapid Transit</i> (PRT) para transporte de passageiros no aeroporto de Heathrow.	Transportar passageiros do terminal do aeroporto até uma área de estacionamento de veículos.	Há 15 anos	ALESSANDRI NI, 2015
Rivium, Holanda do Sul	Sistema de V.A. em uma área de estacionamento de um parque empresarial.	Trafega em pista com 1.800 metros, com 8 estações, 6 cruzamentos para tráfego e passageiros e 6 veículos elétricos. Transporta 3.500 passageiros por dia, com capacidade para 500 p/h nos horários de pico e <i>headway</i> de 2,5 minutos.	Desde 1999	ALESSANDRI NI, 2015

Local	Atividade	Objetivo e Características	Período	Fonte
Masdar, Emirados Árabes Unidos	Sistema de <i>Personal Rapid Transit</i> (PRT) e <i>Freight Rapid Transit</i> (FRT)	<p>Sistema de 13 veículos elétricos autônomos de cabine única (10 PRT + 3 FRT) que percorrem 800 metros, funcionando 24/7, em esquema <i>on demand</i>.</p> <p>Transporta, na maior parte das vezes, estudantes entre uma estação e o campus de pós-graduação da <i>Masdar Institute of Science and Technology</i>.</p> <p>Apresenta velocidade máxima de 40km/h, com capacidade de 500 p/h nos horários de pico, podendo transportar até 4 adultos e 2 crianças por vez.</p>	Desde 2009	ALESSANDRI NI, 2015

Fonte: A autora, 2018

2.4 DESAFIOS PARA A IMPLANTAÇÃO DO V.A.

Pelo menos quatro desafios devem ser considerados à implantação dos V.A., quais sejam: tecnológicos, de regulação, de confiabilidade e segurança, e de aceitação do público.

Segundo Redzic (2015), os três maiores desafios de um veículo automatizado são, em primeiro lugar, conseguir obter a sua localização exata na estrada, em segundo lugar, conseguir “ler” o ambiente no qual se encontra de forma a reconhecer e reagir a eventos em um raio maior que 200 metros ou em esquinas, e, por último, conseguir atender às necessidades de seus passageiros e outros integrantes do tráfego.

Atualmente, mapas eletrônicos são usados largamente para auxiliar a navegação humana no dia a dia de deslocamento por carro nas cidades e em autoestradas. Entretanto, o nível de precisão de localização provida por esses mapas não é suficiente para a navegação de um veículo autônomo. Os sistemas de mapas ainda precisam ser aprimorados, mas já é possível

observar o avanço dessa tecnologia, como mostrado no estudo europeu *European Roadmap Smart Systems for Automated Driving* (DOKIC; MÜLLER; MEYER, 2015).

Outro grande desafio tecnológico a ser endereçado é a exigência de grande capacidade computacional de processamento e armazenamento de dados que soluções para navegação trazem consigo. Por exemplo, uma hora de navegação de um veículo autônomo pode gerar o equivalente a um terabyte de dados. Transformar essa quantidade de dados em informações úteis para a navegação pode levar dois dias de processamento (SEIF; HU, 2016).

Beiker (2012), no trabalho *Legal Aspects of Autonomous Driving*, aponta a necessidade de um arcabouço legal para maximizar a segurança e garantir benefícios aos consumidores. O autor propõe uma parceria interdisciplinar nas áreas de engenharia e direito para a elaboração das leis.

Bagloee aponta que um dos mercados que podem ser afetados pelos V.A. é o de táxis urbanos. Ele defende que os veículos autônomos, juntamente com o sistema de compartilhamento de frota, irá fazer com que proprietários de veículos entendam que o custo benefício de se utilizar de taxis autônomos seja maior. Por conta disso, outro desafio de regulação se apresenta. Nesse caso, é necessária uma regulamentação da tarifa a ser cobrada, um controle da área a ser abrangida atendida por esse novo mercado - a fim de garantir que nenhuma parte da cidade fique desatendida - e modos de atuação.

Outro debate a ser endereçado é até que ponto ou em que intensidade o mercado de táxis tradicional precisa ser protegido por leis pelo governo.

Um ponto bastante estressado nos estudos de V.A. é a questão da confiabilidade e da segurança. A essencialidade desse debate fica, sem dúvida, determinada pelo recente acidente ocorrido na cidade de Arizona, nos Estados Unidos, quando um veículo autônomo do Uber em teste atropelou e matou uma pedestre. O veículo estava circulando a 64 km/h em um área de velocidade máxima de 56 km/h e, segundo autoridades, não há sinais de que o veículo tentou frear para evitar a colisão (GLOBO, 2018).

No caso supracitado, havia um condutor ao volante para retomar o controle, caso necessário. Porém, através das filmagens do acidente, pode-se perceber que o mesmo estava concentrado em outra atividade e não notou a presença da pessoa à frente do carro.

Nesse campo, Jamson (2013) investiga o impacto causado quando passageiros se engajam em atividades em segundo plano à direção quando estão se deslocando em um V.A. O autor entende que a execução de outras tarefas pode resultar em ocupantes desatentos e, conseqüentemente, com reflexos mais baixos.

Ainda, Takeda (2016), demonstra, em um estudo eletrofísico, que o ocupante do veículo autônomo apresenta o mesmo nível de engajamento de um passageiro em um veículo tradicional. O seu cérebro permanece em estado de relaxamento, e não de atenção. Portanto, caso o motorista precise reaver o controle do veículo em caso de emergência, em níveis de automação intermediários, há maiores risco acidentes.

Indo além, Schellekens (2015) examina os perigos do uso dos V.A. e indica como as possíveis causas negativas podem ser endereçadas por um sistema de seguro obrigatório.

Ademais, mesmo que superados todos os desafios citados anteriormente, há que se considerar que os veículos autônomos irão passar pelo crivo de aceitação (ou rejeição) do público. Os autores Bansal *et al.* (2016), Diels *et al.* (2016) e Krueger *et al.* (2016) descrevem os principais benefícios do V.A., do ponto de vista do usuário, e o quanto eles estariam dispostos a pagar por essas vantagens.

Bansal *et al.* (2016) realizou uma complexa pesquisa onde ele acessa a opinião de potenciais usuários de Austin, nos Estados Unidos. Na pesquisa, o autor faz questionamentos para entender qual o grau de conhecimento dos entrevistados sobre a nova tecnologia e qual o preço que estariam dispostos a pagar por ela.

Como resultado, conclui que a maior preocupação do público é quanto à falhas e o maior benefício identificado é a diminuição de batidas. Além disso, estariam dispostos a pagar U\$7.253 pela a adaptação do seu veículo atual ao nível de automação 4 e U\$3.300 pelo nível 3.

Além de opinar, como um não-usuário, sobre a aceitação ou não do uso da tecnologia, o público também terá de ser convencido, como usuários, de que a experiência de ser passageiro em um veículo autônomo é boa. Diels *et al.* (2016), por exemplo, fala que o desconforto por conta das taxas de aceleração e desaceleração, e o modo como o veículo se move, principalmente em curvas, pode afetar negativamente a aceitação do público.

3 CAPACIDADE DAS VIAS

Neste capítulo serão introduzidos alguns conceitos e definições sobre capacidade e interseções. Do mesmo modo, o manual para cálculo de capacidade usado neste trabalho é apresentado e é feita a ligação entre ele e veículos autônomos.

3.1 DEFINIÇÕES E CONCEITOS

No Código de Trânsito Brasileiro (BRASIL, 1997) constam algumas definições importantes para o escopo deste trabalho. As mesmas serão apresentadas a seguir.

- Interseção – “todo cruzamento em nível, entroncamento ou bifurcação, incluindo as áreas formadas por tais cruzamentos, entroncamentos ou bifurcações.” (BRASIL, 1997, anexo I).
- Vias – “São vias terrestres urbanas e rurais as ruas, as avenidas, os logradouros, [...], as estradas e as rodovias, que terão seu uso regulamentado pelo órgão ou entidade com circunscrição sobre elas, [...]” (BRASIL, 1997, art. 2º).
- Trânsito – “Considera-se trânsito a utilização das vias por pessoas, veículos e animais, [...] para fins de circulação, parada, estacionamento e operação de carga ou descarga.” (BRASIL, 1997, art 1º).
- Sinalização semafórica – “[...] é um subsistema da sinalização viária que se compõe de indicações luminosas acionadas alternada ou intermitentemente [...], cuja função é controlar deslocamentos.” (BRASIL, 1997, anexo I).

Por outro lado, o HCM (2010) define capacidade de uma rodovia como “a máxima taxa de fluxo horária sob a qual veículos conseguem passar por um dado ponto durante um certo período, sob condições usuais de tráfego e da via”.

Este trabalho estudará o trânsito em interseções em nível, em vias urbanas, que possuem sinalização semafórica de regulamentação. A partir desse estudo serão feitas conclusões acerca da capacidade das vias.

3.2 INTERSEÇÃO: PONTO CRÍTICO DO TRÁFEGO

O congestionamento, provocado pelo excesso de veículos em relação à capacidade das vias, manifesta as suas consequências notadamente nas interseções, considerando que as mesmas são os pontos mais vulneráveis das vias (PAPAGEORGIOU, 1999). Isso porque é nas interseções que há maior interação entre todos os agentes do trânsito, quais sejam, pedestres, motoristas e ciclistas. Apesar dos grandes esforços de pesquisa sobre gerenciamento de tráfego, o problema do congestionamento em interseções urbanas continua sendo um problema em aberto.

Nas interseções também é onde se intensificam os riscos de acidentes. As estatísticas mostram que cerca de 40% dos acidentes de trânsito ocorrem nos cruzamentos e 21,5% das mortes no trânsito estão relacionadas à interseção (FARS, 2018).

Como consequência, controlar o funcionamento das interseções com semáforos é a solução mais comum para tornar possível o uso das mesmas por motoristas humanos e transeuntes. Os semáforos, então, são necessários por que as habilidades das pessoas de processarem informações e executarem ações são insuficientes para proporcionar eficiência e segurança nos cruzamentos (ZHENG, 2017).

Portanto, a interseção é um nó importante no planejamento de uma rede de tráfego. Atuar na melhoria do desempenho das interseções é o modo mais efetivo de aperfeiçoar o tráfego como um todo.

3.3 O HCM E O QUE ELE FALA SOBRE CAPACIDADE DE INTERSEÇÃO

O *Highway Capacity Manual* vem sendo construído por mais de 60 anos. A primeira edição do manual foi publicada em 1950, decorrente de uma parceria (*joint venture*) entre *Highway Research Board's Committee on Highway Capacity* e o *Bureau of Public Roads*. O manual abordou fundamentos iniciais sobre capacidade e apresentou a definição de termos chave da área (HCM, 2010).

Com o passar dos anos, o HCM foi aperfeiçoado e teve seu escopo ampliado para abordar temas pertinentes a cada época de publicação. A edição de 2010 do manual é resultado de uma força tarefa norte americana – através do *TRB Highway Capacity and Quality of Service Committee* - que se dedicou a analisar resultados de pesquisas de mobilidade que, somadas, representam um investimento de mais de cinco milhões de dólares (HCM, 2010).

Tal edição, que está sob a responsabilidade do *Transportation Research Board*, apresenta diretrizes para análises com abordagem de integração multimodal, discute aplicação de microssimulação nas análises e também o gerenciamento ativo de tráfego em relação à demanda e à capacidade, além de trazer exemplos de aplicação dos procedimentos (HCM, 2010).

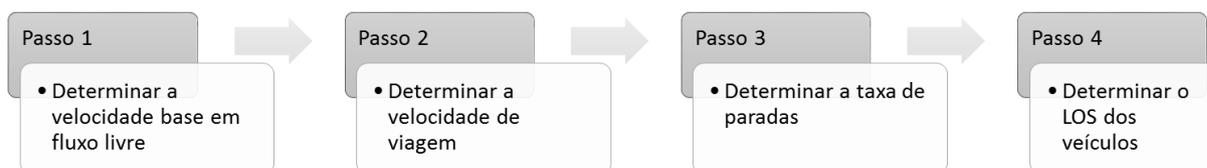
Um aspecto interessante do HCM é que ele leva em consideração a visão do usuário. As análises do manual são baseadas no ponto de vista dos motoristas, passageiros dos transporte público, ciclistas e pedestres. Portanto, quando se fala em nível de serviço ofertado pela via, refere-se à percepção do usuário quanto a sua experiência naquela via. Outro ponto relevante é que este é o primeiro manual a levar em consideração os efeitos dos carros nos ciclistas e pedestres (HCM, 2010).

No documento, são oferecidas ferramentas para análise em três diferentes níveis, quais sejam: nível operacional, nível de desenho e de planejamento e engenharia preliminar. Os níveis se distinguem pela quantidade de detalhes necessários para a realização dos cálculos (HCM, 2010). O presente trabalho irá explorar o nível de análise de planejamento.

O manual se subdivide em 4 volumes, sendo que o primeiro é o guia do usuário, que aborda conceitos necessários para a compreensão dos outros volumes e para aplicar os ensinamentos na prática, além de apresentar possíveis aplicações do HCM. O segundo volume contém informações sobre metodologias de cálculos de parâmetros relativos ao fluxo ininterrupto observado em *highways* e *freeways*.

O terceiro volume é o utilizado neste trabalho. Ele foca no fluxo interrompido na infraestrutura urbana. Para tal, explora a análise de capacidade e qualidade de serviço oferecidos por segmentos de rua, interseções - com e sem semáforos - e rotatórias. Nesse capítulo também é estudada a infraestrutura urbana para pedestres e ciclistas. O quarto volume, disponível online, é um guia de aplicação que se dedica a trazer diversos exemplos de aplicações práticas e disseminar boas práticas de utilização do manual.

O HCM é um guia amplamente utilizado e notoriamente validado para calcular parâmetros de tráfego. O mesmo apresenta, com enfoque bastante prático, uma sequência de etapas de cálculo para avaliar a capacidade e qualidade do serviço proporcionado aos usuários (Figura 2). Ainda, mais do que isso, fornece um leque de medidas de desempenho para que se estude a operação de interseções para diferentes modos de viagem.

Figura 2 - Passo-a-passo para determinação de medidas de desempenho - visão geral

Fonte: A autora, 2018

O foco desta pesquisa recaiu sobre a metodologia usada para o cálculo do desempenho das infraestruturas urbanas com interseções semaforizadas, para o modo automotivo. Tal metodologia considera as medidas de razão volume/capacidade, atrasos e filas. Baseando-se em uma ou mais das medidas mencionadas, é possível obter-se um valor para o *Level of Service* (LOS), ou Nível de Serviço de tais vias (HCM, 2010). A Figura 3 sintetiza a sequência de cálculos necessários para estimar o LOS.

Figura 3 - Etapas para o cálculo do LOS

Fonte: A autora, 2018

Nesse manual, os níveis de serviço são classificados, em seis categorias, de acordo com o ponto de vista do motorista e sua aceitabilidade quanto aos níveis de demora no trânsito. Os tempos perdidos e os LOS (*Level of Service*) correspondentes podem ser verificados na Tabela 3.

Tabela 3 - Níveis de LOS

Razão volume-capacidade	LOS	
	≤1	>1
<i>Control Delay</i> (segundos/veículos)		
≤ 10	A	F
> 10 – 20	B	F
> 20 -35	C	F
> 35 – 55	D	F
> 55 – 80	E	F
> 80	F	F

Fonte: HCM, 2010

Por sua vez, o *Delay*, ou atraso, representa o aumento no tempo de viagem devido ao semáforo, o desconforto do usuário e o consumo de combustível. Já a razão volume-capacidade representa o grau com que a capacidade da fase é utilizada pelo grupo de faixas.

O *Control delay*, sozinho, é usado para definir o LOS para toda a interseção. Por outro lado, o *Control delay* e a razão volume-capacidade, em conjunto, são usadas para definir o LOS para um grupo de faixas.

Apesar de ser um manual amplamente utilizado no Brasil, Setti (2009) enfatiza a necessidade de se adaptar a metodologia do HCM para a realidade brasileira para que se consiga garantir confiabilidade às estimativas. Para isso, Setti defende que devem ser definidos os seguintes aspectos:

- (1) qual a capacidade básica para trechos de rodovias brasileiras com condições ideais;
- (2) quais as medidas de desempenho que melhor expressam a relação entre a qualidade de serviço e as condições operacionais das rodovias;
- (3) quais as relações entre a qualidade de serviço e as condições operacionais para trechos de rodovias com condições ideais e não ideais;
- e (4) qual o efeito dos caminhões brasileiros sobre a capacidade e a qualidade de serviço (SETTI, 2009).

3.4 CAPACIDADE DA VIA E VEÍCULO AUTÔNOMO

O V.A. pode interferir na capacidade da via de diversas maneiras, positivas e negativas. Por exemplo, caso haja uma proporção de veículos tradicionais muito maior do que a de V.A., ou, a depender do nível de familiaridade da população com a tecnologia, pode-se ocasionar uma diminuição na capacidade da via. Isto porque é possível que motoristas humanos passem a dirigir com mais cautela por estarem na presença de um objeto desconhecido.

Por outro lado, a capacidade do veículo autônomo de manter sua velocidade e aceleração constantes, trafegar formando pelotões de deslocamento, posicionar-se a uma distância pequena dos outros veículos e se comunicar com a infraestrutura ou mesmo com os outros usuários da via faz com que ele consiga otimizar o uso da via e dos semáforos. Esse feito ocasiona um efeito positivo na capacidade, já que o fluxo de saturação será aumentado.

Ainda sobre eficiência do sistema, agora mais especificamente sobre capacidade das vias, SHLADOVER *et al.* (2012) realizaram estudo, utilizando microssimulação, sobre os possíveis ganhos de capacidade advindos do uso das tecnologias de *adaptive cruise control*

(ACC) e *cooperative adaptive cruise control* (CACC), de acordo com a taxa de penetração no mercado de veículos possuindo tais tecnologias. Os autores chegaram à conclusão de que é improvável que o uso de ACC traga alguma mudança positiva na capacidade das faixas, independentemente do nível de penetração no mercado.

Entretanto, quando considerado o cenário com uma combinação de veículos guiados manualmente e aqueles que utilizam CACC, obteve-se resultados mais animadores. Estima-se que a capacidade da via irá aumentar seguindo uma distribuição com forma quadrática em relação ao nível de penetração no mercado. Shladover *et al.* (2012) estimam que, em taxas de implantação de 10%, 50%, e 90% de CACC, a capacidade efetiva das faixas irá aumentar em 1%, 21% e 80%, respectivamente.

Os autores ainda apontam uma forma simples e barata de elevar a performance dos sistemas cooperativos, em baixos percentuais de penetração de mercado, que está sendo proposta pelo *U.S. Department of Transportation's Connected Vehicles Initiative*. Tal solução seria equipar o maior número de veículos possível com dispositivos de conscientização de veículo (em tradução literal para *vehicle awareness device* - VAD). Esse equipamento possibilitaria que um veículo equipado com VAD fosse o líder para o veículo CACC, tornando factível manter-se um pequeno distanciamento entre os dois (SHLADOVER *et al.*, 2012).

Outro ponto sobre o volume de veículos é que o V.A. é entendido como um vetor para a mudança de hábitos de deslocamento e posse de veículos (SINGULARITY, 2018). Ele pode estimular adesão ao transporte público de massa por facilitar o acesso aos pontos de ônibus, trem ou metrô, atuando como um alimentador da rede (UITP, 2017). Do mesmo modo, pode desestimular a posse pelo alto nível de confiabilidade e alta disponibilidade que é capaz de proporcionar (KRUEGER, 2016).

Listada a relação entre capacidade e direção autônoma, é importante que se tenha clareza de como a experiência de navegação em um V.A. é diferente da de um veículo tradicional. O passageiro que não está engajado na direção tende a ficar mais sensível aos níveis de aceleração e desaceleração. Esse fato pode fazer com que as configurações dos parâmetros dos V.A. sejam programadas níveis não otimizados, fazendo com que o veículo seja menos eficiente do que o esperado e não cause a diminuição prevista no *headway*.

Dito isto, quando do planejamento e dimensionamento de uma interseção e cálculo de capacidade da via, é importante que se alinhe as expectativas entre o aumento de capacidade que se imagina obter com a utilização dos V.A. e os reais níveis que se podem alcançar.

Para o cálculo da capacidade de uma interseção, o HCM se utiliza de variáveis de três grupos, quais sejam: características de tráfego, desenho da via, configurações do semáforo. A exceção das variáveis de desenho da via, o V.A. tem potencial para interferir em todos os outros fatores.

Nesse trabalho, o foco será mantido no tempo de atraso decorrente da interferência das interseções e semáforos. Dentro dessa esfera, escolheu-se trabalhar com as variáveis de *headway* e volume de veículos, ambas presentes na metodologia de cálculo usada pelo HCM para o tempo de atraso, ou *delay*.

