



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE - UFCG
CENTRO DE TECNOLOGIA E RECURSOS NATURAIS - CTRN
UNIDADE ACADÊMICA DE ENGENHARIA CIVIL - UAEC

HÉLIO DA SILVA QUEIROZ JÚNIOR

**ESTUDO DA IMPLEMENTAÇÃO DE UM SISTEMA WSN DE
PRIORIZAÇÃO DO TRANSPORTE PÚBLICO COLETIVO POR
ÔNIBUS NUMA INTERSEÇÃO SEMAFÓRICA EM CAMPINA
GRANDE - PB**

CAMPINA GRANDE - PB

DEZEMBRO 2020

HÉLIO DA SILVA QUEIROZ JÚNIOR

ESTUDO DA IMPLEMENTAÇÃO DE UM SISTEMA WSN
DE PRIORIZAÇÃO DO TRANSPORTE PÚBLICO
COLETIVO POR ÔNIBUS NUMA INTERSEÇÃO
SEMAFÓRICA EM CAMPINA GRANDE - PB

Trabalho de Conclusão de Curso (TCC)
apresentado à Universidade Federal de Campina
Grande – UFCG, para encerramento do
componente curricular e conclusão da graduação
em Engenharia Civil.

Orientadora: Izabelle Marie Trindade Bezerra

Coorientadora: Sonaly Mendes Arruda

CAMPINA GRANDE – PB

DEZEMBRO 2020

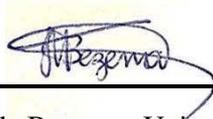
UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE TECNOLOGIA E RECURSOS NATURAIS
UNIDADE ACADÊMICA DE ENGENHARIA CIVIL

FOLHA DE APROVAÇÃO

ESTUDO DA IMPLEMENTAÇÃO DE UM SISTEMA WSN
DE PRIORIZAÇÃO DO TRANSPORTE PÚBLICO
COLETIVO POR ÔNIBUS NUMA INTERSEÇÃO
SEMAFÓRICA EM CAMPINA GRANDE – PB

Trabalho de Conclusão de Curso (TCC)
apresentado à Universidade Federal de Campina
Grande – UFCG, para encerramento do
componente curricular e conclusão da graduação
em Engenharia Civil.

Aprovado em: 11 de dezembro de 2020



Prof.ª Dr.ª Izabelle Marie Trindade Bezerra - Universidade Federal de Campina Grande
Orientadora

Eng. Sonaly Mendes Arruda - Universidade Federal de Campina Grande
Coorientadora

Prof.ª Dr.ª Marília Marcy Cabral de Araújo - Universidade Federal de Campina Grande
Examinador Interno

Prof.a Dr.a Isabelle Yruska de Lucena Gomes Braga - Universidade Federal da Paraíba
Examinador Externo

Prof. Dr. Oswaldo Cavalcanti da Costa Lima Neto.- Universidade Federal do Pernambuco
Examinador Externo

CAMPINA GRANDE – PB

DEZEMBRO 2020

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a minha tia Vilma da Silva Queiroz e aos meus irmãos Vinícius e Eduardo.

AGRADECIMENTOS

“*Em tudo dai graças*” - 1 Tessalonicenses 5:18. Agradeço ao Senhor meu Deus por todo o caminho que hoje me trouxe aqui.

Agradeço aos meus pais, Hélio e Érica, pois de tudo o que me deram, a educação, o respeito e o perdão são virtudes que me orgulho em herdar. Minha alegria é tê-los comigo em cada conquista.

Aos meus irmãos, Vinicius e Eduardo que são meu apoio, proteção e companhia desde sempre, pois sei que estando com vocês estou em casa.

Agradeço aos meus avós, Mauricéa e Eduardo, de onde vem minha fé e meu caráter, Stela e Severino, de onde aprendi sobre o carinho e afeto, aos meus tios Eraldo, Edinho, Wilson e Nena, de onde recebi o cuidado, as minhas tias Euristânia, Elis, Elma, Cláudia, Kátia e Vilma que tive como mães em muitos momentos e aos meus primos Júnior, Eduarda, Anderson, Kayllane, Mirna, Karol, Daniela, Jacob, Maurício, Senna, João, Paloma e a toda minha família pelo amor e confiança que sempre tiveram comigo.