De forma didática, e como exposto anteriormente, entende-se que o V.A. é capaz de afetar o *headway* por conta da sua previsibilidade. Ao diminuir o *headway*, é possível fazer com que mais veículos atravessem a interseção no tempo de verde, o que tem impacto direto no volume de carros que as ruas conseguem acolher.

4 METODOLOGIA

O presente estudo consiste em analisar os efeitos dos veículos autônomos nas vias urbanas. Para alcançar esse objetivo, seguiu-se uma metodologia com cinco etapas. Inicialmente, em uma primeira etapa mais teórica, foi realizada uma revisão da literatura acerca de assuntos essenciais para a compreensão do estudo realizado. Portanto, foram esquematizadas informações sobre o estado da arte de estudos acerca de veículos autônomos e métodos de cálculo de capacidade da via - mais especificamente, das interseções na literatura acadêmica nacional e internacional assim como em fontes não acadêmicas (e.g. sites de empresas, matéria em jornais e periódicos).

A segunda etapa centrou-se na elaboração de um modelo matemático para a compreensão do efeito do veículo autônomo nas interseções, utilizando-se a metodologia do *Highway Capacity Manual* (HCM). Tal modelo segue a equação de Webster para cálculo do *Control Delay*, composta por três termos, quais sejam: *uniform delay*, *incremental delay*, *initial queue delay*.

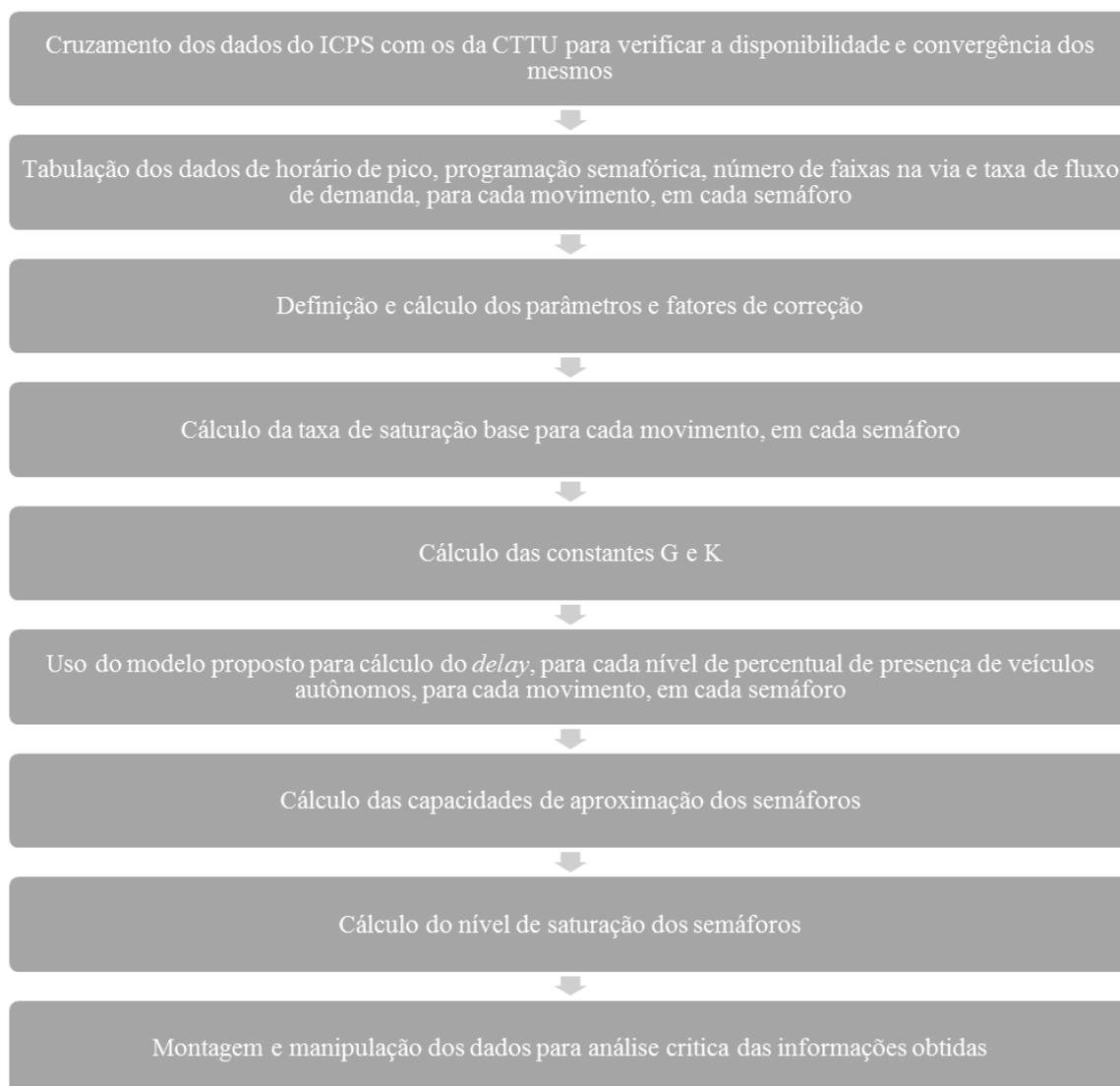
Esse trabalho irá se debruçar, especificamente, sobre o *uniform delay*, que quantifica o aumento no tempo médio de viagem, de todos os veículos que chegam no período observado, causado pelo semáforo da interseção. Serão feitas adaptações nas variáveis usadas para o cálculo do *uniform delay* a fim de incluir no cálculo o percentual de presença de V.A. na frota e o seu *headway*, que é diferenciado em relação àquele observado para os motoristas humanos. O modelo matemático está apresentado em detalhes no capítulo 5.

Na terceira etapa, foi feita uma análise dos possíveis impactos na eficiência de interseções, advindos da inserção de veículos autônomos nas vias, a partir da aplicação do modelo considerando dados de interseções da cidade do Recife, Brasil. O passo-a-passo dessa análise está descrito na Figura 4.

Na quarta etapa, de montagem e manipulação dos dados, os dados foram agrupados segundo três critérios: (1) Agrupamento de todos os dados de *delay*, sem distinção de características das vias ou níveis de saturação; (2) Agrupamento dos dados do *delay* segundo classificação da via, em vias principais e vias secundárias; (3) Agrupamento dos dados de *delay* segundo o nível de saturação do semáforo, em saturados e não saturados. Os dados de cada agrupamento foram então confrontados e analisados em busca de inferências.

Para tal, foram utilizados dados de programação semafórica da CTTU e de contagem de fluxo realizada em 2015 pelo Instituto Pelópidas Silveira (ICPS), ligado à Prefeitura do Recife e responsável por, dentre outros, a elaboração do Plano de Mobilidade da cidade (ICPSa, 2017).

Figura 4 – Passo-a-passo da análise dos impactos dos V.A. na eficiência de interseções localizadas na cidade do Recife, Brasil



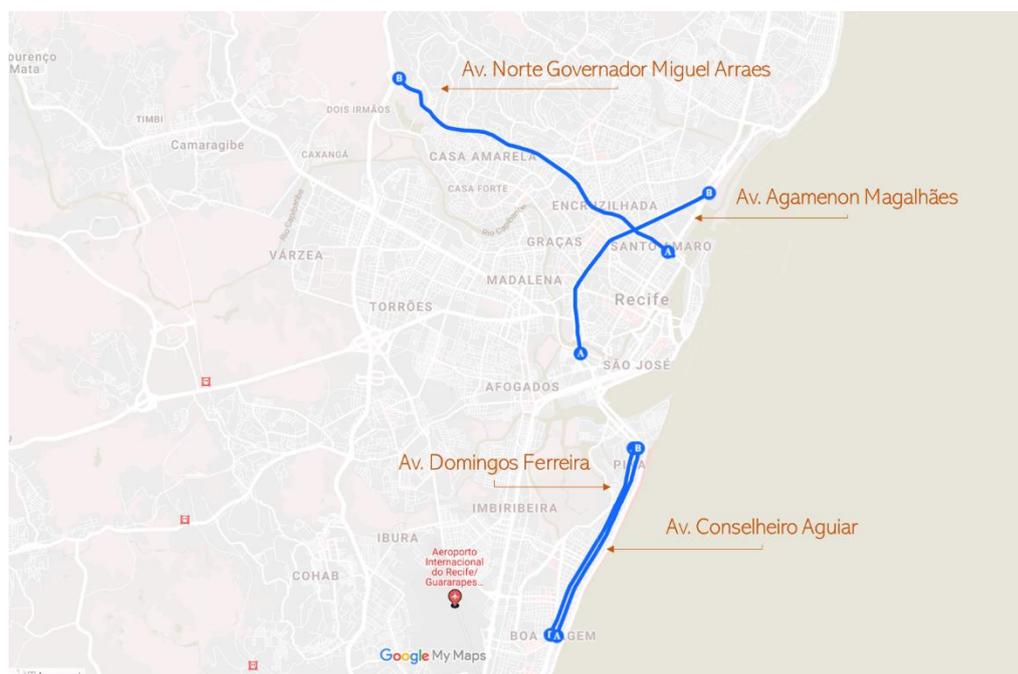
Fonte: A autora, 2018

Do documento de sistematização de dados do ICPS foram extraídas informações de demanda de 17 cruzamentos da cidade do Recife, os quais se situam em quatro importantes corredores arteriais da cidade: a Avenida Agamenon Magalhães, Avenida Norte Governador Miguel Arraes, Avenida Domingos Ferreira e Avenida Conselheiro Aguiar (Figura 5). Duas

delas ficam situadas na zona norte da cidade e as outras duas na zona sul, sendo que a Agamenon Magalhães é um dos principais corredores que fazem a ligação entre essas duas regiões.

Todas as avenidas são também importantes corredores de ônibus. As avenidas Domingos Ferreira e Conselheiro Aguiar, inclusive, possuem 6 e 5,2 quilômetros de faixa azul cada uma, implantadas em 2014 e 2016, respectivamente (CTTU, 2018). Já a avenida Agamenon tem projeto de implantação de faixa azul ainda para o ano de 2018 (JCa, 2018).

Figura 5 - Localização das vias estudadas



Fonte: Mapa criado com *Google Maps – My maps*, 2018

Os dados levantados foram aplicados no modelo proposto, em sete cenários com diferentes níveis de presença de veículos autônomos e respectivos *headways* médios alcançado pela frota, como descrito na Tabela 4.

Os cenários foram escolhidos de modo a representar o impacto dos V.A. no tempo de espera em cada semáforo. Os valores usados estão em concordância com o trabalho de Shi e Prevedouros (2016), onde estimam a mudança na capacidade de estradas quando existe a presença de veículos autônomos.

Segundo os autores (SHI; PREVEDOUROS, 2016), veículos autônomos leves são capazes de manter *headways* mais curtos, níveis de aceleração e desaceleração consistentes e otimizar o uso de lacunas no tráfego. Em sua pesquisa, então, comprovam a teoria de que a operação e o nível de serviço das auto-estradas podem ser afetados por V.A.

A fim de testar suas hipóteses e edificar seus argumentos, se utilizam do HCM e do modelo de car-following para simular cenários com diferentes *headways*. Então, através de cálculos balizados por definições do HCM, estabelecem a relação entre níveis de participação de V.A. na frota e *headways* médios alcançados na via. Tal relação será usada nesta dissertação e os valores dos *headways* correspondentes para cada cenário de presença de V.A. estão descritos na tabela 4.

Tabela 4 – Cenários - % de V.A. versus *Headway* médio da via

Cenário	% de V.A. na frota	<i>Headway</i> médio (s)
1	0%	1,5
2	0,1%	1,5
3	1%	1,49
4	5%	1,45
5	10%	1,4
6	50%	1
7	100%	0,5

Fonte: SHI; PREVEDOUROS, 2016

Em tempo, enfatiza-se que, para os cálculos, não foram contabilizados os giros à esquerda e à direita pois, em todas as interseções consideradas, o quantitativo de veículo fazendo esses movimentos não ultrapassou 10,5%.

Na quinta, e última, etapa os dados são analisados e os resultados apresentados.

5 MODELO MATEMÁTICO PARA ESTUDO DO COMPORTAMENTO DO TEMPO DE VIAGEM COM V.A. E APLICAÇÃO PRÁTICA

Nesse capítulo, será construído um modelo matemático para o estudo do comportamento do tempo de viagem, decorrente de fatores intrínsecos às características do tráfego e das vias. Mais especificamente, será feita uma adaptação do procedimento de cálculo do *uniform delay*, definido mais a frente, para que este consiga abranger as características de funcionamento dos veículos autônomos.

Posteriormente, o modelo mencionado será utilizado para que se desenvolva uma análise de cenários, nos quais serão variados os parâmetros de percentual de presença de veículos autônomos na frota e *headway* entre veículos. Para tal, serão utilizados dados de tráfego da cidade do Recife.

Esta pesquisa utiliza a metodologia aplicada pelo *Highway Capacity Manual* para estudar os parâmetros de tráfego relevantes.

5.1 MODELO PARA CÁLCULO DO TEMPO DE VIAGEM

Pretende-se analisar quantitativamente o modo como o V.A. irá interferir na capacidade de interseções. Para tal, será feito um estudo sobre a alteração nos tempos de demora ou tempos perdidos causada pelos veículos autônomos. A análise será feita considerando-se como base a metodologia de cálculo usada pelo HCM.

Para isso, na modelagem do comportamento do V.A. - e consequências decorrentes-, as variáveis de *headway* e percentual de veículos autônomos presentes na via serão variadas a diferentes valores na análise.

Como já exposto, o HCM trabalha com três níveis de análise. O presente trabalho irá explorar o nível de análise de planejamento, usando a edição de 2010 do manual.

O HCM calcula o nível de serviço a partir dos tempos perdidos, ou seja, do *Control Delay* (CD), em segundos por veículo. Por sua vez, para o cálculo do CD, o manual se baseia no modelo de Webster (Webster, 1966), composto por três termos, quais sejam: *uniform delay*, *incremental delay*, *initial queue delay*.

$$CD = d_1 + d_2 + d_3 \quad (1)$$

Onde,

$CD = \text{Control Delay};$

$d_1 = \text{uniform delay};$

$d_2 = \text{incremental delay};$

$d_3 = \text{initial queue delay}.$

O *uniform delay* quantifica o aumento no tempo médio de viagem, de todos os veículos que chegam no período observado, causado pelo semáforo da interseção. Também pode representar o desconforto do motorista e o consumo de combustível (HCM, vol. 3, pags. 18-5).

O *incremental delay* traz para o modelo a noção de atraso causado pelo efeito de flutuações aleatórias, ciclo a ciclo, na demanda que ocasionalmente excede a capacidade. Do mesmo modo, inclui no modelo um componente que considera a influência da saturação continuada da capacidade nos tempos perdidos. Já o *initial queue delay* considera o tempo adicional acrescentado em decorrência da presença inicial de fila (HCM, vol. 3, pags. 18-49 a 18-50).

Este trabalho irá analisar o primeiro termo da equação do modelo de Webster, o *uniform delay*, o qual apresenta fatores que podem ser afetados pelo V.A. O modo como tais fatores aparecem nas equações, e quais são eles, são informações que serão descritas em detalhes a seguir.

5.1.1 Detalhado a Equação do *Uniform Delay*

A equação a seguir é usada para o cálculo do *uniform delay*. Nela, é considerado que as chegadas de veículos no período e local analisados são aleatórias dentro do ciclo, assim como é assumido que existe apenas uma taxa de saturação de fluxo (HCM, vol. 3, pags. 18-46).

$$d_1 = \frac{0,5 \times C \times \left(\frac{1-g}{C}\right)^2}{1 - \left(\frac{\min[1, x] \times g}{C}\right)} \quad (2)$$

Onde,

$d_1 = \text{uniform delay};$

g = tempo de verde efetivo;

x = Razão volume-capacidade;

C = tempo de ciclo.

A razão entre volume e capacidade (x) quantifica o grau com que a capacidade de uma fase é utilizada por grupo de faixa. Tal razão, para um grupo de faixa, é definida pela relação entre o volume e a capacidade do grupo, como descrito na equação seguinte (HCM, vol. 3, pags. 18-46).

$$x = \frac{v}{c} \quad (3)$$

Onde,

x = Razão volume-capacidade;

v = taxa de fluxo de demanda (veículos/hora);

c = capacidade (veículos/hora);

Por outro lado, a capacidade pode ser calculada por:

$$c = \frac{s \times g}{C} \quad (4)$$

Onde,

c = capacidade (veículos/hora);

s = taxa de saturação do fluxo ajustada (veículos/hora/faixa);

g = tempo de verde efetivo (segundos);

C = tempo de ciclo(segundos).

Substituindo na equação da razão volume-capacidade, ficamos com:

$$x = \frac{v}{\frac{s \times g}{C}} \quad (5)$$

Essa equação será utilizada mais à frente para compor o modelo. A seguir, o termo de saturação do fluxo será estudado com mais profundidade pois é através dele que será introduzido um fator de correção que possibilitará a introdução do *headway* e do percentual de participação de veículos autônomos na frota.

5.1.2 Taxa de Saturação do Fluxo e Adaptações para Modelar V.A.

A taxa de saturação do fluxo é ajustada por diversos fatores, dentre os quais: características da via, do tráfego e tipo de veículos, como mostrado na equação 6.

Um fator que merece destaque é o fator de correção de veículos pesados. Ele ajusta a saturação do fluxo considerando o espaço adicional ocupado pelo veículo pesado e, aspecto que mais interessa a este trabalho, as diferenças na sua capacidade de operação quando comparados aos carros de passeio.

$$s = s_0 \times f_w \times f_{HV} \times f_g \times f_p \times f_{bb} \times f_a \times f_{LU} \times f_{LT} \times f_{RT} \times f_{Lpb} \times f_{Rpb} \quad (6)$$

Onde,

s = taxa de saturação do fluxo ajustada (veículos/hora/faixa);

s_0 = taxa de saturação do fluxo base (veículos/hora/faixa);

f_w = fator de ajuste para largura de faixa;

f_{HV} = fator de ajuste para veículos pesados;

f_g = fator de ajuste para grade de aproximação;

f_p = fator de ajuste para faixa de estacionamento existente e atividade de estacionamento adjacente ao grupo de faixa;

f_{bb} = fator de ajuste para o efeito de bloqueio de ônibus que param nos arredores da interseção;

f_a = fator de ajuste para tipo de região;

f_{LU} = fator de ajuste para utilização de faixa;

f_{LT} = fator de ajuste para presença de veículo fazendo conversão à esquerda em um grupo de faixa;

f_{RT} = fator de ajuste para presença de veículo fazendo conversão à direita em um grupo de faixa;

f_{Lpb} = fator de ajuste para presença de pedestres para grupos que fazem conversão para a esquerda;

f_{Rpb} = fator de ajuste para presença de pedestres e/ou ciclistas para grupos que fazem conversão para a direita.

É importante lembrar que esse procedimento de cálculo tem como limitação a aplicação apenas para grupos de faixas sem interação com pedestres ou ciclistas.

Através deste termo, ou seja, a taxa de saturação do fluxo, é possível inserir no modelo a noção de variação no *headway* incorrida pelo uso de V.A. Isto porque o fator de correção de tipo de veículos, presente na equação de s , pode ser adaptado para representar o comportamento de veículos autônomos no tráfego (SHI; PREVEDOUROS, 2016).

Então, com pequenas modificações, é possível que se modele uma importante característica do V.A., que é sua capacidade de manter menores *headways*, quando comparados com veículos tradicionais. Essa modificação é feita utilizando-se o fator de correção de veículos pesados. O raciocínio que leva a essa conclusão é apresentado a seguir.

A equação para o fator de correção de veículos pesados é mostrada na Equação 7.

$$f_{HV} = \frac{1}{1 + P_{HV}(E_t - 1)} \quad (7)$$

Onde,

f_{HV} = fator de correção de veículos pesados;

P_{HV} = percentagem de veículos pesados no respectivo grupo (%);

E_t = número de carros equivalentes para cada veículo pesado.

O elemento de carros equivalentes pode ser substituído por passageiros carros equivalentes, calculado através do *headway*. A partir dessa substituição, torna-se viável a representação da situação de diminuição de *headway* por conta dos V.A.

O fator de correção correspondente para veículos autônomos é apresentado na Equação 8.

$$f_{VA} = \frac{1}{1 + P_{VA} \left(\frac{h_{VA}}{\bar{h}} - 1 \right)} \quad (8)$$

Onde,

f_{VA} = fator de correção de veículos autônomos;

P_{VA} = percentagem de veículos autônomos no respectivo grupo (%);

h_{VA} = *headway* do veículo autônomo (segundos);

\bar{h} = *headway* médio (segundos).