Agradeço especialmente a minha orientadora, professora, mestra, amiga, Izabelle, não apenas pela oportunidade de aprender e me apaixonar por transportes, mas por me ensinar sobre a importância de ver, ouvir, conhecer e entender os outros, sobre a importância de sermos, sempre, nós mesmos. Estes momentos moldam quem sou e o que serei, mas não findam neste trabalho.

Agradeço também a minha primeira aluna, Beatriz, que me lembra, por sua inocente infância da importância do sorriso e da coragem.

Agradeço a minha professora, amiga e querida Marília, pelos conselhos, por todo apoio, pela oportunidade de encontrar, no final do curso, uma amizade que me proporcionou conhecer um mundo novo e que renovou minhas esperanças sobre o amanhã.

A minha amiga, professora, monitora, coorientadora, Sonaly, minha gratidão não basta diante da importância de lhe ter por perto e saber que estará sempre próxima quando precisar, a certeza que não estou só vem muito de ti.

Agradecer a Ana Beatriz, Bia, por Felipe, por seus pais, por suas tias, por seus avós, que me acolheram como, irmão, filho, sobrinho, neto. Agradeço a Bia por Bia, por mostrar a importância do amigo, sobre me ensinar a ser amigo, sobre me ensinar a ser irmão. O preço de uma amizade é uma moeda de valor impossível e sei disso pois tenho tua amizade Bia. Lembrar de ti nesse momento é lembrar de ti em toda a trajetória que nos trouxe até aqui, de uma companhia de almoço pra vida.

A minha inspiração diária, ao meu exemplo de tudo o que faço e de quem devo me tornar, alguém que é tão importante que título pra dar não há, eu não expresso gratidão apenas, expresso diretamente minha admiração, respeito, orgulho e vontade de ter para sempre perto. Sabrina, não há como terminar um texto sem fim, não como começar uma coisa infinita. De tudo aqui, eu te devo gratidão, te adoro infinitamente.

Os meus irmãos de curso, os companheiros do dia a dia, das madrugadas acordados e de toda conquista tida, Igor e Taty, lembro aqui cada momento, cada vitória para dizer: conseguimos!

Durante a construção desse projeto, o apoio que recebi, os sorrisos que me fizeram esquecer o cansaço, as mensagens de apoio e os abraços que me davam forças são os motivos de recordar de ti aqui, Lucas. Obrigado.

A minha família de Deus aqui na Terra, Chama Viva, meus presentes e minha salvação, meus agradecimentos.

E por fim, Adolfo, Alan, Carlos, Gilson, Larissa e Raones, neste ano impossível, vocês foram o motivo de que valesse a pena continuar todos os dias. Não há como agradecer algo de tamanho valor como a vida, mas a cada um de vocês, eu deixo meu abraço e meu muito obrigado.

“Só depende de nós a importância do que fazemos.”

(Bezerra, 2020)

RESUMO

O transporte público urbano é reflexo das demandas diretas de seus usuários, como os fatores sociais, econômicos e culturais que os definem. Dentre os parâmetros de análise da eficiência do transporte público por ônibus em uma cidade, o tempo de viagem e o custo são os de maior importância uma vez que implica diretamente no dia a dia dos usuários. Contudo, existe uma perda razoável de tempo nas interseções e nelas o transporte público por ônibus não possui nenhuma priorização, quando se é possível fazer com que os ônibus tenham diminuição no tempo total de viagem com a prioridade nos cruzamentos semaforicos. Diante disto, buscou-se uma alternativa que viesse a contribuir na qualidade do serviço oferecido pelo transporte público, sendo realizado estudo em uma interseção semaforica, na cidade de Campina Grande – PB, composta por faixa exclusiva e que apresenta tráfego intenso. Para tanto, foi desenvolvido um modelo de simulação da área objeto, utilizando o *software* de análise de tráfego PTV VISSIM, calibrado a partir do fluxo de veículos levantado em campo. Nesse estudo foram utilizadas duas lógicas de priorização do ônibus, a primeira é a lógica de redução no tempo de verde e a segunda de mudança de fase do ciclo semaforico. Os resultados para a lógica de redução do tempo de verde dos demais semaforos da interseção obteve-se um acréscimo de 23,68% na velocidade de operação dos ônibus, validando a eficácia do sistema em melhorar a eficiência do transporte público com soluções de lógica operacional de tráfego.