Os percentuais de participação de veículos autônomos e veículos guiados por humanos, ou seja, a cota de cada um desses tipos de veículos na frota analisada, será adicionada ao modelo na própria fórmula do fator de correção, através do termo P_{VA} . Assim, é possível inserir a ideia de nível de penetração dos V.A. no mercado, defendida aqui como um dos fatores importantes a ser considerado quando se calcula capacidade.

Para a determinação dos percentuais e dos respectivos *headways*, seguiu-se o trabalho de Shi e Prevedouros (2016). O autor constrói uma relação entre as taxas de penetração da tecnologia de V.A. no mercado e os níveis de *headways* possíveis de se alcançar à medida que a partilha da frota avança.

No trabalho citado, ele apresenta a relação que consta na Tabela 5. Ou seja, para um nível de penetração de 0% de veículos autônomos no mercado, o *headway* médio entre os veículos é de 1,5 segundos.

Já para um cenário onde 100% dos carros da frota são autônomos, o *headway* médio é de 0,5 segundos. A tabela é apresentada a seguir.

Tabela 5 - Percentuais e *Headways* dos veículos autônomos (Hva)

Pva (%)	Hva (segundos)
0,0%	1,5
0,1%	1,5
1,0%	1,49
5,0%	1,45
10,0%	1,4
50,0%	1
100,0%	0,5

Fonte: SHI, PREVEDOUROS, 2016

5.1.3 Construção do Modelo e Considerações

Um destaque a ser feito é que o *uniform delay* considera que o semáforo da interseção possui taxas de chegada e saída uniformes no vermelho e verde, respectivamente (STRONG, 2006).

Para fins de cálculo, serão considerados constantes: o tempo de verde efetivo, o tempo de ciclo, todos os fatores de correção - exceto o fator de correção para veículos autônomos -, a taxa de saturação do fluxo base e o *headway* médio.

É plausível que se faça essa consideração pois, na análise, será feita a comparação dos tempos perdidos para uma mesma interseção, variando-se os percentuais de presença de V.A. e o *headway* entre os veículos. Ou seja, as variáveis de tráfego irão mudar, mas a interseção será a mesma, então seus parâmetros permanecerão constantes.

Assim, relembando as equações e destacando em vermelho os termos mantidos constante, tem-se:

$$d_1 = \frac{0,5 \times c \times \left(\frac{1-g}{c}\right)^2}{1 - \left(\frac{\min[1, x] \times g}{c}\right)} \quad (9)$$

$$x = \frac{v}{\frac{s \times g}{c}} \quad (10)$$

$$s = f_{VA} \times s_0 \times f_w \times f_g \times f_p \times f_{bb} \times f_a \times f_{LU} \times f_{LT} \times f_{RT} \times f_{Lpb} \times f_{Rpb} \quad (11)$$

$$f_{VA} = \frac{1}{1 + P_{VA} \left(\frac{h_{VA}}{\hbar} - 1 \right)} \quad (12)$$

Inserindo a fórmula do fator de correção para veículos autônomos (Equação 12) na equação do *uniform delay* (Equação 9), obtêm-se uma expressão capaz de calcular o tempo perdido em função de, ambos, volume de carros na rua e *headway*. Então,

$$x = \frac{v}{\frac{(s_0 \times f_w \times f_{VA} \times f_g \times f_p \times f_{bb} \times f_a \times f_{LU} \times f_{LT} \times f_{RT} \times f_{Lpb} \times f_{Rpb}) \times g}{C}} \quad (13)$$

$$x = K \times \frac{v}{f_{VA}} \quad (13)$$

$$x = K \times \frac{v}{\left(\frac{1}{1 + P_{VA} \left(\frac{h_{VA}}{\hbar} - 1 \right)} \right)} \quad (13)$$

$$x = K \times v \times \left(1 + P_{VA} \left(\frac{h_{VA}}{\hbar} - 1 \right) \right) \quad (13)$$

De onde se conclui que, inserindo a Equação 13 na equação do *Uniform Delay* (Equação 9), fica-se com:

$$d_1 = \frac{0,5 \times C \times \left(\frac{1-g}{C} \right)^2}{1 - \left(\frac{\min[1, x] \times g}{C} \right)} \quad (14)$$

$$d_1 = \frac{0,5 \times G}{1 - \left\{ \min \left[1, \left(K \times v \times \left(1 + P_{VA} \left(\frac{h_{VA}}{\hbar} - 1 \right) \right) \right) \right] \times \frac{g}{C} \right\}} \quad (15)$$

Onde K e G são constantes.

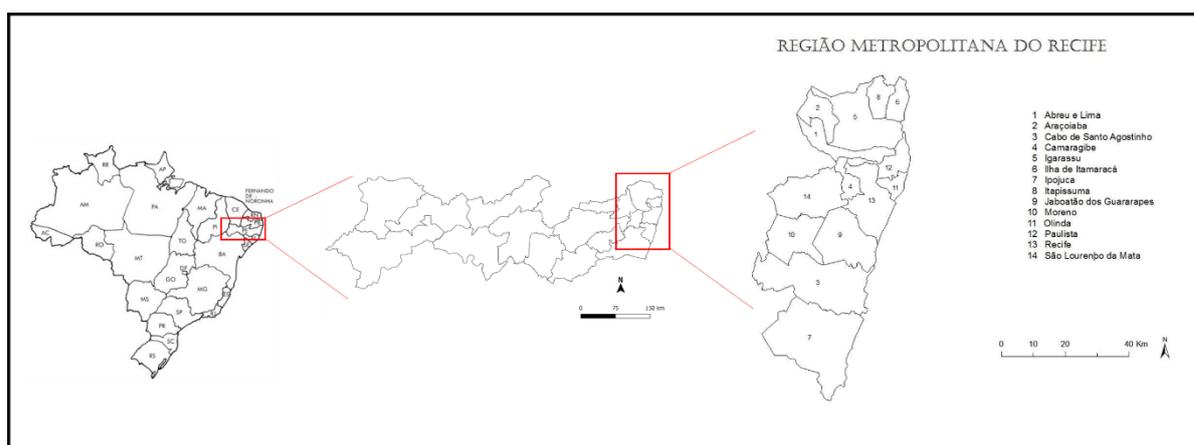
5.2 APLICAÇÃO DO MODELO MATEMÁTICO EM UMA SITUAÇÃO REAL

Nessa sessão, será realizada a aplicação da equação deduzida na sessão anterior em um cenário real, para interseções selecionadas em uma cidade no nordeste do Brasil. Para tal, serão utilizados dados reais de demanda de tráfego e temporização de semáforos. A seguir, será apresentada a região e interseções estudadas e os valores dos parâmetros adotados.

5.2.1 Região e Interseções

A cidade de Recife, capital de Pernambuco, no nordeste do Brasil, foi escolhida para a análise. A cidade possui população estimada de 1.633.697 habitantes (IBGEa, 2018) e sua região metropolitana, composta por quinze municípios, tem 4.044.948 habitantes (42,6% da população do estado) (IBGEb, 2018). Em 2010, a região metropolitana do Recife (RMR) era 97% urbanizada e apresentava índice de Desenvolvimento Humano Municipal (IDHM) de 0,734, valor que está dentro da faixa de alto desenvolvimento humano (IPEA, 2010).

Figura 6 - Mapa mostrando a localização da região estudada

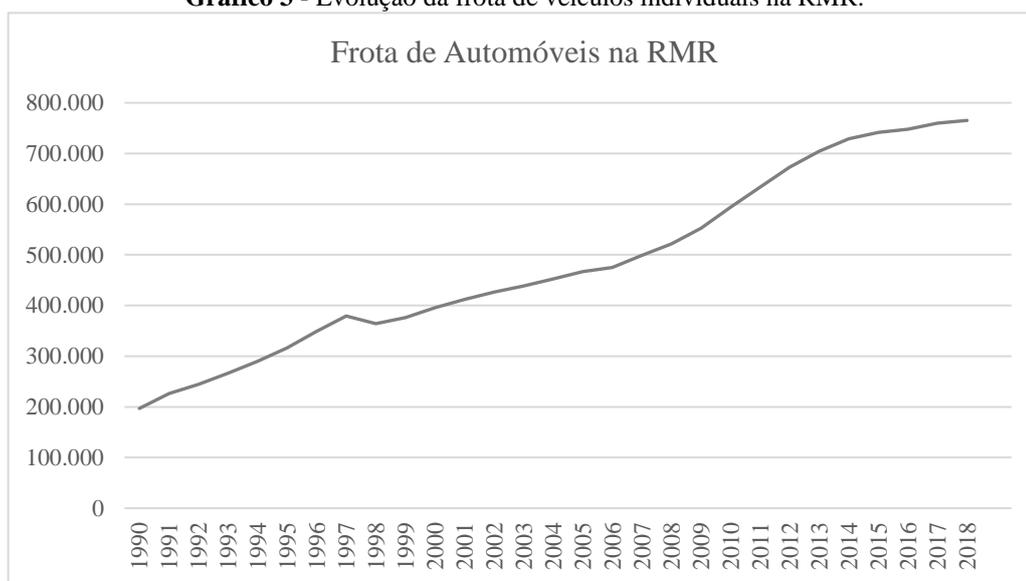


Fonte: <http://www.baixarmapas.com.br/mapa-do-brasil-estados-e-capitais/> e própria autora, 2018

A frota registrada de automóveis individuais da RMR é de 765.285 mil (DETRANa, 2018), sendo que só em 2018 foram registrados 24.373 mil emplacamentos de veículos novos no estado (DETRANb, 2018). O gráfico 3 mostra a evolução da frota de carros individuais na RMR, do ano 1990 até junho de 2018.

O trânsito em Recife, em horários de pico, foi considerado como oitavo pior do mundo em pesquisa feita pela empresa TomTom (JC, 2016). Na pesquisa, foi estimado que o motorista recifense gasta 41% a mais de tempo para percorrer um trajeto no horário de pico, quando comparado a horários sem congestionamento (das 22 horas às 5 horas).

Gráfico 3 - Evolução da frota de veículos individuais na RMR.



Fonte: DETRANa, 2018

O Recife possui um sistema de transporte público, o Sistema Estrutural Integrado (SEI) (Figura 7), inovador no Brasil. O mesmo integra a rede de transporte com ônibus e linhas sobre trilhos por terminais permitindo ao passageiro viajar dentro do sistema pagando apenas uma passagem. Apesar disso, a população local ainda tem hábitos de deslocamento que prioriza o modo de transporte por automóveis (OBSERVATÓRIO, 2018). Portanto, a dinâmica da cidade e seu desenvolvimento ainda é bastante focado em veículo individuais.

As interseções escolhidas para a aplicação do modelo ficam em vias arteriais da cidade e estão listadas abaixo.

- Avenida Agamenon Magalhães / Rua Odorico Mendes
- Avenida Norte / Avenida João de Barros
- Avenida Norte / Rua Cônego Barata
- Avenida Norte Miguel Arraes / Rua da Aurora
- Avenida Norte / Rua Nova Descoberta
- Avenida Norte / Rua Padre Lemos

- Avenida Norte / Rua Professor José dos Anjos
- Avenida Domingos Ferreira / Rua Pereira da Costa
- Avenida Domingos Ferreira / Rua Coronel Benedito Chaves
- Avenida Domingos Ferreira / Rua Barão de Souza Leão
- Avenida Domingos Ferreira / Ribeiro de Brito
- Avenida Domingos Ferreira / Ernesto de Paula Santos
- Avenida Domingos Ferreira / Rua Thomé Gibson
- Avenida Conselheiro Aguiar / Rua Pereira da Costa
- Avenida Conselheiro Aguiar / Rua Thomé Gibson
- Avenida Conselheiro Aguiar / Bernardino Pessoa
- Avenida Conselheiro Aguiar / Ernesto de Paula Santos

Figura 7 - Rede do Sistema Integrado de Transporte público de passageiros do Recife



Fonte: Grande Recife Consórcio de Transportes, fornecido pela CTTU, 2018

5.2.2 Obtenção de Dados

Os dados de programação semafórica e demanda de veículos nas interseções citadas foram obtidos da CTTU (2015) e do ICPS (ICPSa, 2017). As tabelas dos Apêndices A e B trazem os dados de maneira detalhada.

5.2.3 Definição de Parâmetros

Nas situações em que não existem valores padrão para as variáveis na localidade estudada, e quando cabível, ou seja, quando o uso de valores pré-definidos é razoável para a interseção em estudo, utilizou-se valores fornecidos pelo HCM.

É possível usar tais valores padrão pois, segundo o HCM (2010), variáveis especificadas tem efeito desprezível sobre as estimativas de performance. Por outro lado, as variáveis elencadas como de entrada, interferem de maneira notável nas estimativas ou possuem um grande range de valores possíveis. Essas últimas devem ser calculadas caso a caso, que é o que foi feito neste trabalho.

É importante salientar que o procedimento para o cálculo da Taxa de saturação do fluxo (s) e seus fatores de correção é aplicável para grupos de faixas exclusivas, operando sem a interação com pedestres ou ciclistas (HCM 3, pag. 18-35). Esse é o caso das interseções estudadas neste trabalho.

Os valores das variáveis e as justificativas de adoção são mostrados abaixo.

- Taxa de saturação do fluxo base (veículos/hora/faixa)

Para esse parâmetro, adotou-se o valor de 1.900 pc/h/faixa, pois se trata de uma área metropolitana com população superior a 250.000 habitantes.

- Fator de ajuste para largura de faixa

O manual considera a largura média da faixa como 12 pés, ou, aproximadamente, 3 metros. As vias estudadas atendem a essa especificação, então o fator de correção será de 1.

- Fator de ajuste para veículos pesados

O ajuste para veículos pesados será feito considerando o valor padrão estabelecido pelo HCM de 3% de veículos pesados no grupo de faixas. Assim, o fator de correção fica em 0,99.

- Fator de ajuste para grade de aproximação

A grade de aproximação de todas as vias estudadas é plana, portanto, o fator de correção será 1.

- Fator de ajuste para faixa de estacionamento existente e atividade de estacionamento adjacente ao grupo de faixa

Não existe estacionamento nas vias estudadas, portanto o fator de correção adotado foi 1.

- Fator de ajuste para o efeito de bloqueio de ônibus que param nos arredores da interseção;

O fator de ajuste para bloqueio de ônibus variou conforme o cruzamento, já que esse fator depende do fluxo de ônibus por hora e do número de faixas. Para as vias principais, foi considerado um fluxo de 250 ônibus por hora, e, nas vias secundárias, 125 ônibus por hora. Quando não há linhas de ônibus passando no grupo de faixas, o fator de correção é 1, ou seja, não há correção. No apêndice C o valor do fator para cada semáforo é apresentado na coluna f_{bb} .

- Fator de ajuste para tipo de região;

O HCM sugere que seja adotado o valor de 0,9 para esse fator de correção caso a área esteja sujeita um desenho, níveis de tráfego e fluxo de pedestres que causam o aumento do *headway*. Como nas interseções estudadas, nos horários de pico, a demanda estava próxima ou superava a capacidade de aproximação do semáforo, o valor de 0,9 foi adotado.

- Fator de ajuste para utilização de faixa;

Como a análise está sendo feita no horário de pico e a demanda, em todos os casos, ou está se aproximando ou excede a capacidade da via, o fator de correção adotado será de 1, como aconselhado pelo HCM. Isto porque, com o alto volume de veículo, as faixas são usadas de maneira mais uniforme.

- Fator de ajuste para presença de veículo fazendo conversão à esquerda e à direita em um grupo de faixa;

As conversões à esquerda e à direita foram desconsideradas, quando ocorrem, porque representam, no máximo, 10,5% de todo o fluxo em cada movimento estudado. Portanto, o fator de ajuste é 1.

- Fator de ajuste para presença de pedestres e/ou ciclistas para grupos que fazem conversão para a esquerda ou para a direita;

Para efeitos de cálculo, a presença de pedestres foi considerada inexistente. Portanto, o fator de correção adotado foi de 1.

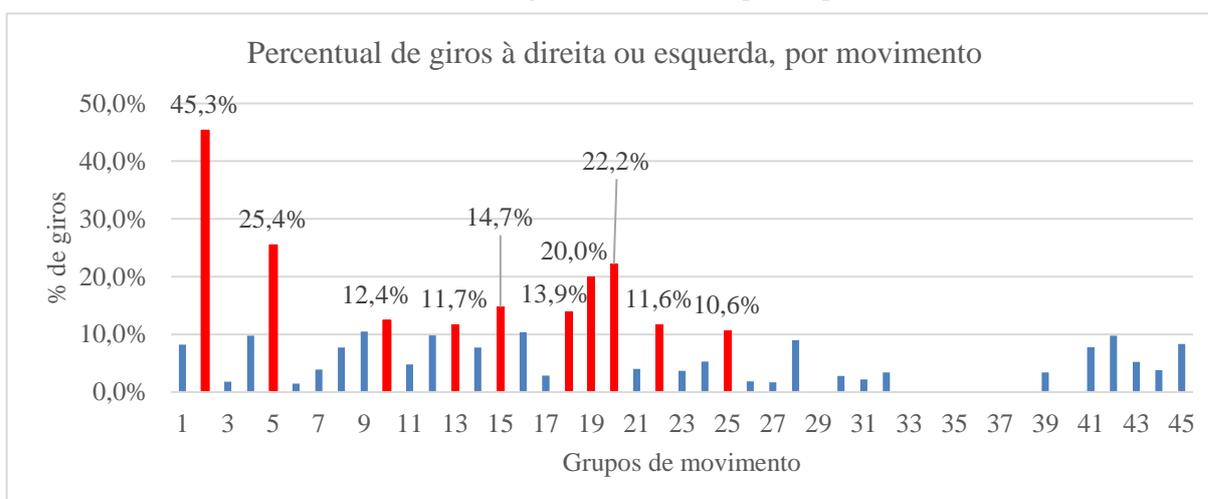
6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nas sessões seguintes serão demonstrados os resultados obtidos com a aplicação do modelo ao caso de interseções localizadas na cidade do Recife, Brasil, assim como serão expostas análises críticas sobre os dados gerados.

6.1 RESULTADOS OBTIDOS

Sobre a aplicação prática do modelo, inicialmente, foram analisadas 21 interseções, o que representava 45 movimentos. Entretanto, em alguns casos, os valores verificados não atendiam ao limite de 10,5% de giros à esquerda ou à direita. Por esse motivo, 10 grupos de movimento foram retirados do estudo. Além disso, 1 grupo de movimento foi considerado *outlier* e, portanto, foi desconsiderado dos cálculos. Assim, ficou-se com 17 interseções, o que resulta em um total de 34 grupos de movimentos.