Palavras-chave: Simulação; Transporte Público; Ônibus; Priorização.

ABSTRACT

Urban public transport is a reflection of the direct demands of its users, such as the social, economic and cultural factors that define them. Among the parameters for analyzing the efficiency of public transport by bus in a city, travel time and cost are the most important since it directly affects the daily lives of users. However, there is a reasonable loss of time at the intersections and public transport by bus does not have any prioritization, when it is possible to make the buses have a reduction in the total travel time with priority at traffic lights. In view of this, an alternative was sought that would contribute to the quality of the service offered by public transport, and a study was carried out at a traffic light intersection, in the city of Campina Grande - PB, composed of an exclusive lane and with heavy traffic. For this purpose, a simulation model of the object area was developed, using the traffic analysis software PTV VISSIM, calibrated from the flow of vehicles surveyed in the field. In this study, two bus prioritization logics were used, the first is the logic of reducing the green time and the second is the phase change of the traffic light cycle, the results for the logic of reducing the green time of the other traffic lights of the intersection obtained an increase of 23.68% in the speed of operation of the buses, validating the effectiveness of the system in improving the efficiency of public transport with solutions of operational logic of traffic.

Keywords: Simulation; Public transportation; Bus; Prioritization.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1_ População residente no Brasil, por situação de domicílio (1940/2010).	20
Figura 2_ Círculo vicioso da falta de planejamento urbano.....	25
Figura 3_ O Transporte de Canberra na Austrália. Ocupação dos veículos com 69 passageiros.....	26
Figura 4_ Esquema do sistema master-slave de conexão entre o semáforo e o ônibus..	37
Figura 5_ Módulo Transceptor Wireless NRF24L01 de 2.4GHz com antena.....	38
Figura 6_ Modelo de car following de Wiedemann.	40
Figura 7_ Relação entre distância mínima de following (d) e velocidade (v) para algoritmos de car-following W74 e W99.....	41
Figura 8_ Avenidas Canal e Floriano Peixoto.....	45
Figura 9_ Trecho analisado entre a Rua João Florentino e a Avenida Vinte e Sete de Julho.	46
Figura 10_ Locação dos Semáforos contidos na interseção.....	46
Figura 11_ Fluxograma das etapas realização da metodologia.	48
Figura 12_ Estágios de conexão do sistema.	50
Figura 13_ Tempo de verde ampliado, (a) geometria simples, (b) geometria complexa.	50
Figura 14_ Estágios que compõem o ciclo semafórico, caso real.	52
Figura 15_ Pontos de coleta de dados nos semáforos da interseção.....	52
Figura 16_ Modelo real de simulação.....	53
Figura 17_ Variação nos parâmetros de calibração aplicados nas classes 1, 2, 3 e 4 de modelos. (a) Intervalo de variação dos parâmetros CC6 a CC9. (b) Intervalo de variação dos parâmetros CC3 e CC6. (c) Intervalo de variação dos parâmetros CC4 e CC5. (d) Intervalo de variação dos parâmetros CC7, CC8 e CC9.....	57
Figura 18_ Configuração final da simulação (elementos 3D incluídos). (a) Detalhes Av. Canal, FIEP. (b) Detalhes interseção. (c) Visão geral da interseção e elementos 3D incluídos.	59
Figura 19_ Tempo requerido entre o Input da Rua Campos Sales (semáforo 3) e o ponto de coleta de dados à 159,73m.....	61
Figura 20_ Vias participantes da interseção, a) Avenida Canal sentido (1) Catolé-Centro (CAT-CENT) e (2) Centro-Católé (CENT-CAT), b) Rua Campos Sales, (c) Rua Quebra Quilos e (d) imagem de satélite da interseção.	63