Gráfico 4 - Percentual de giros à direita ou esquerda, por movimento



Fonte: A autora, 2018

Para o estudo dos dados obtidos, foram seguidas as etapas citadas na seção de metodologia, como ilustrado na Figura 4. A seguir serão explorados os resultados obtidos na última etapa, qual seja, montagem e manipulação dos dados para análise crítica das informações obtidas, para cada um dos três agrupamentos considerados, quais sejam: (1) Agrupamento de todos os dados de *delay*, sem distinção de características das vias ou níveis de saturação; (2) Agrupamento dos dados do *delay* segundo classificação da via, em vias principais e vias

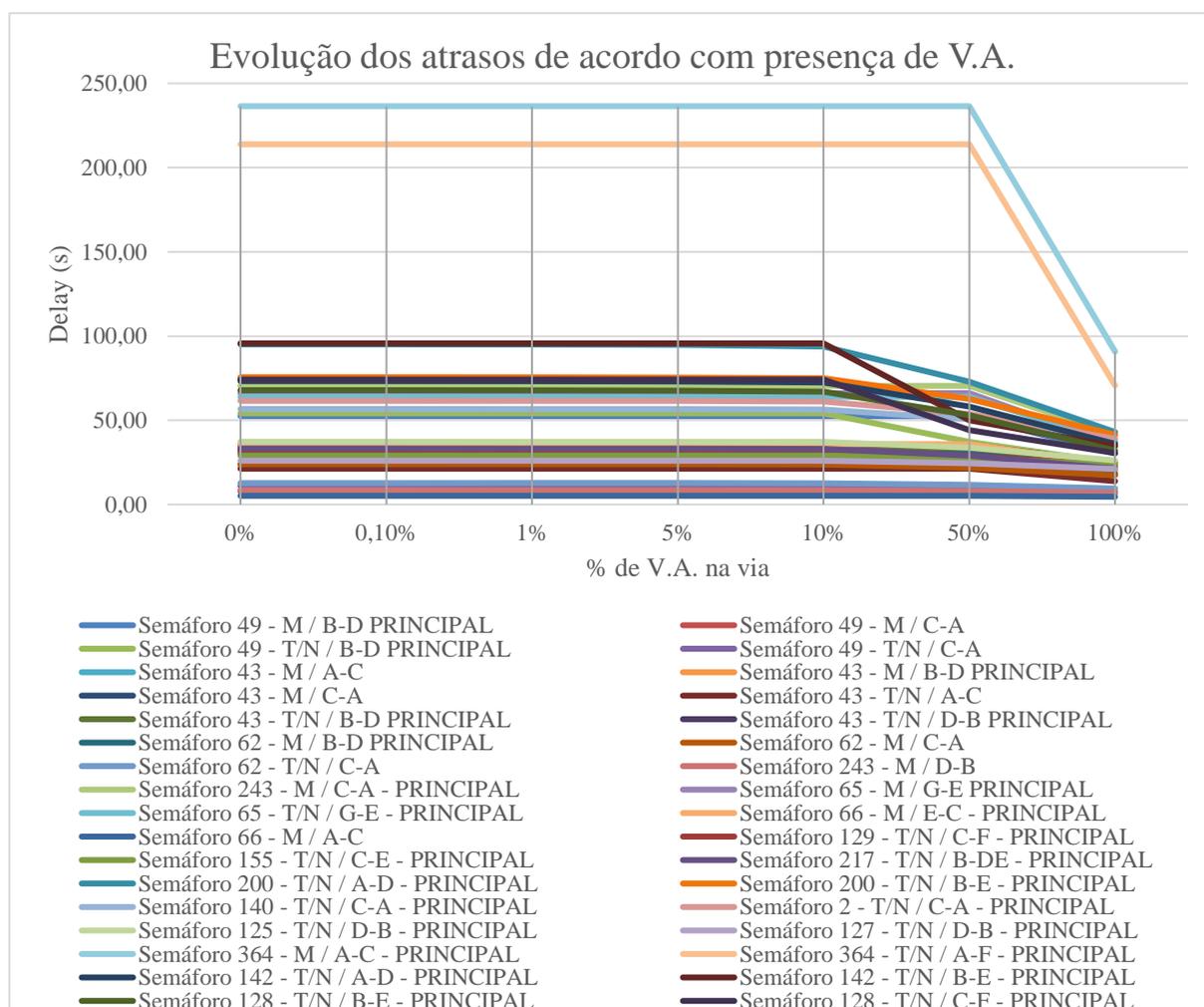
secundárias; (3) Agrupamento dos dados de *delay* segundo o nível de saturação do semáforo, em saturados e não saturados.

6.1.1 Análise do Agrupamento de Todos os Dados de *Delay*, sem Distinção de Características das Vias ou Níveis de Saturação

A partir da aplicação do modelo proposto neste trabalho ao caso das vias estudadas em Recife, pôde-se notar que os tempos de atraso (ou *delay*) são afetados pela presença do veículo autônomo em todos os semáforos.

Entretanto, quando se analisa para qual percentual de V.A. isso acontece, observa-se que há diminuição significativa no *headway* apenas quando há, no mínimo, 50% de V.A. na frota que circula na via. O Gráfico 5 mostra a evolução dos atrasos de acordo com a taxa de presença de V.A. na frota, para todos os semáforos e vias.

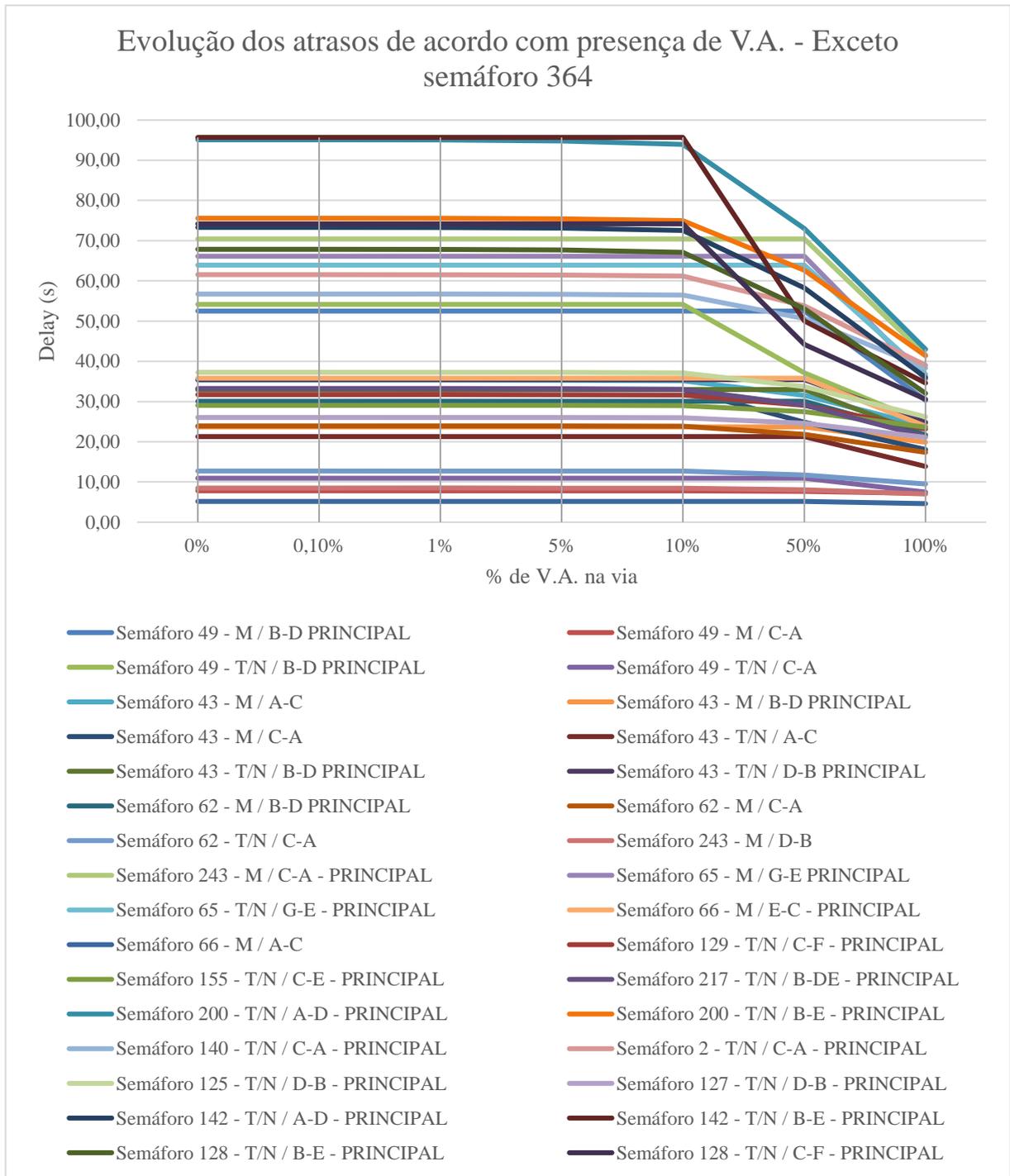
Gráfico 5 - Evolução dos atrasos de acordo com presença de V.A. – todas as vias



Fonte: A autora, 2018

Um gráfico de todas as vias, sem o semáforo 364, é mostrado a seguir (Gráfico 6), apenas para que se possa observar melhor o comportamento dos demais semáforos, já que, no Gráfico 5 o comportamento das séries dos demais semáforos não ficou visível.

Gráfico 6 - Evolução dos atrasos de acordo com presença de V.A. - Exceto semáforo 364



Fonte: A autora, 2018

Em média, do cenário 1 para o 2; do 2 para o 3; do 3 para o 4 e do 4 para o 5 não houve diminuição do *delay*. Do cenário 5 para o 6 houve diminuição de 10,6%, em média, nos tempos de atraso, e, do cenário 6 para o 7, 36,5%, em média. Já do cenário 1 (0% de V.A.) para o cenário 7 (100% de V.A.), o *delay* foi reduzido em 47,5%.

A maior diminuição absoluta nos tempos foi observada par o semáforo 364, no movimento A - C, onde se observou uma queda de 145,62 segundos, representando diminuição de 62%, saindo-se de um tempo de atraso de 236,45 segundos, no cenário sem V.A.s, para 90,84 segundos, no cenário com 100% de V.A.

A maior diminuição relativa também foi no semáforo 364, mas no movimento A – F, onde foi observada uma diminuição de 67% entre o cenário 1 e o 7, um total de 143,13 segundos.

Por outro lado, a menor diminuição absoluta ocorreu no semáforo 66, no pico da manhã, para o grupo de movimento A – C, onde obteve-se apenas 0,55 segundos a menos nos tempos de atraso com a substituição de todos os veículos tradicionais por V.A. A menor diminuição relativa também foi neste semáforo e assumiu o valor de 10,6%.

No total, a substituição de todo os veículos tradicionais por V.A. (cenário 7) resultou em uma economia de 869,78 segundos no tempo de deslocamento nos 17 cruzamentos estudados.

6.1.2 Análise do Agrupamento dos Dados do *Delay* Segundo Classificação da Via, em Vias Principais e Vias Secundárias

Quando as vias principais e secundárias são consideradas separadamente, fica-se com uma amostra de 25 vias principais (73%) e 9 vias secundárias (27%).

Quando se compara o impacto do V.A. nas vias secundárias, separadamente, observa-se que, o *delay* começa a diminuir, significativamente, quando a frota é composta por 50% de V.A. Nesse ponto, dos 9 grupos de movimentos em vias secundárias analisados, 6 (66,6%) apresentam diminuição do *delay* na situação descrita, com média de 9%.

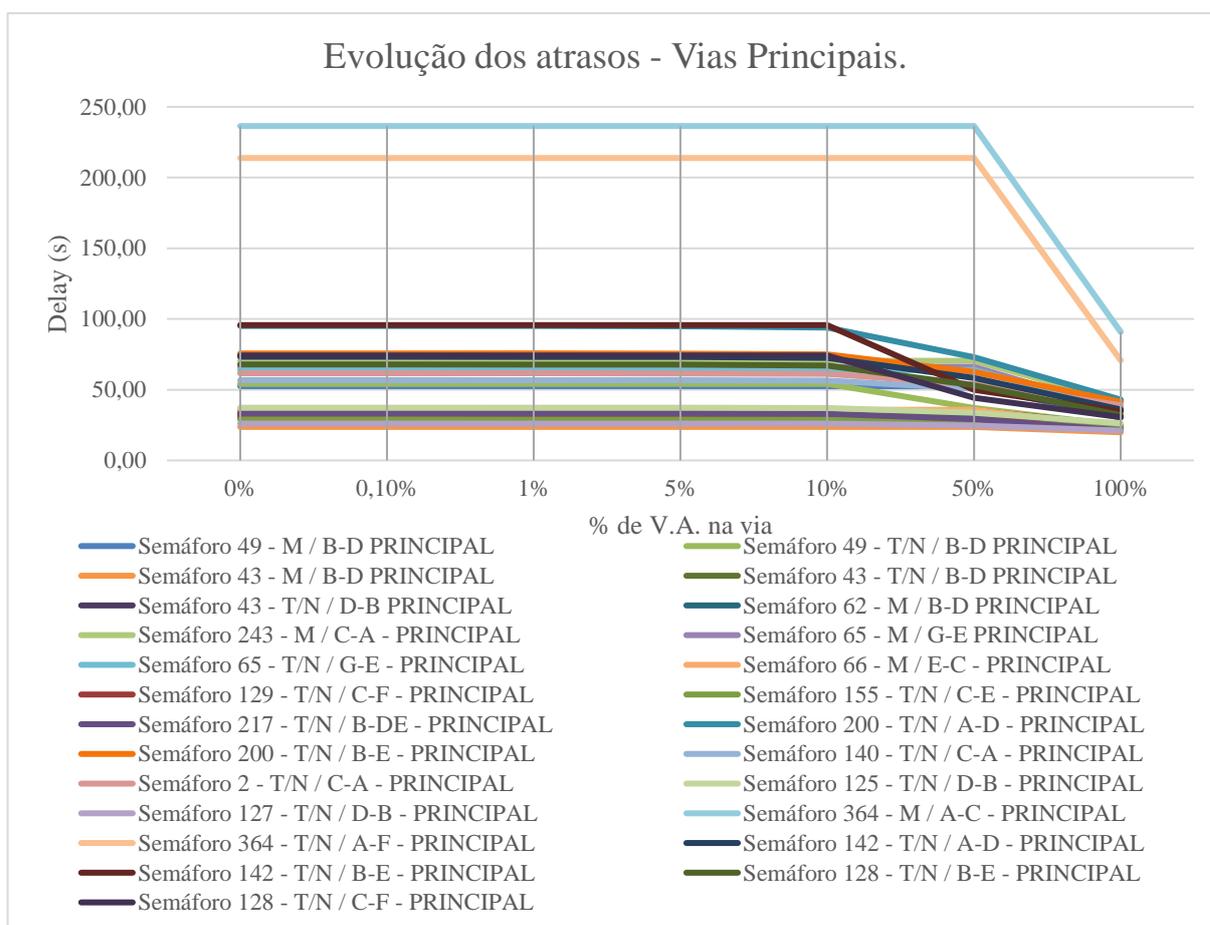
Apenas quando se atinge o patamar do cenário 7, ou seja, quando só se tem veículos autônomos na via, é que todos os semáforos apresentam diminuição nos tempos de atraso. Nesse caso a média relativa de diminuição fica em 20,8%, quando se compara os tempos do cenário 7 com aqueles do cenário 1.

Para as vias secundárias, o menor percentual de redução total do *delay*, ou seja, do cenário onde não haviam V.A. para o cenário com 100% de V.A., foi de 10,6% (de 5,17 para

4,62 segundos; total de 0,55 segundos de redução) e o maior foi de 45,2% (de 32,98 para 18,07 segundos; total de 14,91 segundos).

Em contraposição, se observadas as vias principais, em 50% de presença de V.A., a diminuição do *delay* aconteceu para 14 (58,3%) dos 24 grupos de movimentos e assumiu valor médio de 18,6%. Para a frota com 100% de V.A., em 24 dos 24 grupos de movimento houve diminuição no *delay*, com uma média de 49% de redução.

Gráfico 7 - Evolução dos atrasos - Vias principais



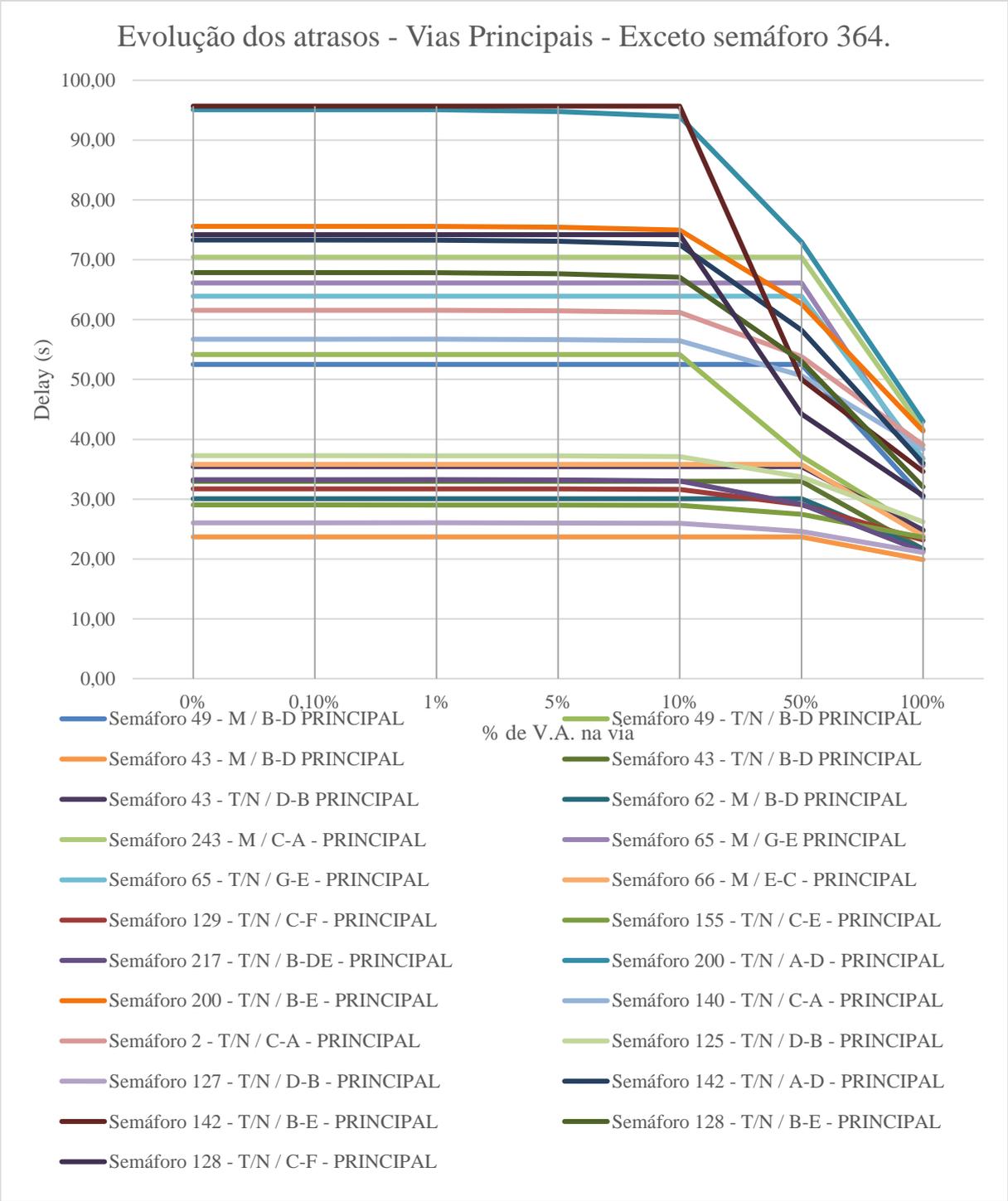
Fonte: A autora, 2018

Para as vias principais, a menor redução total de *delay* foi de 16% (de 23,69 segundos para 19,89 segundos, total de 3,8 segundos de diminuição) e a maior foi de 66,9% (de 213,84 para 70,71 segundos, total de 143,13 segundos). Os valores descritos até aqui são mostrados no Gráfico 7.

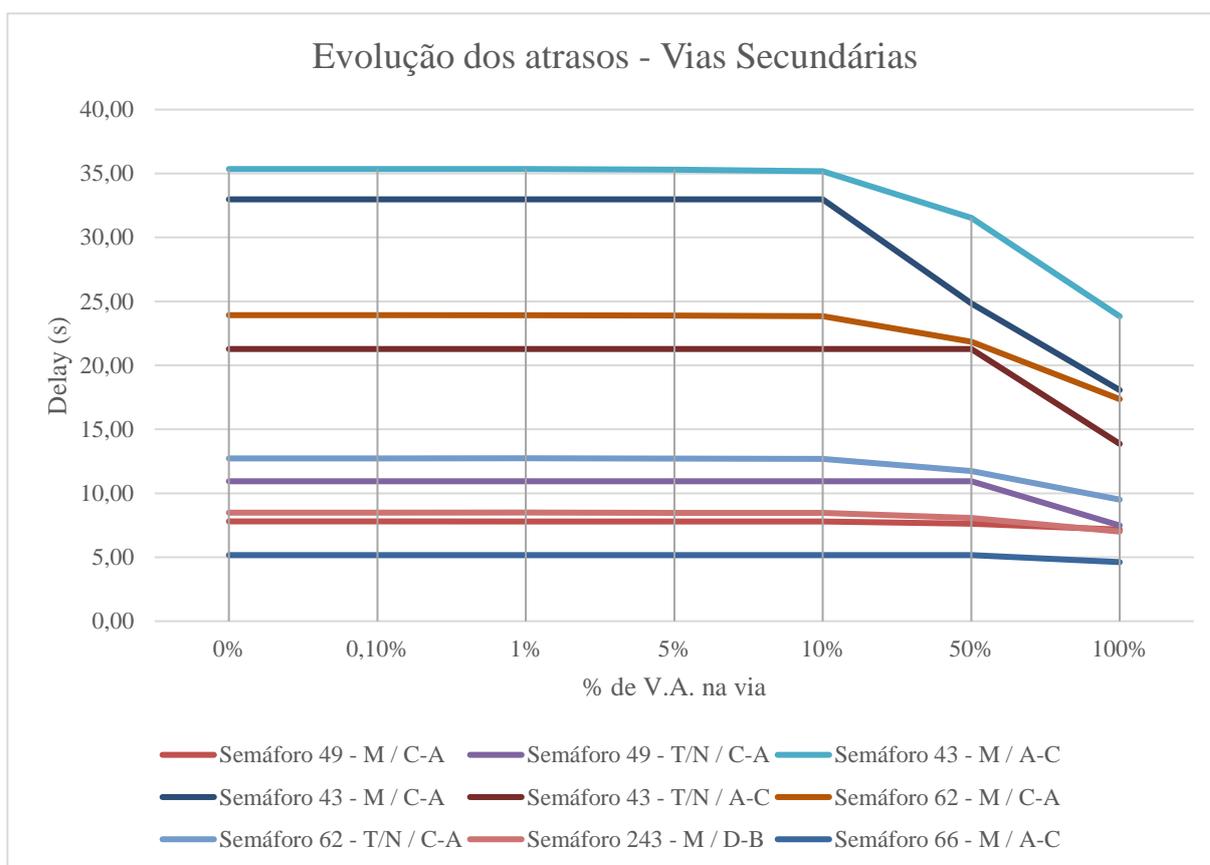
Um gráfico das vias principais sem o semáforo 364 também é apresentado (Gráfico 8), apenas para que se possa observar melhor o comportamento dos demais semáforos, já que, no

Gráfico 7 o comportamento das séries não ficou visível. O Gráfico 9 mostra o comportamento dos atrasos para as vias secundárias.