Figura 21_ Movimentações possíveis nas vias integrantes da interseção estudada, sendo (a) Av Canal (CAT-CENT), (b) Av Canal (CENT-CAT) e (c) Rua Campos Sales.....	64
Figura 22_ Áreas conflitantes no modelo simulado criado utilizando o PTV VISSIM.	65
Figura 23_ Ciclo semafórico, caso real.....	66
Figura 24_ Trânsito típico para a interseção analisada.	67
Figura 25_ Distribuição média dos tipos de veículos observados por ciclo semafórico.	67
Figura 26_ Resumo dos volumes de veículos por ciclo semafórico, com as margens adicionais de 10%, 20% e 30%.....	69
Figura 27_ Volume de veículos por tempo de verde (nas datas e horários definidos) para o semáforo 1 (a), para o semáforo 2 (b) e para o semáforo 3 (c). A média em azul e as margens adicionais de 10% (verde), 20% (amarelo) e 30% (vermelho).	69
Figura 28_ Input dos ônibus na simulação, tempos de partida definidos como 1 veículo por minuto simulado.	72
Figura 29_ Locação das paradas de ônibus 01 (FIEP) e 02 (Conselho tutelar 04).....	72
Figura 30_ Tempo estimado de chegada dos ônibus nas paradas do trecho selecionado.	73
Figura 31_ Distância conectado do ônibus com o semáforo. (a) Esquema de conexão com o semáforo. (b) Esquema de conexão, escala real.	76
Figura 32_ Ciclo semafórico da lógica mudança de fase.....	77
Figura 33_ Configuração do Signal Head referente ao semáforo 01.....	77
Figura 34_ Comparação entre as quantidades de veículos entre os modelos de calibração (AI) e os dados de campo (REAL).	78
Figura 35_ Variação da quantidade de veículos no intervalo de simulação para os modelos de redução de tempo de verde sem verde ampliado (W99 AI).	79
Figura 36_ Variação da quantidade de veículos no intervalo de simulação por faixa da Av. Canal (CAT-CENT) para os modelos de redução de tempo de verde, sem a aplicação do tempo de verde ampliado.	80
Figura 37_ Variação da quantidade de veículos no intervalo de simulação para os modelos de redução de tempo de verde com verde ampliado. (W99 AI).....	80
Figura 38_ Variação da quantidade de veículos no intervalo de simulação por faixa da Av. Canal (CAT-CENT) para os modelos de redução de tempo de verde, com a aplicação do tempo de verde ampliado. (W99 AI)	81

Figura 39_Varição no comprimento máximo da fila de veículos no intervalo de simulação para os modelos de redução de tempo de verde sem verde ampliado. (W99 AI)	83
Figura 40_Varição no comprimento máximo da fila de veículos no intervalo de simulação para os modelos de redução de tempo de verde com verde ampliado. (W99 AI)	83
Figura 41_ Variação na velocidade média de operação no intervalo de simulação, correspondentes as faixas controladas pelo semáforo 01, para os modelos: (a) W99 AI sem o tempo de verde ampliado. (b) W99 AI com o tempo de verde ampliado.	86