Gráfico 8 - Evolução dos atrasos - Vias Principais - Exceto semáforo 364



Fonte: A autora, 2018

Gráfico 9 - Evolução dos atrasos - Vias secundárias

Fonte: A autora, 2018

6.1.3 Análise do Agrupamento dos Dados de *Delay* Segundo o Nível de Saturação do Semáforo, em Saturados e Não Saturado

A capacidade de aproximação dos semáforos foi calculada e está mostrada na Tabela 6. A partir dos dados levantados, concluiu-se que 47% dos movimentos estudados estão acontecendo em vias cujas capacidades foram superadas.

Analisando-se as vias saturadas, nota-se uma redução relativa média de 51,6% no *delay*, quando sai-se de 0% para 100% de V.A. (Gráfico 10). As vias não saturadas apresentam resultado menos satisfatório, com 40,9% de diminuição, em média (Gráfico 11).

Nas vias saturadas, no cenário com 50% de V.A., houve diminuição do *delay* em apenas 4 movimentos, e no cenário com 100% de V.A. houve redução do *delay* em todos os movimentos. Para as vias não saturadas, isso não se repete. Aqui, todos os movimentos apresentaram redução já no cenário de 50% de V.A. na frota.

Para as vias não saturadas, a taxa de correlação (R^2) entre a diminuição do tempo de atraso e o nível de saturação é de 0,55, enquanto que para as vias saturadas, esse coeficiente é

de 0,26. Daí pode-se concluir que existe uma relação moderada entre a variação no tempo de atraso e a variação do nível de saturação em vias não saturadas.

Tal relação se dá como mostrado no gráfico 13. Daí entende-se que, quanto mais próxima à demanda, para determinado semáforo, se encontre do limite da capacidade de aproximação, maior o impacto da substituição de veículos guiados por humanos por V.A.

Já quando há saturação, a relação dos fatores citados é fraca (Gráfico 12). Portanto, nesses casos, não se pode concluir que o tempo é influenciado pela saturação.

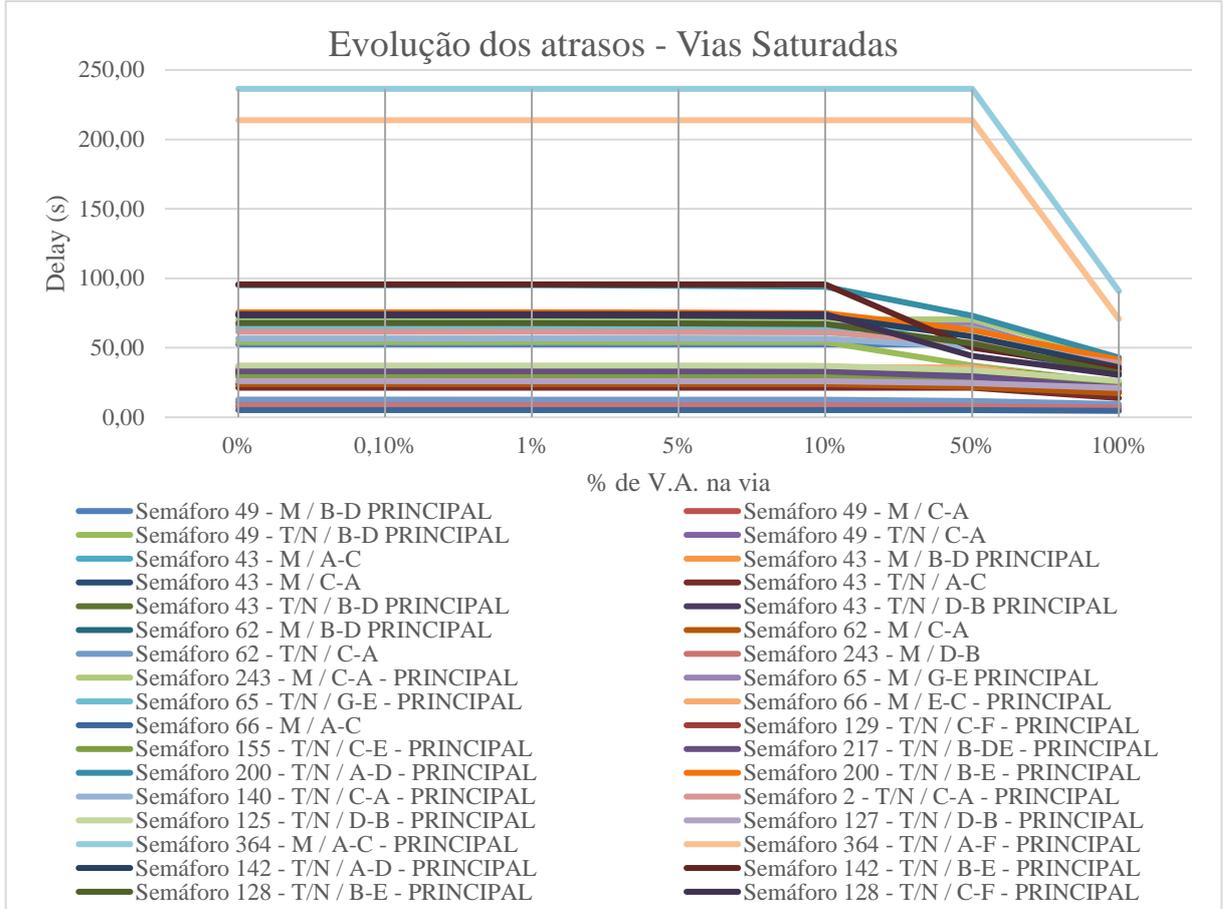
Tabela 6 - Cálculo de Capacidade de aproximação dos semáforos e % de saturação

Cruzamento	Semáforo	Movimento	Pico	Tipo de via	Capacidade de aproximação (vec./hr/faixa)	v (vec./hr/faixa)	% de saturação
Av. Agamenon Magalhães / Rua Odorico Mendes	49	B-D	M	Principal	676,48	1168,25	72,69%
Av. Agamenon Magalhães / Rua Odorico Mendes	49	C-A	M	Secundária	418,78	201,00	-52,00%
Av. Agamenon Magalhães / Rua Odorico Mendes	49	B-D	T/N	Principal	708,70	698,25	-1,47%
Av. Agamenon Magalhães / Rua Odorico Mendes	49	C-A	T/N	Secundária	418,78	617,00	47,33%
Av. Agamenon Magalhães / Rua Odorico Mendes	49	A-C	M	Secundária	641,79	533,50	-16,87%
Av. Norte / Av. João de Barros	43	B-D	M	Principal	511,70	887,50	73,44%
Cons. Aguiar / Ernesto de Paula Santos	127	D-B	T/N	Principal	648,30	330,25	-49,06%
Av. Norte / Rua Prof. José dos Anjos	364	A-C	M	Principal	929,04	1376,00	48,11%
Av. Norte / Rua Prof. José dos Anjos	364	A-F	T/N	Principal	920,77	1131,50	22,89%
Av. Norte / Av. João de Barros	43	A-C	T/N	Secundária	507,36	593,50	16,98%
Av. Norte / Av. João de Barros	43	B-D	T/N	Principal	604,73	745,50	23,28%
Av. Norte / Av. João de Barros	43	D-B	T/N	Principal	601,32	848,50	41,11%
Av. Norte / Av. João de Barros	43	C-A	M	Secundária	604,73	585,50	-3,18%

Cruzamento	Semáforo	Movimento	Pico	Tipo de via	Capacidade de aproximação (vec./hr/faixa)	v (vec./hr/faixa)	% de saturação
Av. Norte / Rua Cônego Barata	62	B-D	M	Principal	555,06	752,00	35,48%
Av. Norte / Rua Cônego Barata	62	C-A	M	Secundária	555,06	510,67	-8,00%
Av. Norte / Rua Cônego Barata	62	A-C	T/N	Secundária	432,20	713,00	64,97%
Av. Norte Miguel Arraes/ Rua da Aurora	243	D-B	M	Secundária	382,19	271,33	-29,01%
Av. Norte Miguel Arraes/ Rua da Aurora	243	C-A	M	Principal	735,72	1046,00	42,17%
Av. Norte / Rua Nova Descoberta	65	G-E	M	Principal	712,56	803,00	12,69%
Av. Norte / Rua Nova Descoberta	65	G-E	T/N	Principal	714,07	921,50	29,05%
Av. Norte / Rua Pe. Lemos	66	E-C	M	Principal	595,30	742,00	24,64%
Av. Norte / Rua Pe. Lemos	66	A-C	M	Secundária	288,63	426,00	47,59%
Av. Dom. Ferreira / Rua Barão de S. Leão	129	C-F	T/N	Principal	667,09	603,33	-9,56%
Av. Dom. Ferreira / Rua Pereira da Costa	142	A-D	T/N	Principal	1185,03	1030	-13,00%
Av. Dom. Ferreira / Rua Pereira da Costa	142	B-E	T/N	Principal	1185,03	866	9,73%
Av. Dom. Ferreira / Rua Cel. Benedito Chaves	128	B-E	T/N	Principal	1114,49	1061	-4,75%
Av. Dom. Ferreira / Rua Cel. Benedito Chaves	128	C-F	T/N	Principal	1114,49	867	16,76%
Av. Dom. Ferreira / Ribeiro de Brito	155	C-E	T/N	Principal	685,88	433,67	-36,77%
Av. Dom. Ferreira / Ernesto de Paula Santos	217	B-DE	T/N	Principal	687,76	647,00	-5,93%
Av. Dom. Ferreira / Rua Thomé Gibson	200	A-D	T/N	Principal	855,00	728,00	-14,85%
Av. Dom. Ferreira / Rua Thomé Gibson	200	B-E	T/N	Principal	855,00	937,00	9,59%
Av. Cons. Aguiar / Rua Pereira da Costa	140	C-A	T/N	Principal	845,60	531,00	-37,20%
Av. Cons. Aguiar / Rua Thomé Gibson	2	C-A	T/N	Principal	845,60	589,00	-30,35%
Av. Cons. Aguiar / Bernardino Pessoa	125	D-B	T/N	Principal	704,67	492,25	-30,14%

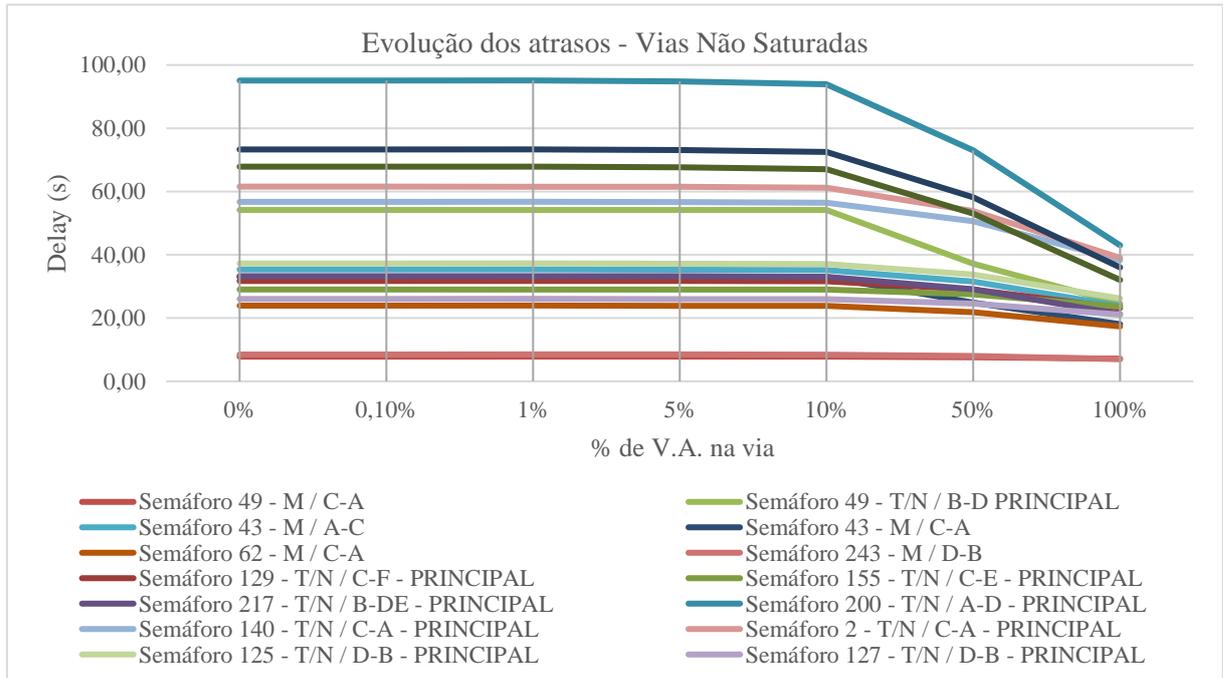
Fonte: A autora, 2018

Gráfico 10 - Evolução dos atrasos - Vias Saturadas

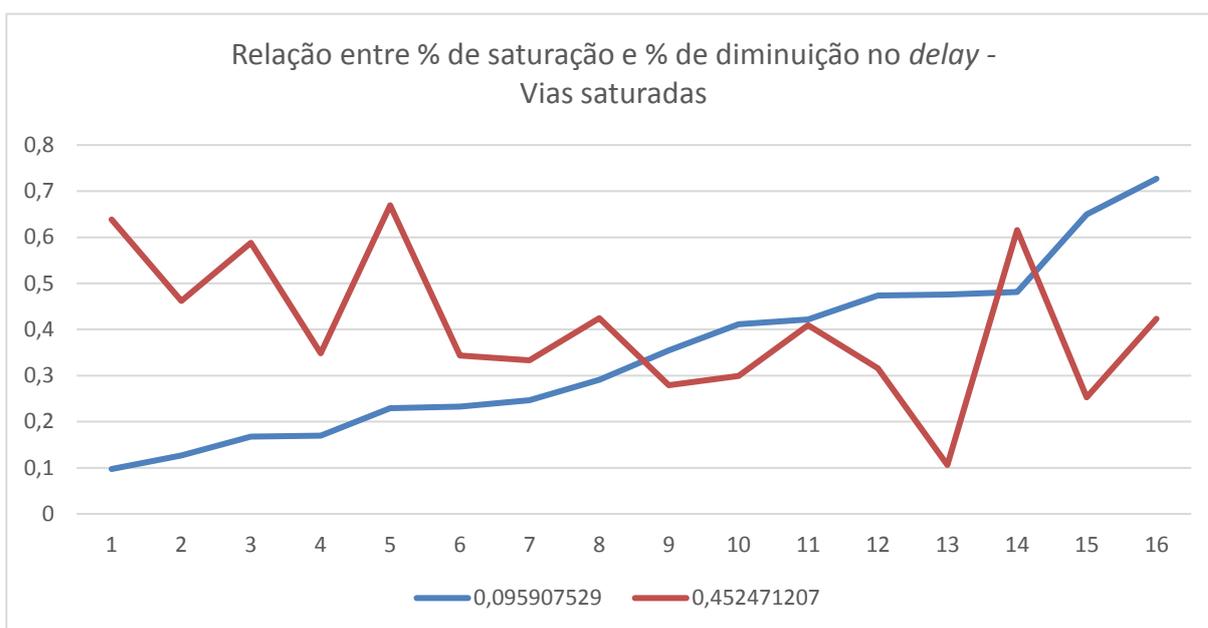


Fonte: A autora, 2018

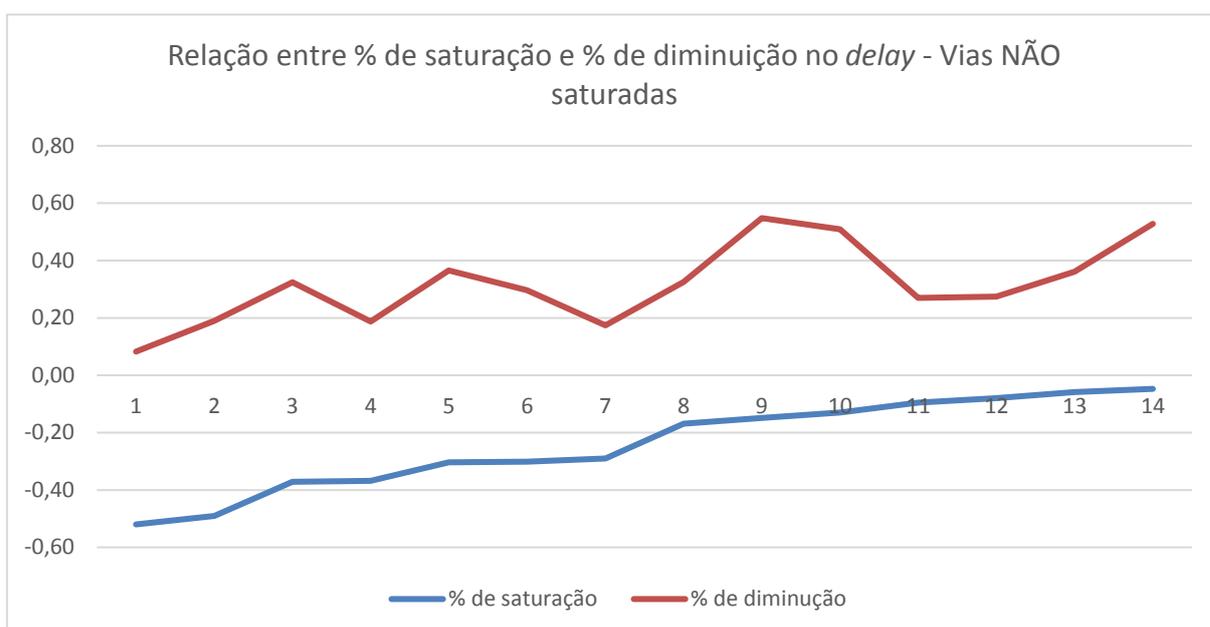
Gráfico 11- Evolução dos atrasos - Vias Não Saturadas



Fonte: A autora, 2018

Gráfico 12- Relação entre % de saturação e % de diminuição no *delay* das vias saturadas

Fonte: A autora, 2018

Gráfico 13 - Relação entre % de saturação e % de diminuição no *delay* das vias não saturadas

Fonte: A autora, 2018

6.2 DISCUSSÕES

O modelo proposto por essa dissertação (Equação 15) permite que o *uniform delay*, ou seja o aumento no tempo de médio de viagem decorrente da presença do semáforo na interseção, para uma frota mista de veículos tradicionais e V.A., seja obtido.

Para tal, é necessário que sejam conhecidas as informações de tempo de ciclo (C) e tempo de verde efetivo (g) do semáforo; taxa de fluxo de veículos / por hora / por faixa (v); taxa de saturação do fluxo base e *headway* médio da via, com veículos tradicionais (\bar{h}).

$$d_1 = \frac{0,5 \times G}{1 - \left\{ \min \left[1, \left(K \times v \times \left(1 + P_{VA} \left(\frac{h_{VA}}{\bar{h}} - 1 \right) \right) \right) \right] \times \frac{g}{C} \right\}} \quad (15)$$

Do mesmo modo, é preciso que se calcule, ou que se tenha conhecimento prévio, de alguns fatores de correção, a fim de especificar o funcionamento e características inerentes a cada interseção estudada. Esses fatores de correção são listados abaixo.

- f_w = fator de ajuste para largura de faixa;
- f_g = fator de ajuste para grade de aproximação;
- f_p = fator de ajuste para faixa de estacionamento existente e atividade de estacionamento adjacente ao grupo de faixa;
- f_{bb} = fator de ajuste para o efeito de bloqueio de ônibus que param nos arredores da interseção;
- f_a = fator de ajuste para tipo de região;
- f_{LU} = fator de ajuste para utilização de faixa;
- f_{LT} = fator de ajuste para presença de veículo fazendo conversão à esquerda em um grupo de faixa;
- f_{RT} = fator de ajuste para presença de veículo fazendo conversão à direita em um grupo de faixa;
- f_{Lpb} = fator de ajuste para presença de pedestres para grupos que fazem conversão para a esquerda;
- f_{Rpb} = fator de ajuste para presença de pedestres e/ou ciclistas para grupos que fazem conversão para a direita.

Tais fatores permitem que se inclua uma gama de especificidades da via e, conseqüentemente, fazem com que o modelo se torne menos generalizado e mais fidedigno à realidade encontrada na região estudada.

Assim, no caso de ser usado para estudos acerca de possível adoção de V.A., o modelo oferecerá resultados mais satisfatórios e condizentes, se mostrando como uma base mais confiável para a tomada de decisão do que um modelo generalista. Dito isso, enfatiza-se que o modelo foi construído tendo em vista a fase de planejamento da capacidade da rede em um estudo de mobilidade urbana.

Vale-se destacar que o modelo engloba a análise de diferentes modos de transporte, quais sejam, automóveis individuais privados, transporte público coletivo, bicicletas e pedestres. Isso demonstra que é abrangido pelo modelo o exame da interação entre diversos meios de deslocamento. Novamente, então, destaca-se o potencial do modelo de retratar a realidade da região de maneira mais próxima.

Portanto, entende-se que o modelo se mostrou satisfatório para basear uma discussão acerca do impacto dos veículos autônomos nos tempos médios de viagem, quando analisa-se os nós da rede, ou seja, as interseções. Nesse sentido, o modelo é capaz de simular o comportamento dos tempos de viagem em vias principais e secundárias; em semáforos saturados ou não.

Assim sendo, a partir do modelo e de sua aplicação, infere-se que com o uso dos V.A. é possível interferir nos tempos de espera e, conseqüentemente, na capacidade das interseções. Tal feito pode ser alcançado agindo-se sobre a redução dos *headways* entre os veículos.

Este ponto de vista também é defendido por Pissardini (2013), quando fala que o aumento da capacidade de tráfego das vias acontece com a redução das distâncias entre os veículos, em função de menor tempo de reação para frenagens.

Relativamente ao estudo prático realizado neste trabalho, os dados dos tempos de espera nas interseções foram analisados sob diferentes pontos de vista e foram combinados, em diferentes momentos, para viabilizar a comparação de desempenho do V.A. na diminuição dos tempos de viagem.

Inicialmente, foram considerados em conjunto os dados de tempo de todos os movimentos, em todos os semáforos. Portanto, nesse primeiro momento, a evolução dos *headways*, de acordo com o percentual de V.A. presentes, foi analisada para todos os movimentos, sem distinção de características da via ou de saturação.

Posteriormente, os semáforos foram agrupados em dois grupos, segundo a característica da via à qual pertenciam: um grupo de semáforos presentes em vias principais e outro daqueles encontrados em vias secundárias. Isso foi feito para que fosse possível investigar a diferença nos resultados entre esses dois tipos de vias.

Em última análise, foi observado o nível de saturação de cada semáforo. Esses foram, então, separados em saturados e não saturados. Assim, do mesmo modo que os grupos citados anteriormente, o comportamento dos *headways* nos semáforos saturados e nos não saturados foi confrontado, um com o outro.

Quando separou-se as vias em principais e secundárias, observou-se que as vias principais respondem de maneira mais efetiva à inserção de veículos autônomos na frota, alcançando maiores percentuais de redução de tempos de atraso.

Por outro lado, não foi possível estabelecer uma relação forte entre a saturação das vias e o potencial de diminuição dos tempos dos V.A. Isso porque os coeficientes de correlação entre as duas variáveis, para ambos os tipos de via – saturadas e não saturadas – apresentaram valores baixos, que não permite que se façam inferências.

Entretanto, pode-se afirmar que as vias não saturadas apresentam coeficiente de correlação mais próximo de 1, o que indica uma relação de causa e efeito moderada entre a saturação e taxa de diminuição dos *delays*, nesses casos.

Analisando em separado o caso do semáforo 364, percebe-se que o mesmo apresenta uma redução brusca no tempo de atraso, para os dois movimentos estudados, quando chega ao patamar de 100% de V.A. É compreensível que isso aconteça pois as capacidades de aproximação, para os dois movimentos, estão saturadas em 48,1% e 22,9%. Portanto, para que aconteça mudança notável no *delay*, é necessário uma grande diminuição no *headway* médio, o que só acontece quando se tem 100% de V.A.

O estudo da saturação das vias mostra que, dentro das limitações de escopo deste estudo, o veículo autônomo por si só não é suficiente para restaurar a eficiência da via, se a demanda de veículos atual for superior à sua capacidade. Entende-se que, para que se possa tirar proveito de possíveis ganhos de eficiência proporcionados pelo V.A., é necessário que haja a diminuição do quantitativo de carros circulando nas vias.

Ou seja, a substituição de veículos tradicionais por veículos autônomos em vias saturadas, sem diminuição da frota, não é solução sustentável para obter-se maior eficiência das interseções. Tais conclusões estão corroborando com a teoria de Gupta; Kalmanje; Kackelman

(2006) e LITMAN (2017) de que é preciso um controle da demanda para que a eficiência no uso da capacidade da via seja garantida.

Para que a diminuição nos tempos de atraso aconteça, então, é necessário que se adote, também, políticas de desestímulo à posse de veículos individuais e, em paralelo, que se fomente os sistemas de compartilhamento de frota ou a adesão ao transporte público de massa. Tais ações, em conjunto com o uso de tecnologia de V.A., mostra potencial para culminar-se em mudanças sustentáveis na mobilidade das grandes cidades.

No geral, a tecnologia dos V.A. mostrou potencial para ser disruptiva e causar profundas mudanças na utilização das vias. Entretanto, a partir da análise crítica dos dados gerados, entende-se que, o cenário onde se tem uma frota com 100% de V.A. é o que mais impacta na redução do *delay*. Tal cenário produz um efeito maior na organização do sistema e na provisão do serviço, porque é o que consegue proporcionar o *headway* mais baixo, de 0,5 segundos.

Para que o tempo de atraso comece a ser afetado de maneira considerável, é necessário que exista, pelo menos, 50% de veículos autônomos na via. Tal comportamento pode ser explicado pelo fato de que, caso contribua com uma pequena fatia de participação na frota, os V.A. não conseguem manter um *headway* suficientemente mais baixo do que o veículo tradicional. Com percentual mais baixo do que 50%, o *headway* médio possível é muito próximo daquele de motoristas humanos, não acarretando mudanças significativas.

Isso porque, quando está presente em baixos percentuais, não há V.A. em número suficiente para que haja um compartilhamento considerável de informação, já que, segundo Atiyeh (2012), é necessária uma taxa de 50% de penetração de V.A. no mercado para que se possa considerar a formação de um sistema de comunicação por nuvem.

Outra explicação plausível - e complementar à apresentada anteriormente - é que os motoristas humanos, na presença de um V.A., acabam modificando seu modo de conduzir, adotando uma direção mais defensiva. Como consequência, o *headway* médio se mantém, apesar do ganho em *headway* proporcionado pelos V.A.s.

Um aspecto a salientar-se é que, apesar de só causar algum efeito no *delay* quando divide a via meio a meio com veículos tradicionais, a inserção de V.A. sempre mantém ou diminui o tempo médio de viagem, mas nunca o eleva.

Portanto, o V.A. é capaz de trazer mudanças nos tempos de deslocamentos no trânsito apenas sob determinadas condições. Nesse trabalho, ficou evidente que tais mudanças só serão possíveis a partir do momento em que a frota for compartilhada pela metade entre veículos

tradicionais e autônomos. E a maximização das mudanças ocorrerá quando só existir V.A. circulando, considerando que a quantidade de veículos não diminua nem aumente.

De fato, pode-se observar uma diminuição brusca nos tempos médios de atraso quando se atinge o marco de 100% de V.A. na via. Na literatura, observa-se um comportamento semelhante no trabalho de Shladover *et al.* (2012), onde é estimado que, em taxas de implantação de 10%, 50%, e 90% de veículos dotados de CACC, a capacidade efetiva das faixas irá aumentar em 1%, 21% e 80%, respectivamente. Ou seja, do cenário com 50% de CACC para o cenário com 90%, houve aumento de 59% na capacidade.

Resultados desanimadores para os cenários de 0% a 50% de participação dos V.A. na frota trazem a reflexão sobre até que ponto não é mais vantajoso investir, no momento, considerando a realidade brasileira, em tecnologias mais baratas e mais facilmente implementadas, como o dispositivo de conscientização de veículo, sugerido no trabalho de Shladover *et al.* (2012).

7 CONCLUSÃO

Nas condições da presente dissertação, e considerando o modelo proposto e de sua aplicação em caso prático, conclui-se que, com o uso dos V.A., é possível interferir nos tempos de espera e, conseqüentemente, na capacidade das interseções e, indo além, tal efeito pode ser alcançado com a redução dos *headways* entre os veículos.

Tal conclusão foi edificada de acordo com a análise da taxa de participação de V.A. nas frotas, comparando-as em vias principais e secundárias, saturadas e não saturadas

Utilizando como base metodologia consolidada na área, o modelo proposto por este trabalho permite que os tempos de atraso nas interseções semaforicas sejam calculados, considerando-se as particularidades dos veículos autônomos. Também, por conter parâmetros e fatores de correção que levam em consideração particularidades da via, o modelo se reveste de um caráter não-generalista.

Do mesmo modo, o modelo permite que se modele a interação com diferentes modos de transporte. Portanto, permite que a situação estudada seja entendida de maneira mais fidedigna à realidade, apoiando de forma mais efetiva processos de tomada de decisão em planejamento urbano.

Os resultados de baixos percentuais de redução nos *delays* para os cenários 1 a 5 deixam evidente a necessidade da ponderação sobre o custo benefício da adoção dos V.A. Em casos específicos, entende-se que é mais vantajoso investir em tecnologia mais barata e de fácil implantação para alcançar os resultados desejados de diminuição nos tempos de atraso.

Entende-se que a proporção com a qual os V.A. irão afetar a capacidade das vias e/ou os tempos de deslocamento dependerá da sua quota de participação na frota. Ficou demonstrado que, para que o tempo de atraso seja afetado de maneira considerável, é necessário que exista, pelo menos, 50% de veículos autônomos na via. Desse modo, será possível diminuir o *headway* médio a ponto de diferenciá-lo daquele alcançado em situação onde grande parte da frota é conduzida por motoristas humanos. Em contrapartida, pode-se observar uma diminuição brusca nos tempos de espera quando se atinge o marco de 100% de V.A. na via.

Dito isto, conclui-se que as perspectivas para que seja possível observar efeitos na eficiência de utilização das vias, advindos do uso de V.A., que seja perceptível ao usuário e a ponto de melhorar o nível de serviço ofertado não serão observadas no curto prazo. Isto porque a tecnologia estudada aqui ainda levará um tempo para ser amplamente adotada pelos usuários

comuns, já que é cara e ainda precisa passar por uma série de sabatinas relacionadas à segurança, regulação e, inclusive, éticas.

Conclui-se, igualmente, que apenas a adoção de veículo autônomo ou substituição de veículos tradicionais por autônomos, sem um efetivo apoio de políticas de controle da demanda, não é suficiente para restaurar a eficiência da via a níveis sustentáveis.

Os dados levantados e os testes de correlação entre a saturação da via e as taxas de diminuição do *delay* não apresentaram resultados conclusivos, portanto, não pode-se afirmar com elevado grau de certeza que as duas variáveis estão relacionadas.

Este trabalho apresenta potencial para enriquecer a discussão acerca do desempenho das redes de transporte urbanas, incluindo as demandas de estudo de veículos autônomos e suas problemáticas. Para esse fim, trouxe elementos que tornam mais rico o debate a respeito do futuro da direção autônoma nas cidades, assim como incentivou a reflexão sobre sua posição como possível solução para o aumento da eficiência no uso do espaço urbano.

Do mesmo modo, os temas abordados visaram fomentar a ponderação sobre as prováveis mudanças nas estruturas sociais e comerciais causada pelo advento da tecnologia e o quanto a sociedade está disposta a acolhê-las.

Para trabalhos futuros, dada a importância da diminuição da frota na eficiência de uma interseção, recomenda-se inserir no modelo a possibilidade de representar a diminuição do fluxo de saturação advinda da adoção de V.A. Isso porque, à medida em que se aumenta a introdução da tecnologia de direção autônoma no mercado, existe a tendência de diminuição de posse de veículos e aumento dos hábitos de viagens compartilhadas.

Além disso, sugere-se que se acrescente ao estudo os movimentos de giro para a direita e esquerda das vias, com suas respectivas implicações, e que se diminua o intervalo de variação do *headway*.

Igualmente, propõe-se que se estude os impactos dos V.A. considerando-se o fluxo de pedestres e ciclistas nas interseções, inclusive do ponto de vista da segurança, já que esses são usuários mais vulneráveis dentro de uma rede de transporte.

Do mesmo modo, é importante que se estabeleça uma linha de estudo sobre como a experiência de navegação em um V.A. é diferente da de um veículo tradicional. O passageiro que não está engajado na direção tende a ficar mais sensível aos níveis de aceleração e desaceleração. Esse fato pode afetar as configurações dos parâmetros dos V.A., fazendo com que ele seja menos eficiente do que o esperado e não causar a diminuição prevista no *headway*.

Ainda, para os cruzamentos estudados, é necessário que seja feito o levantamento da movimentação de pedestres e ciclistas. Tais dados de contagem precisam, então, ser incorporados ao modelo e os resultados derivados devem ser avaliados.

Por fim, é recomendado que se aprofunde nos estudos sobre os desafios para a implantação dos veículos autônomos, tratando problemáticas técnicas e de implementação, de regulação e éticas. Nesse leque está incluso o exame do quanto a população está preparada para aderir à tecnologia, qual seu nível de aceitação à mesma e como os governos devem lidar com a situação.

REFERÊNCIAS

ALESSANDRINI, Adriano *et al.* Automated vehicles and the rethinking of mobility and cities. **Transportation Research Procedia**, v. 5, p. 145-160, 2015.

ATIYEH, Clifford. Predicting traffic patterns, one Honda at a time. **MSN Auto**, Junho, v. 25, 2012.

BAGLOEE, Saeed Asadi *et al.* Autonomous vehicles: challenges, opportunities, and future implications for transportation policies. **Journal of Modern Transportation**, v. 24, n. 4, p. 284-303, 2016.

BANSAL, Prateek; KOCKELMAN, Kara M.; SINGH, Amit. Assessing public opinions of and interest in new vehicle technologies: An Austin perspective. **Transportation Research Part C: Emerging Technologies**, v. 67, p. 1-14, 2016.

BEIKER, Sven A. Legal aspects of autonomous driving. **Santa Clara L. Rev.**, v. 52, p. 1145, 2012.

BRASIL, Código de Trânsito Brasileiro. Lei nº 9.503 de 23 de setembro de 1997. Brasília, DF, 1997.

CHOWDHURY, Mashrur; DEY, Kakan. Intelligent transportation systems-a frontier for breaking boundaries of traditional academic engineering disciplines [Education]. **IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine**, v. 8, n. 1, p. 4-8, 2016.

CTTU, Companhia de Trânsito e Transporte Urbano do Recife - Relatório faixa azul e outras faixas exclusivas, disponível em <http://cttu.recife.pe.gov.br/faixa-azul>, acessado em 15/08/2018.

DETRANa, Departamento Estadual de Trânsito – Estatísticas, frota registrada segundo o tipo – RMR, http://www.detran.pe.gov.br/index.php?option=com_content&view=article&id=36&Itemid=72, acessado em 12/08/2018.

DETRANb, Departamento Estadual de Trânsito - Veículos novos (1º emplacamento), por tipo de veículo - Pernambuco, http://www.detran.pe.gov.br/index.php?option=com_content&view=article&id=36&Itemid=72, acessado em 12/08/2018.

DIELS, Cyriel; BOS, Jelte E. Self-driving carsickness. **Applied ergonomics**, v. 53, p. 374-382, 2016.

DOKIC, Jadranka; MÜLLER, Beate; MEYER, Gereon. European roadmap smart systems for automated driving. **European Technology Platform on Smart Systems Integration**, 2015.

DRESNER, Kurt, STONE, Peter. A multiagent approach to autonomous intersection management. **Journal of Artificial Intelligence Research**. v. 31, p. 591-656, 2008.

FAGNANT, Daniel J.; KOCKELMAN, Kara. Preparing a nation for autonomous vehicles: opportunities, barriers and policy recommendations. **Transportation Research Part A: Policy and Practice**, v. 77, p. 167-181, 2015.

FARS, Fatality analysis reporting system, National Highway Traffic Safety Administration, United States Department of Transportation, Washington, DC, 2018. Disponível em <https://www.nhtsa.gov/research-data/fatality-analysis-reporting-system-fars>, acessado em 13/4/2018.

FERREIRA, A. B. H. Novo dicionário da língua portuguesa. 2ª edição. Rio de Janeiro. Nova Fronteira, Rio de Janeiro. 1989.

FORBES, Gartners hype cycle for emerging technologies, <https://www.forbes.com/sites/louiscolumnbus/2017/08/15/gartners-hype-cycle-for-emerging-technologies-2017-adds-5g-and-deep-learning-for-first-time/#4ac57ecf5043>, Acessado em 05/03/2018.

GANIYU, R. A., Olabiyisi S. O., Omidiora E. O., Okediran O. O. and Alo O. O. Modelling and validation of a multi-phase traffic light controlled cross-type intersection using timed coloured petri nets, *Am. J. Sci. Ind. Res.*, 2(5): p. 807-819, 2011.

GLOBO, Carro autônomo da Uber atropela e mata mulher nos EUA, disponível em: <https://g1.globo.com/carros/noticia/carro-autonomo-da-uber-atropela-e-mata-mulher-nos-eua.ghtml>, acessado em 19/07/2018.

HCM, Highway Capacity Manual, **Transportation Research Board, National Research Council, Washington, DC**, 2010.

IBGEa, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – Panoramas, <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/pe/recife/panorama>, acessado em 12/08/2018.

IBGEb, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – Estimativas populacionais para os municípios e para as Unidades da Federação brasileiros em 01.07.2017, https://ww2.ibge.gov.br/home/estatistica/populacao/estimativa2017/estimativa_dou.shtm, acessado em 12/08/2018.

ICPSa, Sistematização de Dados Existentes – Tomos I a VI, <http://icps.recife.pe.gov.br/NODE/61221>, acessado em 20/12/2017.

IPEA, Atlas do Desenvolvimento Humano no Brasil – Região Metropolitana do Recife, 2010.

ITS, “conected vehicles for mobility”, Intelligent Transportation Systems Joint Program Office (ITS JPO), Office of the Assistant Secretary for Research and Technology (OST-R), U.S. Department of Transportation (US DOT), https://www.its.dot.gov/communications/media/15cv_future.htm?_ga=1.9349628.8120396.1489862472, acessado em 18/03/2017.

JAKUBIEC, Greg; MULLINIX, Brendan. The use of LiDAR technology in autonomous cruise control systems for automobiles. In: **Conference Session C**. 2013.

JAMSON, A. Hamish *et al.* Behavioural changes in drivers experiencing highly-automated vehicle control in varying traffic conditions. **Transportation research part C: emerging technologies**, v. 30, p. 116-125, 2013.

JC, Jornal do Comércio - Recife é a oitava cidade com pior trânsito no mundo <http://jconline.ne10.uol.com.br/canal/cidades/jc-transito/noticia/2016/03/22/recife-e-a-oitava-cidade-com-pior-transito-no-mundo-227385.php>, acessado em 12/08/2018.

JCa, Jornal do Comércio - Agamenon Magalhães receberá Faixa Azul até o fim do ano, <http://jconline.ne10.uol.com.br/canal/cidades/jc-transito/noticia/2018/05/08/agamenon-magalhaes-recebera-faixa-azul-ate-o-fim-do-ano-338333.php>, acessado em 15/08/2018.

KOMNINOS, Nicos. **Intelligent cities and globalisation of innovation networks**. Routledge, 2008.

KPMG. Self-driving cars: the next revolution, **KPMG and CAR (Center for Automotive research)**, 2012, disponível em <http://www.kpmg.com/Ca/en/IssuesAndInsights/ArticlesPublications/Documents/selfdrivingcars-next-revolution.Pdf>, acessado em 19/04/18.