LISTA DE TABELAS

Tabela 1_ Emissões de CO ² (kg CO ² /km) do automóvel e do ônibus.	26
Tabela 2_ Posição das cidades brasileiras nos 100 primeiros colocados no Ranking de maiores congestionamentos analisados.	27
Tabela 3_ Parâmetros de Calibração para o modelo de car following Wiedemann 99. ..	42
Tabela 4_ Parâmetros de calibração para o motorista brasileiro.	43
Tabela 5_ Evolução da Frota de Campina Grande.	44
Tabela 6_ Classe de modelos de Calibração 01.	55
Tabela 7_ Classe 02: Modelos de Calibração Cauteloso Modificado.	56
Tabela 8_ Classe 03: Modelos de Calibração Agressivo Modificado.	56
Tabela 9_ Classe 04: Modelos de Calibração Default Modificado.	56
Tabela 10_ Classe 05: Modelos de Calibração Aleatórios.	58
Tabela 11_ Tempos de ciclos reduzidos.	60
Tabela 12_ Comprimento dos trechos definidos para medição do tempo de viagem. ...	62
Tabela 13_ Largura média e número de faixas por via.	64
Tabela 14_ Conflitos existentes entre as vias da interseção.	65
Tabela 15_ Tempo de fase para os semáforos da interseção.	66
Tabela 16_ Fatores de Equivalência para UCP.	68
Tabela 17_ Valores de referência para calibração da simulação [UCP/sverde].	70
Tabela 18_ Inputs utilizados nas simulações.	70
Tabela 19_ Linhas de ônibus selecionadas e os horários de circulação para o intervalo de 30 minutos entre as 11:30 e 12:00 horas.	71
Tabela 20_ Maior oferta de ônibus em intervalo de 10 minutos.	71
Tabela 21_ Parâmetros definidos para os ônibus.	73
Tabela 22_ Modelo A: Parâmetros de calibração W74 (default).	73
Tabela 23_ Modelo B: Parâmetros de calibração W99 (default).	74
Tabela 24_ Quantidade de veículos por ciclo semafórico [UCP's/sverde]. Caso A (W74 default).	74
Tabela 25_ Quantidade de veículos por ciclo semafórico [UCP's/sverde]. Caso B (W99 default).	74
Tabela 26_ Quantidade de veículos por ciclo semafórico [UCP's/sverde]: Percentual de aproximação. Modelos A e B (W74 e W99 default).	74

Tabela 27_ Quantidade de veículos por ciclo semafórico [UCP's/sVerde]: Percentual de aproximação. Casos C e D (cauteloso e agressivo W99).....	75
Tabela 28_ Quantidade de veículos por ciclo semafórico [UCP's/sverde]: Percentual de aproximação. Modelos O e AI.....	75
Tabela 29_ Tempo de verde ampliado para a interseção.	76
Tabela 30_ Quantidade de veículos por tempo total de simulação: Caso real (W99 AI).	78
Tabela 31_ Quantidade de veículos por tempo total de simulação: Caso mudança de fase (W99 AI).	82
Tabela 32_ Comprimento máximo da fila de veículos: Caso Real.....	82
Tabela 33_ Comprimento máximo da fila de veículos: Caso mudança de fase.	84
Tabela 34_ Tempo médio de viagem e velocidade média de operação: Caso Real (W99 AI).	85
Tabela 35_ Variação percentual da velocidade média de operação em relação ao caso real.	86
Tabela 36_ Velocidade média de operação e tempo médio de viagem: Casos Real e Mudança de fase (W99 AI).	87

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1_ Headway mínimo definido pelo modelo Wiedemann 74.....	41
Equação 2_ Cálculo do Input total a ser aplicado na simulação. Erro! Indicador não definido.	
Equação 3_ Unidade de controle de veículos.....	53

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	17
2. OBJETIVOS	19
2.1. Objetivo Geral	19
2.2. Objetivos Específicos	19
3. REFERENCIAL TEÓRICO	20
3.1. Cidade	20
3.1.1. Cidades, a Industrialização e a Urbanização	20
3.1.2. Cidades e Pessoas	21
3.1.3. Cidades Sustentáveis	22
3.1.4. Cidades Inteligentes	23
3.2. Mobilidade Urbana	24
<i>Questão: Homem x Automóvel</i>	25
3.3. Tráfego nos Países em Desenvolvimento	27
3.4. Transporte Público Urbano: Ônibus	28
3.5. Sistemas de Otimização	29
3.5.1. BRT	29
3.5.2. Faixa Exclusiva para Ônibus	30
3.5.3. Tendências Futuras	31
<i>Intelligent Transportation Systems (ITS)</i>	31
<i>Transit Signal Priority (TSP)</i>	31
<i>Sistema de Controle de Velocidade</i>	32
3.6.1. Sistemas de detecção veicular	33
<i>IR (Infravermelho)</i>	34
<i>Internet das Coisas (Internet of Things – IOT)</i>	34
<i>Optical Wireless Communication _ OWC</i>	35
<i>Inteligência Artificial</i>	35
<i>Sistema de Sensores Wireless _ WSN</i>	36
4. FERRAMENTAS TECNOLÓGICAS E COMPUTACIONAIS	37
4.1. Arduino	37
4.2. Simulações	38
4.2.1. <i>Car following</i>	39
<i>Wiedemann 74 e 99 (W74 e W99)</i>	40
4.2.2. PTV VISSIM	42

	<i>Wiedemann no PTV VISSIM</i>	43
5.	ESTUDO DE CASO	44
6.	METODOLOGIA	48
6.1.	Sistemas Propostos: Lógicas De Priorização.....	49
6.1.1.	Funcionamento do sistema	49
6.1.2.	Estágios Ampliados: ampliação do tempo de verde	50
6.2.	Simulações	51
6.2.1.	Calibração do Caso Real	53
6.2.2.	Lógicas de Priorização	58
6.2.2.1.	Redução no tempo de verde	59
6.2.2.2.	Mudança de fase	60
6.2.3.	Saídas das Simulações.....	61
7.	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	63
7.1.	Calibração do Caso Real.....	63
7.1.1.	Parâmetros de Configuração	63
7.1.2.	Lógica de Comportamento	73
7.2.	Lógicas de priorização	75
7.2.1.	Redução do tempo de verde	75
7.2.2.	Mudança de Fase	77
7.3.	Saídas das Simulações	78
7.3.1.	Quantidade de Veículos	78
a)	Caso Real.....	78
b)	Lógicas de priorização.....	79
7.3.2.	Comprimento máximo das filas de veículos	82
a)	Caso Real.....	82
b)	Lógicas de priorização.....	82
7.3.3.	Tempo de viagem e velocidade média de operação.....	84
a)	Caso Real.....	84
b)	Lógicas de Priorização.....	85
8.	CONCLUSÕES.....	88
9.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	90

1. INTRODUÇÃO

O transporte público é consequência direta dos processos de urbanização, visto que, as demandas provenientes de uma população em expansão são refletidas na necessidade de ofertar sistemas de transporte que garantam a realização dessas viagens de forma eficiente, efetiva, sustentável e igualitária.

Deste modo, os carros foram se tornando uma das formas de transporte de maior prioridade, e os impactos decorrentes de um desenvolvimento baseado no automóvel abrangem critérios além das limitações geográficas, tornando-se relevante na denominada “contabilidade verde”, devido ao consumo massivo de energia, pelas consequentes emissões de carbono e pela pesada poluição gerada (GEHL, 2013).

Países em desenvolvimento dependem de meios motorizados, principalmente o transporte público, sendo o ônibus (e suas variações) o meio de transporte mais utilizado. Enquanto os automóveis trafegam muito mais facilmente pelo sistema viário, o transporte público (anda-para) nestes países sofre perante à precariedade dos esquemas operacionais na maioria dos casos, com problemas diversos como a falta de fiscalização sobre estacionamento irregular, pontos de parada congestionados, etc. (VASCONCELLOS, 2000).

Além disso, a implantação de sistemas de transportes público urbano de alta capacidade ou a modernização dos sistemas atuantes é custosa e demorada, mesmo que relativamente inferior quando comparada as infraestruturas voltadas ao auto. Embora ela deva ser feita, torna-se necessária a racionalização e modernização dos demais sistemas de transportes (CORREIA, 2019).

Entretanto, priorizar o fluxo dos ônibus nas cidades atende aos princípios apresentados na Lei Nº 12.587 de 3 de janeiro de 2012, a Lei de Mobilidade Urbana do Brasil, de forma que, deve-se incentivar as práticas de modernização dos sistemas de controle e operação de tráfego, como os semáforos.

O uso de tecnologias capazes de agregar eficiência e autonomia aos sistemas de transporte público nas cidades, são vertentes que enfrentam impasses econômicos e de especialização ante a sua formulação e aplicação.

Ao desenvolver sistemas de baixo custo que visem apresentar respostas benéficas ao trânsito dos transportes públicos coletivos, assegura-se a equidade dos serviços urbanos para uma maioria significativa da população.