KRUEGER, Rico; RASHIDI, Taha H.; ROSE, John M. Preferences for shared autonomous vehicles. **Transportation research part C: emerging technologies**, v. 69, p. 343-355, 2016.

LE VINE, Scott; ZOLFAGHARI, Alireza; POLAK, John. Autonomous cars: The tension between occupant experience and intersection capacity. **Transportation Research Part C: Emerging Technologies**, v. 52, p. 1-14, 2015.

LITMAN, Todd, Why Manage Transportation Demand? - The Next Big Thing in Transportation, Transportation Demand Management Encyclopedia, 2017, disponível em <http://www.vtpi.org/tm/tm51.htm>, acessado em 19/04/2018.

LITMANa, Todd. **Autonomous vehicle implementation predictions**. Victoria Transport Policy Institute, 2017.

MCGRAW-HILL, Parker SP; PARKER, S. P. **McGraw-Hill dictionary of scientific and technical terms**. McGraw-Hill, 2003.

OBSERVATÓRIO, Observatório do Recife – Recifense vai de carro à esquina, <http://www.observatoriodorecife.org.br/recifense-vai-de-carro-a-esquina/>, acessado em 12/08/2018.

PAPAGEORGIOU, M, Automatic control methods in traffic and transportation, **Operations research and decision aid methodologies in traffic and transportation management**, P. Toint, M. Labbe, K. Tanczos and G. Laporte (Eds.), Springer-Verlag, pp. 46-83, 1999.

PISSARDINI, R. S. ; Wei, D. C. M. ; Fonseca Jr., E. S. Veículos Autônomos: Conceitos, Histórico e Estado-da-Arte, Anais do XXVII Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes, 2013.

REDZIC, Ogi; RABEL, Dietmar. A location cloud for highly automated driving. In: **Road Vehicle Automation 2**. Springer International Publishing, 2015. p. 49-60.

SAEa, Toyota unveils autonomous e-commerce concept vehicle, development alliance, SAE Internacional, 9 de janeiro de 2018, <http://articles.sae.org/15824/>, acessado em 15/03/2018.

SAE, Surface vehicle recommended practice, SAE Internacional, setembro de 2016, https://www.sae.org/standards/content/j3016_201609/, acessado em 09/12/2017.

SCHOETTLE, Brandon; SIVAK, Michael. Potential impact of self-driving vehicles on household vehicle demand and usage. 2015.

SCHELLEKENS, Maurice. Self-driving cars and the chilling effect of liability law. **Computer Law & Security Review**, v. 31, n. 4, p. 506-517, 2015.

SEIF, Heiko G.; HU, Xiaolong. Autonomous Driving in the iCity—HD Maps as a Key Challenge of the Automotive Industry. **Engineering**, v. 2, n. 2, p. 159-162, 2016.

SETTI, J.R. highway capacity manual ou um manual de capacidade rodoviária brasileiro? Anais do VI Congresso Brasileiro de Rodovias e Concessões—CBR&C, Florianópolis, SC, 2009.

SHI, Liang; PREVEDOUROS, Panos. Autonomous and Connected Cars: HCM Estimates for Freeways with Various Market Penetration Rates. **Transportation Research Procedia**, v. 15, p. 389-402, 2016.

SHLADOVER, Steven; SU, Dongyan; LU, Xiao-Yun. Impacts of cooperative adaptive cruise control on freeway traffic flow. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**, n. 2324, p. 63-70, 2012.

SINGULARITY, Previsões da Singularity University até 2038 – Clear Inovação, 2018, disponível em <http://clearinovacao.com.br/previsoes-singularity-university-2038/>, acessado em 10/08/2018.

STAYTON, Erik Lee. **Driverless dreams: technological narratives and the shape of the automated car**. 2015. Tese de Doutorado. Massachusetts Institute of Technology.

STRONG, Dennis W.; NAGUI, R. M.; COURAGE, Ken. New calculation method for existing and extended HCM delay estimation procedure. In: **Proceedings of the 86th Annual Meeting of the Transportation Research Board**. 2006.

TAKEDA, Yuji *et al.* Electrophysiological evaluation of attention in drivers and passengers: Toward an understanding of drivers' attentional state in autonomous vehicles. **Transportation research part F: traffic psychology and behaviour**, v. 42, p. 140-150, 2016.

THOMOPOULOS, Nikolas; GIVONI, Moshe. The autonomous car—a blessing or a curse for the future of low carbon mobility? An exploration of likely vs. desirable outcomes. **European Journal of Futures Research**, v. 3, n. 1, p. 14, 2015.

UITP. Autonomous vehicles: a potential game changer for urban mobility - Union Internationale des Transports Publics (UITP), disponível em: <http://www.uitp.org/autonomous-vehicles>, acessado em 08/02/2017.

ZHENG, Yi; JIN, Lisheng; JIANG, Yuying; WANG, Fangrong; GUAN, Xin; JI, Shengyuan; XU, Jun. Research on cooperative vehicle intersection control scheme without using traffic lights under the connected vehicles environment. **Advances in Mechanical Engineering**, Vol. 9(8) p. 1–13, 2017.

ZHENG, Yi; JIN, Lisheng; GAO, Linlin; LI, Keyong; WANG, Yan; WANG, Faji. Development of a Distributed Cooperative Vehicles Control Algorithm Based on V2V Communication. **Procedia Engineering**, vol. 137, p. 649 – 658, 2016.

APÊNDICE A – TABELA DE PROGRAMAÇÃO SEMAFÓRICA

Cruzamento	Semáforo	Movimento	Pico	Hora Pico ICPS	Intervalo Programa CTTU	Programa CTTU	Ciclo (s)	F1	F2	F3	F4	F5
Av. Agamenon Magalhães / Rua Odorico Mendes	49	A-C	M	07:00 - 08:00	06:30 - 09:00	1	120	68" + 4"	44" + 4"	-	-	-
Av. Agamenon Magalhães / Rua Odorico Mendes	49	B-D	M	07:15 - 08:15	06:30 - 09:00	1	120	68" + 4"	44" + 4"	-	-	-
Av. Agamenon Magalhães / Rua Odorico Mendes	49	C-A	M	10:00 - 11:00	09:00 - 20:00	2	105	62" + 4"	35" + 4"	-	-	-
Av. Agamenon Magalhães / Rua Odorico Mendes	49	B-D	T/N	14:15 - 15:15	09:00 - 20:00	2	106	62" + 4"	35" + 4"	-	-	-
Av. Agamenon Magalhães / Rua Odorico Mendes	49	A-C	T/N	14:15 - 15:15	09:00 - 20:00	2	107	62" + 4"	35" + 4"	-	-	-
Av. Agamenon Magalhães / Rua Odorico Mendes	49	C-A	T/N	17:00 - 18:00	09:00 - 20:00	2	108	62" + 4"	35" + 4"	-	-	-
Av. Conselheiro Aguiar / Bernardino Pessoa	125	D-B	T/N	18:00 -19:00	11:00 - 20:00	1	120	72" + 3" +1"	40" + 3" +1"	-	-	-
Av. Conselheiro Aguiar / Rua Pereira da Costa	140	C-A	T/N	17:15 - 18:15	11:00 - 20:00	1	120	87" + 3" +1"	25" + 3" +1"	-	-	-
Av. Conselheiro Aguiar / Rua Thomé Gibson	2	C-A	T/N	17:45 - 18:45	11:00 - 20:00	1	120	87" + 3" +1"	25" + 3" +1"	-	-	-
Av. Domingos Ferreira / Ernesto de Paula Santos	217	B-DE	T/N	19:45 - 20:45	20:00 - 22:00	2	100	58" + 3" +1"	34" + 3" +1"	-	-	-

Cruzamento	Semáforo	Movimento	Pico	Hora Pico ICPS	Intervalo Programa CTTU	Programa CTTU	Ciclo (s)	F1	F2	F3	F4	F5
Av. Domingos Ferreira / Ribeiro de Brito	155	C-E	T/N	17:15 - 18:15	11:00 - 20:00	1	120	70'' + 3''+1''	42'' + 3''+1''	-	-	-
Av. Domingos Ferreira / Rua Barão de S. Leão	129	C-F	T/N	17:00 - 18:00	11:00 - 20:00	1	120	70'' + 3''+1''	42'' + 3''+1''	-	-	-
Av. Domingos Ferreira / Rua Cel. Benedito Chaves	128	C-F	T/N	17:00 - 18:00	11:00 - 20:00	1	120	76'' + 3'' +1''	36'' + 3''+1''	-	-	-
Av. Domingos Ferreira / Rua Cel. Benedito Chaves	128	B-E	T/N	17:30 - 18:30	11:00 - 20:00	1	120	76'' + 3'' +1''	36'' + 3''+1''	-	-	-
Av. Domingos Ferreira / Rua Pereira da Costa	142	A-D	T/N	17:00 - 18:00	11:00 - 20:00	1	120	81'' + 3''+1''	31'' + 3''+1''	-	-	-
Av. Domingos Ferreira / Rua Pereira da Costa	142	B-E	T/N	17:15 - 18:15	11:00 - 20:00	1	120	81'' + 3''+1''	31'' + 3''+1''	-	-	-
Av. Domingos Ferreira / Rua Thomé Gibson	200	A-D	T/N	17:15 - 18:15	11:00 - 20:00	1	120	87'' + 4''	25'' + 4''	-	-	-
Av. Domingos Ferreira / Rua Thomé Gibson	200	B-E	T/N	17:45 - 18:45	11:00 - 20:00	1	120	87'' + 4''	25'' + 4''	-	-	-
Av. Norte / Av. João de Barros	43	A-C	M	06:30 - 07:30	06:00 - 09:30	1	130	65''+4''+1''	55''+ 4''+1''	-	-	-
Av. Norte / Av. João de Barros	43	B-D	M	06:30 - 07:30	06:00 - 09:30	1	130	65''+4''+1''	55''+ 4''+1''	-	-	-
Av. Norte / Av. João de Barros	43	C-A	M	10:00 - 11:00	09:30 - 16:00	2	110	55''+4''+1''	45''+ 4''+1''	-	-	-
Av. Norte / Av. João de Barros	43	D-B	M	10:00 - 11:00	09:30 - 16:00	2	110	55''+4''+1''	45''+ 4''+1''	-	-	-
Av. Norte / Av. João de Barros	43	B-D	T/N	14:15 - 15:15	09:30 - 16:00	2	110	55''+4''+1''	45''+ 4''+1''	-	-	-
Av. Norte / Av. João de Barros	43	C-A	T/N	15:00 - 16:00	09:30 - 16:00	2	110	55''+4''+1''	45''+ 4''+1''	-	-	-
Av. Norte / Av. João de Barros	43	A-C	T/N	16:00 - 17:00	16:00 - 20:30	3	120	60''+4''+1''	50''+ 4''+1''	-	-	-

Cruzamento	Semáforo	Movimento	Pico	Hora Pico ICPS	Intervalo Programa CTTU	Programa CTTU	Ciclo (s)	F1	F2	F3	F4	F5
Av. Norte / Av. João de Barros	43	D-B	T/N	17:30 - 18:30	16:00 - 20:30	3	120	60''+4''+1''	50''+ 4''+1''	-	-	-
Av. Norte / Rua Cônego Barata	62	B-D	M	06:15 - 07:15	06:00 - 09:30	1	130	60''+4''+1''	60''+ 4''+1''	-	-	-
Av. Norte / Rua Cônego Barata	62	D-B	M	06:45 - 07:45	06:00 - 09:30	1	130	60''+4''+1''	60''+ 4''+1''	-	-	-
Av. Norte / Rua Cônego Barata	62	A-C	M	07:15 - 08:15	06:00 - 09:30	1	130	60''+4''+1''	60''+ 4''+1''	-	-	-
Av. Norte / Rua Cônego Barata	62	C-A	M	07:15 - 08:15	06:00 - 09:30	1	130	60''+4''+1''	60''+ 4''+1''	-	-	-
Av. Norte / Rua Cônego Barata	62	B-D	T/N	14:15 - 15:15	09:30 - 16:00	2	110	53''+4''+1''	47''+ 4''+1''	-	-	-
Av. Norte / Rua Cônego Barata	62	A-C	T/N	16:45 - 17:45	16:00 - 20:30	3	120	68''+4''+1''	42''+ 4''+1''	-	-	-
Av. Norte / Rua Cônego Barata	62	D-B	T/N	17:00 - 18:00	16:00 - 20:30	3	120	68''+4''+1''	42''+ 4''+1''	-	-	-
Av. Norte / Rua Cônego Barata	62	C-A	T/N	17:15 - 18:15	16:00 - 20:30	3	120	68''+4''+1''	42''+ 4''+1''	-	-	-
Av. Norte / Rua Nova Descoberta	65	G-E	T/N	16:00 - 17:00	16:00 - 20:00	2	120	79'' + 4''	33'' + 4''	72'' + 4''	40'' + 4''	-
Av. Norte / Rua Nova Descoberta	65	G-E	M	07:00 - 08:00	06:00 - 09:30	1	125	82'' + 4''	35'' + 4''	75'' + 4''	42'' + 4''	-
Av. Norte / Rua Pe. Lemos	66	E-C	M	07:45 - 08:45	06:00 - 09:30	1	125	62'' + 4''	28'' + 4''	23'' + 4''	-	-
Av. Norte / Rua Pe. Lemos	66	A-C	M	07:45 - 08:45	06:00 - 09:30	1	125	62'' + 4''	28'' + 4''	23'' + 4''	-	-
Av. Norte / Rua Prof. José dos Anjos	364	A-F	T/N	17:00 - 18:00	16:00 - 20:00	2	120	18'' + 4''	61'' + 4''	94'' + 4''	51'' + 4''	39'' + 4''
Av. Norte / Rua Prof. José dos Anjos	364	A-C	M	07:00 - 08:00	06:00 - 09:30	1	125	18'' + 4''	72'' + 4''	99'' + 4''	45'' + 4''	50'' + 4''
Av. Norte / Rua Prof. José dos Anjos	364	F-A	M	07:00 - 08:00	06:00 - 09:30	1	125	18'' + 4''	72'' + 4''	99'' + 4''	45'' + 4''	50'' + 4''
Av. Norte Miguel Arraes/ Rua da Aurora	243	C-A	M	07:45 - 08:45	09:30 - 16:00	2	118	73''+ 4''+1''	35'' + 4''+1''	-	-	-

Cruzamento	Semáforo	Movimento	Pico	Hora Pico ICPS	Intervalo Programa CTTU	Programa CTTU	Ciclo (s)	F1	F2	F3	F4	F5
Av. Norte Miguel Arraes/ Rua da Aurora	243	D-B	M	10:00 - 11:00	09:30 - 16:00	2	118	73''+ 4''+1''	35'' + 4''+1''	-	-	-
Av. Norte Miguel Arraes/ Rua da Aurora	243	C-A	T/N	14:15 - 15:15	09:30 - 16:00	2	118	73''+ 4''+1''	35'' + 4''+1''	-	-	-
Av. Cons. Aguiar / Ernesto de Paula Santos	127	D-B	T/N	17:00 - 18:00	11:00 - 20:00	1	120	66'' + 3'' +1''	46'' + 3''+1''	-	-	-

APÊNDICE B – INTERSEÇÕES, HORÁRIOS DE PICO E VOLUME DE VEÍCULOS

item	Cruzamento	Semáforo	Movimento	Categoria	Pico	Horário de Pico	v (v/hr/f)
1	Av. Agamenon Magalhães / Rua Odorico Mendes	49	B-D	Principal	M	07:00 - 08:00	1168
2	Av. Agamenon Magalhães / Rua Odorico Mendes	49	C-A	Secundária	M	10:00 - 11:00	201
3	Av. Agamenon Magalhães / Rua Odorico Mendes	49	B-D	Principal	T/N	14:15 - 15:15	698
4	Av. Agamenon Magalhães / Rua Odorico Mendes	49	C-A	Secundária	T/N	17:00 - 18:00	411
5	Av. Norte / Av. João de Barros	43	A-C	Secundária	M	06:30 - 07:30	534
6	Av. Norte / Av. João de Barros	43	B-D	Principal	M	06:30 - 07:30	888
7	Av. Norte / Av. João de Barros	43	C-A	Secundária	M	10:00 - 11:00	586
8	Av. Norte / Av. João de Barros	43	A-C	Secundária	T/N	16:00 - 17:00	594
9	Av. Norte / Av. João de Barros	43	D-B	Principal	T/N	17:30 - 18:30	849
10	Av. Norte / Rua Cônego Barata	62	B-D	Principal	M	06:15 - 07:15	752
11	Av. Norte / Rua Cônego Barata	62	C-A	Secundária	M	07:15 - 08:15	511
12	Av. Norte / Rua Cônego Barata	62	C-A	Secundária	T/N	17:15 - 18:15	475
13	Av. Norte Miguel Arraes/ Rua da Aurora	243	D-B	Secundária	M	10:00 - 11:00	407
14	Av. Norte Miguel Arraes/ Rua da Aurora	243	C-A	Principal	M	07:45 - 08:45	1046
15	Av. Norte / Rua Nova Descoberta	65	G-E	Principal	M	07:00 - 08:00	803
16	Av. Norte / Rua Nova Descoberta	65	G-E	Principal	T/N	16:00 - 17:00	922

item	Cruzamento	Semáforo	Movimento	Categoria	Pico	Horário de Pico	v (v/hr/f)
17	Av. Norte / Rua Pe. Lemos	66	E-C	Principal	M	07:45 - 08:45	742
18	Av. Norte / Rua Pe. Lemos	66	A-C	Secundária	M	07:45 - 08:45	426
19	Av. Norte / Rua Prof. José dos Anjos	364	A-C	Principal	M	07:00 - 08:00	1376
20	Av. Norte / Rua Prof. José dos Anjos	364	F-A	Principal	M	07:00 - 08:00	4177
21	Av. Norte / Rua Prof. José dos Anjos	364	A-F	Principal	T/N	17:00 - 18:00	1132
22	Av. Dom. Ferreira / Rua Pereira da Costa	142	A-D	Principal	T/N	17:00 - 18:00	1030
23	Av. Dom. Ferreira / Rua Pereira da Costa	142	B-E	Principal	T/N	17:15 - 18:15	866
24	Av. Dom. Ferreira / Rua Cel. Benedito Chaves	128	B-E	Principal	T/N	17:30 - 18:30	1061
25	Av. Dom. Ferreira / Rua Cel. Benedito Chaves	128	C-F	Principal	T/N	17:00 - 18:00	867
26	Av. Dom. Ferreira / Rua Barão de S. Leão	129	C-F	Principal	T/N	17:00 - 18:00	603
27	Av. Dom. Ferreira / Ribeiro de Brito	155	C-E	Principal	T/N	17:15 - 18:15	434
28	Av. Dom. Ferreira / Ernesto de Paula Santos	217	B-DE	Principal	T/N	19:45 - 20:45	776
29	Av. Dom. Ferreira / Rua Thomé Gibson	200	A-D	Principal	T/N	17:15 - 18:15	1092
30	Av. Dom. Ferreira / Rua Thomé Gibson	200	B-E	Principal	T/N	17:45 - 18:45	937
31	Av. Cons. Aguiar / Rua Pereira da Costa	140	C-A	Principal	T/N	17:15 - 18:15	708
32	Av. Cons. Aguiar / Rua Thomé Gibson	2	C-A	Principal	T/N	17:45 - 18:45	785
33	Av. Cons. Aguiar / Bernardino Pessoa	125	D-B	Principal	T/N	18:00 - 19:00	656

item	Cruzamento	Semáforo	Movimento	Categoria	Pico	Horário de Pico	v (v/hr/f)
34	Av. Cons. Aguiar / Ernesto de Paula Santos	127	D-B	Principal	T/N	17:00 - 18:00	440

APÊNDICE C – TABELA DE SEMÁFOROS DESCONSIDERADOS COM % DE GIROS À ESQUERDA OU À DIREITA MAIOR QUE 10,5%

Item	Cruzamento	Semáforo	Movimento	Categoria	Pico	Hora Pico ICPS	Intervalo Programa CTTU	Programa CTTU	% giros
1	Av. Agamenon Magalhães / Rua Odorico Mendes	49	A-C	Secundária	M	07:15 - 08:15	06:30 - 09:00	1	45,3%
2	Av. Agamenon Magalhães / Rua Odorico Mendes	49	A-C	Secundária	T/N	14:15 - 15:15	09:00 - 20:00	2	25,4%
3	Av. Norte / Av. João de Barros	43	D-B	Principal	M	10:00 - 11:00	09:30 - 16:00	2	12,4%
4	Av. Norte / Av. João de Barros	43	C-A	Secundária	T/N	15:00 - 16:00	09:30 - 16:00	2	11,7%
5	Av. Norte / Rua Cônego Barata	62	A-C	Secundária	M	07:15 - 08:15	06:00 - 09:30	1	14,7%
6	Av. Norte / Rua Cônego Barata	62	D-B	Principal	M	06:45 - 07:45	06:00 - 09:30	1	13,9%
7	Av. Norte / Rua Cônego Barata	62	A-C	Secundária	T/N	16:45 - 17:45	16:00 - 20:30	3	20,0%
8	Av. Norte / Rua Cônego Barata	62	B-D	Principal	T/N	14:15 - 15:15	09:30 - 16:00	2	22,2%
9	Av. Norte / Rua Cônego Barata	62	D-B	Principal	T/N	17:00 - 18:00	16:00 - 20:30	3	11,6%
10	Av. Norte Miguel Arraes/ Rua da Aurora	243	C-A	Principal	T/N	14:15 - 15:15	09:30 - 16:00	2	10,6%

APÊNDICE D – TABELA DE CÁLCULO DA TAXA DE SATURAÇÃO

Cruzamento	Semáforo	Movimento	Categoria	Pico	Hora Pico ICPS	Intervalo Programa CTTU	Programa CTTU	Nº faixas	s0	Fhv	Fbb	Fa	Fw, Fg, Fp, Flu, Flt, Frt, Flpb, Frpb	s (v/h/f)
Av. Agamenon Magalhães / Rua Odorico Mendes	49	B-D	Principal	M	07:00 - 08:00	06:30 - 09:00	1	4	1900	0,99	0,75	0,9	1	1269,675
Av. Agamenon Magalhães / Rua Odorico Mendes	49	C-A	Secundária	M	10:00 - 11:00	09:00 - 20:00	2	3	1900	0,99	1,00	0,9	1	1692,9
Av. Agamenon Magalhães / Rua Odorico Mendes	49	B-D	Principal	T/N	14:15 - 15:15	09:00 - 20:00	2	4	1900	0,99	0,75	0,9	1	1269,675
Av. Agamenon Magalhães / Rua Odorico Mendes	49	C-A	Secundária	T/N	17:00 - 18:00	09:00 - 20:00	2	3	1900	0,99	1,00	0,9	1	1692,9
Av. Norte / Av. João de Barros	43	A-C	Secundária	M	06:30 - 07:30	06:00 - 09:30	1	2	1900	0,99	0,75	0,9	1	1269,675
Av. Norte / Av. João de Barros	43	B-D	Principal	M	06:30 - 07:30	06:00 - 09:30	1	2	1900	0,99	0,50	0,9	1	846,45
Av. Norte / Av. João de Barros	43	C-A	Secundária	M	10:00 - 11:00	09:30 - 16:00	2	2	1900	0,99	0,75	0,9	1	1269,675
Av. Norte / Av. João de Barros	43	A-C	Secundária	T/N	16:00 - 17:00	16:00 - 20:30	3	2	1900	0,99	0,75	0,9	1	1269,675
Av. Norte / Av. João de Barros	43	D-B	Principal	T/N	17:30 - 18:30	16:00 - 20:30	3	2	1900	0,99	0,50	0,9	1	846,45
Av. Norte / Rua Cônego Barata	62	B-D	Principal	M	06:15 - 07:15	06:00 - 09:30	1	2	1900	0,99	0,50	0,9	1	846,45
Av. Norte / Rua Cônego Barata	62	C-A	Secundária	M	07:15 - 08:15	06:00 - 09:30	1	3	1900	0,99	0,83	0,9	1	1410,75

Cruzamento	Semáforo	Movimento	Categoria	Pico	Hora Pico ICPS	Intervalo Programa CTTU	Programa CTTU	Nº faixas	s0	Fhv	Fbb	Fa	Fw, Fg, Fp, Flu, Flt, Frt, Flpb, Frpb	s (v/h/f)
Av. Norte / Rua Cônego Barata	62	C-A	Secundária	T/N	17:15 - 18:15	16:00 - 20:30	3	3	1900	0,99	0,83	0,9	1	1410,75
Av. Norte Miguel Arraes/ Rua da Aurora	24 3	D-B	Secundária	M	10:00 - 11:00	09:30 - 16:00	2	2	1900	0,99	1,00	0,9	1	1692,9
Av. Norte Miguel Arraes/ Rua da Aurora	24 3	C-A	Principal	M	07:45 - 08:45	09:30 - 16:00	2	2	1900	0,99	0,50	0,9	1	846,45
Av. Norte / Rua Nova Descoberta	65	G-E	Principal	M	07:00 - 08:00	06:00 -09:30	1	2	1900	0,99	0,50	0,9	1	846,45
Av. Norte / Rua Nova Descoberta	65	G-E	Principal	T/N	16:00 - 17:00	16:00 - 20:00	2	2	1900	0,99	0,50	0,9	1	846,45
Av. Norte / Rua Pe. Lemos	66	E-C	Principal	M	07:45 - 08:45	06:00 - 09:30	1	2	1900	0,99	0,50	0,9	1	846,45
Av. Norte / Rua Pe. Lemos	66	A-C	Secundária	M	07:45 - 08:45	06:00 - 09:30	1	1	1900	0,99	0,50	0,9	1	846,45
Av. Norte / Rua Prof. José dos Anjos	36 4	A-C	Principal	M	07:00 - 08:00	06:00 - 09:30	1	2	1900	0,99	0,50	0,9	1	846,45
Av. Norte / Rua Prof. José dos Anjos	36 4	F-A	Principal	M	07:00 - 08:00	06:00 - 09:30	1	2	1900	0,99	0,50	0,9	1	846,45
Av. Norte / Rua Prof. José dos Anjos	36 4	A-F	Principal	T/N	17:00 - 18:00	16:00 - 20:00	2	2	1900	0,99	0,50	0,9	1	846,45
Av. Dom. Ferreira / Rua Pereira da Costa	142	A-D	Principal	T/N	17:00 - 18:00	11:00 - 20:00	1	2	1900	0,99	1,00	0,9	1	1692,9
Av. Dom. Ferreira / Rua Pereira da Costa	142	B-E	Principal	T/N	17:15 - 18:15	11:00 - 20:00	1	3	1900	0,99	1,00	0,9	1	1692,9
Av. Dom. Ferreira / Rua Cel. Benedito Chaves	128	B-E	Principal	T/N	17:30 - 18:30	11:00 - 20:00	1	2	1900	0,99	1,00	0,9	1	1692,9
Av. Dom. Ferreira / Rua Cel. Benedito Chaves	128	C-F	Principal	T/N	17:00 - 18:00	11:00 - 20:00	1	3	1900	0,99	1,00	0,9	1	1692,9

Cruzamento	Semáforo	Movimento	Categoria	Pico	Hora Pico ICPS	Intervalo Programa CTTU	Programa CTTU	Nº faixas	s0	Fhv	Fbb	Fa	Fw, Fg, Fp, Flu, Flt, Frt, Flpb, Frpb	s (v/h/f)
Av. Dom. Ferreira / Rua Barão de S. Leão	129	C-F	Principal	T/N	17:00 - 18:00	11:00 - 20:00	1	3	1900	0,99	1,00	0,9	1	1692,9
Av. Dom. Ferreira / Ribeiro de Brito	155	C-E	Principal	T/N	17:15 - 18:15	11:00 - 20:00	1	3	1900	0,99	1,00	0,9	1	1692,9
Av. Dom. Ferreira / Ernesto de Paula Santos	217	B-DE	Principal	T/N	19:45 - 20:45	20:00 - 22:00	2	5	1900	0,99	1,00	0,9	1	1692,9
Av. Dom. Ferreira / Rua Thomé Gibson	200	A-D	Principal	T/N	17:15 - 18:15	11:00 - 20:00	1	2	1900	0,99	1,00	0,9	1	1692,9
Av. Dom. Ferreira / Rua Thomé Gibson	200	B-E	Principal	T/N	17:45 - 18:45	11:00 - 20:00	1	3	1900	0,99	1,00	0,9	1	1692,9
Av. Cons. Aguiar / Rua Pereira da Costa	140	C-A	Principal	T/N	17:15 - 18:15	11:00 - 20:00	1	3	1900	0,99	1,00	0,9	1	1692,9
Av. Cons. Aguiar / Rua Thomé Gibson	2	C-A	Principal	T/N	17:45 - 18:45	11:00 - 20:00	1	3	1900	0,99	1,00	0,9	1	1692,9
Av. Cons. Aguiar / Bernardino Pessoa	125	D-B	Principal	T/N	18:00 -19:00	11:00 - 20:00	1	3	1900	0,99	1,00	0,9	1	1692,9
Av. Cons. Aguiar / Ernesto de Paula Santos	127	D-B	Principal	T/N	17:00 - 18:00	11:00 - 20:00	1	3	1900	0,99	1,00	0,9	1	1692,9

APÊNDICE E – TABELA DE CÁLCULO DAS CONSTANTES C, G E K

Cruzamento	Semáforo	Movimento	Categoria	Pico	Hora Pico ICPS	Intervalo Programa CTTU	Programa CTTU	Nº faixas	v (v/h/f)	g (s)	C (s)	G (hr)	K
Av. Agamenon Magalhães / Rua Odorico Mendes	49	B-D	Principal	M	07:00 - 08:00	06:30 - 09:00	1	4	1168	72	120	0,011669	0,001313
Av. Agamenon Magalhães / Rua Odorico Mendes	49	C-A	Secundária	M	10:00 - 11:00	09:00 - 20:00	2	3	201	39	105	0,00382	0,00159
Av. Agamenon Magalhães / Rua Odorico Mendes	49	B-D	Principal	T/N	14:15 - 15:15	09:00 - 20:00	2	4	698	66	105	0,011177	0,001253
Av. Agamenon Magalhães / Rua Odorico Mendes	49	C-A	Secundária	T/N	17:00 - 18:00	09:00 - 20:00	2	3	411	39	105	0,00382	0,00159
Av. Norte / Av. João de Barros	43	A-C	Secundária	M	06:30 - 07:30	06:00 - 09:30	1	2	534	74	130	0,011387	0,001384
Av. Norte / Av. João de Barros	43	B-D	Principal	M	06:30 - 07:30	06:00 - 09:30	1	2	888	59	130	0,007188	0,002603
Av. Norte / Av. João de Barros	43	C-A	Secundária	M	10:00 - 11:00	09:30 - 16:00	2	2	586	59	110	0,008495	0,001468
Av. Norte / Av. João de Barros	43	A-C	Secundária	T/N	16:00 - 17:00	16:00 - 20:30	3	2	594	54	120	0,006502	0,00175
Av. Norte / Av. João de Barros	43	D-B	Principal	T/N	17:30 - 18:30	16:00 - 20:30	3	2	849	64	120	0,009188	0,002215
Av. Norte / Rua Cônego Barata	62	B-D	Principal	M	06:15 - 07:15	06:00 - 09:30	1	2	752	64	130	0,008481	0,0024
Av. Norte / Rua Cônego Barata	62	C-A	Secundária	M	07:15 - 08:15	06:00 - 09:30	1	3	511	64	130	0,008481	0,00144
Av. Norte / Rua Cônego Barata	62	C-A	Secundária	T/N	17:15 - 18:15	16:00 - 20:30	3	3	475	46	120	0,004688	0,001849
Av. Norte Miguel Arraes/ Rua da Aurora	243	D-B	Secundária	M	10:00 - 11:00	09:30 - 16:00	2	2	407	40	118	0,003581	0,001743
Av. Norte Miguel Arraes/ Rua da Aurora	243	C-A	Principal	M	07:45 - 08:45	09:30 - 16:00	2	2	1046	77	118	0,013597	0,00181

Cruzamento	Semáforo	Movimento	Categoria	Pico	Hora Pico ICPS	Intervalo Programa CTTU	Programa CTTU	Nº faixas	v (v/h/f)	g (s)	C (s)	G (hr)	K
Av. Norte / Rua Nova Descoberta	65	G-E	Principal	M	07:00 - 08:00	06:00 - 09:30	1	2	803	79	125	0,01352	0,001869
Av. Norte / Rua Nova Descoberta	65	G-E	Principal	T/N	16:00 - 17:00	16:00 - 20:00	2	2	922	76	120	0,013021	0,001865
Av. Norte / Rua Pe. Lemos	66	E-C	Principal	M	07:45 - 08:45	06:00 - 09:30	1	2	742	66	125	0,009389	0,002238
Av. Norte / Rua Pe. Lemos	66	A-C	Secundária	M	07:45 - 08:45	06:00 - 09:30	1	1	426	32	125	0,002136	0,004615
Av. Norte / Rua Prof. José dos Anjos	364	A-C	Principal	M	07:00 - 08:00	06:00 - 09:30	1	2	1376	103	125	0,02312	0,001434
Av. Norte / Rua Prof. José dos Anjos	364	F-A	Principal	M	07:00 - 08:00	06:00 - 09:30	1	2	4177	49	125	0,00512	0,003014
Av. Norte / Rua Prof. José dos Anjos	364	A-F	Principal	T/N	17:00 - 18:00	16:00 - 20:00	2	2	1132	98	120	0,02178	0,001447
Av. Dom. Ferreira / Rua Pereira da Costa	142	A-D	Principal	T/N	17:00 - 18:00	11:00 - 20:00	1	2	1030	84	120	0,015947	0,000844
Av. Dom. Ferreira / Rua Pereira da Costa	142	B-E	Principal	T/N	17:15 - 18:15	11:00 - 20:00	1	3	866	84	120	0,015947	0,000844
Av. Dom. Ferreira / Rua Cel. Benedito Chaves	128	B-E	Principal	T/N	17:30 - 18:30	11:00 - 20:00	1	2	1061	79	120	0,014083	0,000897
Av. Dom. Ferreira / Rua Cel. Benedito Chaves	128	C-F	Principal	T/N	17:00 - 18:00	11:00 - 20:00	1	3	867	79	120	0,014083	0,000897
Av. Dom. Ferreira / Rua Barão de S. Leão	129	C-F	Principal	T/N	17:00 - 18:00	11:00 - 20:00	1	3	603	71	120	0,011343	0,000998
Av. Dom. Ferreira / Ribeiro de Brito	155	C-E	Principal	T/N	17:15 - 18:15	11:00 - 20:00	1	3	434	73	120	0,012	0,000971

Cruzamento	Semáforo	Movimento	Categoria	Pico	Hora Pico ICPS	Intervalo Programa CTTU	Programa CTTU	Nº faixas	v (v/h/f)	g (s)	C (s)	G (hr)	K
Av. Dom. Ferreira / Ernesto de Paula Santos	217	B-DE	Principal	T/N	19:45 - 20:45	20:00 - 22:00	2	5	776	61	100	0,01	0,000968
Av. Dom. Ferreira / Rua Thomé Gibson	200	A-D	Principal	T/N	17:15 - 18:15	11:00 - 20:00	1	2	1092	91	120	0,01875	0,000779
Av. Dom. Ferreira / Rua Thomé Gibson	200	B-E	Principal	T/N	17:45 - 18:45	11:00 - 20:00	1	3	937	91	120	0,01875	0,000779
Av. Cons. Aguiar / Rua Pereira da Costa	140	C-A	Principal	T/N	17:15 - 18:15	11:00 - 20:00	1	3	708	90	120	0,018336	0,000788
Av. Cons. Aguiar / Rua Thomé Gibson	2	C-A	Principal	T/N	17:45 - 18:45	11:00 - 20:00	1	3	785	90	120	0,018336	0,000788
Av. Cons. Aguiar / Bernardino Pessoa	125	D-B	Principal	T/N	18:00 - 19:00	11:00 - 20:00	1	3	656	75	120	0,012676	0,000945
Av. Cons. Aguiar / Ernesto de Paula Santos	127	D-B	Principal	T/N	17:00 - 18:00	11:00 - 20:00	1	3	440	69	120	0,010704	0,001027

APÊNDICE F – TABELAS DE DELAYS VERSUS PERCENTUAL DE V.A. NA FROTA

Headway médio (s)	% de V.A.	Semáforo 49 - M / B-D PRINCIPAL	Semáforo 49 - M / C-A	Semáforo 49 - T/N / B-D PRINCIPAL	Semáforo 49 - T/N / C-A	Semáforo 43 - M / A-C	Semáforo 43 - M / B-D PRINCIPAL	Semáforo 43 - M / C-A	Semáforo 43 - T/N / A-C	Semáforo 43 - T/N / B-D PRINCIPAL	Semáforo 43 - T/N / D-B PRINCIPAL
		Delays (s)									
1,50	0%	52,51	7,80	54,17	10,94	35,35	23,69	32,98	21,28	32,98	35,44
1,50	0,10%	52,51	7,80	54,17	10,94	35,35	23,69	32,98	21,28	32,98	35,44
1,49	1%	52,51	7,80	54,17	10,94	35,35	23,69	32,98	21,28	32,98	35,44
1,45	5%	52,51	7,80	54,17	10,94	35,31	23,69	32,98	21,28	32,98	35,44
1,40	10%	52,51	7,80	54,17	10,94	35,18	23,69	32,98	21,28	32,98	35,44
1,00	50%	52,51	7,63	37,14	10,94	31,54	23,69	24,83	21,28	32,98	35,44
0,50	100%	30,30	7,16	24,64	7,48	23,83	19,89	18,07	13,86	21,65	24,84

Headway médio (s)	% de V.A.	Semáforo 62 - M / B-D PRINCIPAL	Semáforo 62 - M / C-A	Semáforo 62 - T/N / C-A	Semáforo 243 - M / D-B	Semáforo 243 - M / C-A - PRINCIPAL	Semáforo 65 - M / G-E PRINCIPAL	Semáforo 65 - T/N / G-E - PRINCIPAL	Semáforo 66 - M / E-C - PRINCIPAL	Semáforo 66 - M / A-C	Semáforo 129 - T/N / C-F - PRINCIPAL
		Delays (s)									
1,50	0%	30,07	23,93	12,73	8,48	70,44	66,13	63,92	35,81	5,17	31,72
1,50	0,10%	30,07	23,93	12,73	8,48	70,44	66,13	63,92	35,81	5,17	31,72
1,49	1%	30,07	23,93	12,72	8,48	70,44	66,13	63,92	35,81	5,17	31,72
1,45	5%	30,07	23,90	12,71	8,48	70,44	66,13	63,92	35,81	5,17	31,69
1,40	10%	30,07	23,84	12,68	8,47	70,44	66,13	63,92	35,81	5,17	31,61
1,00	50%	30,07	21,86	11,73	8,06	70,44	66,13	63,92	35,81	5,17	29,04
0,50	100%	21,69	17,36	9,51	7,01	41,62	35,59	36,79	23,88	4,62	23,17

Headway médio (s)	% de V.A.	Semáforo 155 - T/N / C-E - PRINCIPAL	Semáforo 217 - T/N / B-DE - PRINCIPAL	Semáforo 200 - T/N / A-D - PRINCIPAL	Semáforo 200 - T/N / B-E - PRINCIPAL	Semáforo 140 - T/N / C-A - PRINCIPAL	Semáforo 2 - T/N / C-A - PRINCIPAL	Semáforo 125 - T/N / D-B - PRINCIPAL	Semáforo 127 - T/N / D-B - PRINCIPAL	Semáforo 364 - M / A-C - PRINCIPAL	Semáforo 364 - T/N / A-F - PRINCIPAL
		Delays (s)									
1,50	0%	29,04	33,25	95,08	75,59	56,73	61,56	37,26	26,04	236,45	213,84
1,50	0,10%	29,04	33,25	95,08	75,59	56,73	61,56	37,26	26,04	236,45	213,84
1,49	1%	29,04	33,25	95,07	75,58	56,73	61,56	37,26	26,04	236,45	213,84
1,45	5%	29,02	33,20	94,80	75,43	56,66	61,47	37,22	26,02	236,45	213,84
1,40	10%	28,97	33,06	93,94	74,97	56,46	61,21	37,11	25,98	236,45	213,84
1,00	50%	27,46	29,13	72,98	62,64	50,66	53,80	33,71	24,60	236,45	213,84
0,50	100%	23,62	21,25	42,99	41,39	38,35	39,04	26,20	21,10	90,84	70,71

Headway médio (s)	% de V.A.	Semáforo 142 - T/N / A-D - PRINCIPAL	Semáforo 142 - T/N / B-E - PRINCIPAL	Semáforo 128 - T/N / B-E - PRINCIPAL	Semáforo 128 - T/N / C-F - PRINCIPAL
		Delays (s)			
1,50	0%	73,30	95,68	67,86	74,20
1,50	0,10%	73,30	95,68	67,86	74,20
1,49	1%	73,30	95,68	67,85	74,20
1,45	5%	73,11	95,68	67,67	74,20
1,40	10%	72,55	95,68	67,11	74,20
1,00	50%	58,23	50,03	53,04	44,21
0,50	100%	36,01	34,60	32,04	30,57