Para o município de Campina Grande – PB, iniciativas de aperfeiçoamento das vias urbanas para acomodar os fluxos demandados dos veículos destinados ao transporte público coletivo, demonstram uma acentuada preocupação com a melhoria dos serviços prestados e, conseqüentemente, o bem-estar dos usuários, ao serem adotadas medidas que priorizem redução nos tempos médios de viagens nas rotas das principais linhas de ônibus (uso de faixas exclusivas para ônibus nas principais vias da cidade) e a centralização das rotas por meio de integrações (temporárias e fixas).

Portanto, esta pesquisa tem por objetivo viabilizar métodos de otimização do transporte público coletivo. Para isto utilizou o software “*Transit Signal Priority* (Sinal de Trânsito Prioritário)” para desenvolver e validar sistemas lógicos que possam assegurar reduções no tempo de percurso das rotas dos ônibus que trafegam pela Avenida Canal, sentido Terminal de Integração no município de Campina Grande-PB, garantindo melhores condições de viagem aos usuários deste modal.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo Geral

Formulação e validação de um sistema lógico de detecção veicular baseado no princípio das redes de sensores *wireless*, WSN, que prioriza o transporte público por ônibus que trafegam em faixas exclusivas em interseção semafórica na cidade de Campina Grande - PB.

2.2. Objetivos Específicos

- a) Gerar microssimulações que retratem isoladamente a interseção nos dias e horários de maior tráfego;
- b) Calibrar o modelo eletrônico através dos dados de infraestrutura e fluxo médio diário de veículos;
- c) Aplicar os sistemas lógicos que priorizem o ônibus que utilize a faixa exclusiva na simulação, permitindo averiguar a eficiência obtida;
- d) Propor uma solução que melhor se adeque a situação em campo, permitindo a sua futura aplicação.

3. REFERENCIAL TEÓRICO

3.1. Cidade

3.1.1. Cidades, a Industrialização e a Urbanização

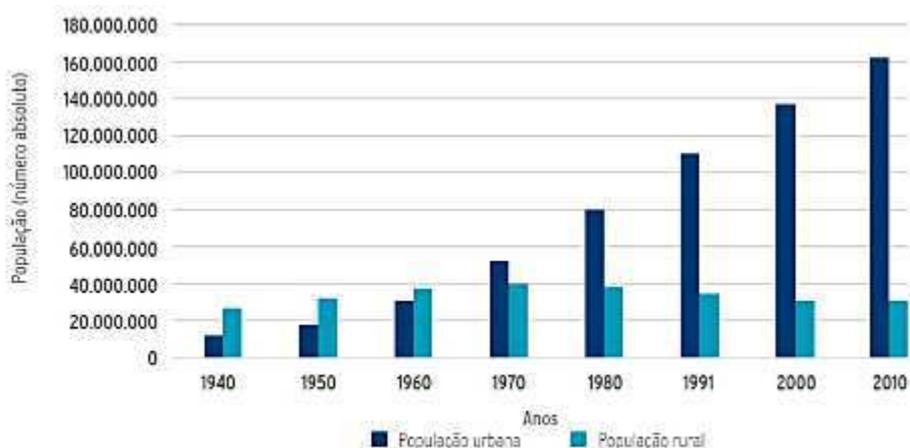
As cidades são mais do que um aglomerado populacional, sua definição remete aos exercícios e costumes de uma sociedade sobre o meio disponível. Caracterizar uma cidade é, então, caracterizar o cotidiano de seus habitantes.

Nas últimas décadas, desde os anos 70, as cidades se apresentam como concentrações de interesses econômicos e sociais, responsáveis por agregar em sua infraestrutura, além das habitações, indústrias, comércio, serviços, centros de tecnologia e ensino, dentre outros.

Ao seguir uma linha histórica de desenvolvimento, verifica-se uma tendência generalista nas cidades em todo o mundo, onde a predominância e enfoque nas economias industriais foram organizadas devido ao suporte fornecido por massas trabalhadoras, redes de transporte, infraestrutura física, armazéns, lojas, escritórios e mercados consumidores para suprir as demandas de mercado (KNOX, 2016).

O crescimento populacional urbano é, uma realidade verificada nos últimos anos, com impactos diretos observados em momentos anteriores, como no êxodo rural brasileiro, Figura 1. Tal questão traz precauções em relação a um novo modelo de planejamento urbano a ser aplicado e quais as prioridades tomadas para a sua formulação (GEHL, 2013).

Figura 1_ População residente no Brasil, por situação de domicílio (1940/2010).



FONTE: Confederação Nacional dos Transportes, 2017.

O viés ambiental representa uma das maiores vertentes de debate no pensar urbanista moderno. Cidades de países industrializados e de grande contingente populacional caracterizam-se por conjuntos massivos de emissores dos mais diversos tipos de poluição.

Na China, por exemplo, o setor de transportes detém a quarta posição entre os maiores emissores de CO₂, sendo o modal rodoviário responsável pela maior parcela destas emissões, como apresentado por Zhang, Liu & Jianming (2019) . Os autores caracterizam os planos estatais de desenvolvimento econômico quinquenais, iniciados nos anos 2000, como os responsáveis pelo crescimento de fluxo de tráfego para o atendimento das demandas de insumos e, conseqüentemente, as elevadas taxas de emissão de poluentes nos anos seguintes.

Deste modo, definir planos e diretrizes a serem tomados pelas cidades como critérios para o desenvolvimento de modelos urbanísticos próprios, adequados as realidades individuais de cada local, mas que também garantam as demandas ambientais e sociais requeridas, partem, inicialmente, de análises individualizadas das relações entre os habitantes e a infraestrutura que esta comporta.

3.1.2. Cidades e Pessoas

A aproximação entre o indivíduo e o meio é uma característica direta do novo modelo urbanístico a ser desenvolvido.

A relação cotidiana das pessoas com a infraestrutura das cidades é reflexo direto da sua eficiência ao assegurar princípios constitucionais básicos de locomoção e seguridade. Contudo, a tendência observada é de comum acordo independente da região analisada, assim como apresentado por Gehl (2013) ao fazer um balanceamento das condições comuns aos pedestres nas principais cidades do mundo, caracterizando-as por comportarem: “Espaços limitados, obstáculos, ruído, poluição, risco de acidentes e condições geralmente vergonhosas são comuns para os habitantes, na maioria das cidades”.

Buscar uma integração entre soluções urbanísticas que reflitam em benefícios diretos de mobilidade a população, agregando soluções de infraestrutura economicamente rentáveis e viáveis, requer um aprofundamento nas mais diversas vertentes que compõem o cotidiano desta cidade, sendo o transporte urbano (privado ou público, individual ou

coletivo), devido ao seu elevado impacto ambiental e uso abrangente por toda a população, um dos setores que demandam maior atenção, (BARAT & BATISTA, 1973).

3.1.3. Cidades Sustentáveis

Estabelecer o transporte urbano como critério para a classificação das cidades, permite o gerenciamento sustentável da mesma, como define Vasconcellos (2000), ao tratar especificamente das principais cidades dos países em desenvolvimento, em que “[...] as políticas de transporte urbano constituem instrumentos muito importantes para gerenciar o crescimento das cidades de forma eficiente e sustentável”.

O conceito de cidades sustentáveis foi apresentado por Gehl (2013), ao refletir a cidade por meio da “mobilidade verde”, a qual permitiria uma integração entre o transporte público e modais individuais de baixo impacto ambiental, como andar a pé ou de bicicleta. Em suma os benefícios provenientes da “mobilidade verde” se destinam à economia e a salubridade do meio ambiente especificamente.

O autor ainda ressalta que o ponto crucial ao desenvolvimento de um plano urbanístico característico a uma cidade sustentável é atribuir políticas de atratividade ao uso dos sistemas de transporte público, a ponto de se desenvolverem sentimentos de segurança e conforto aos usuários em todos os trajetos abrangidos por este transporte.

A pertinência do título de “cidade verde” é correspondente direto de sistemas de transportes que visem a sustentabilidade do seu funcionamento, assim como apresentado nas discussões de Mayer (2016), ao retratar Freiburg (Alemanha), Estocolmo (Suécia), Portland (Estados Unidos), Masdar (Emirados Árabes Unidos), Güssing (Áustria) e Wildpoldsried (Alemanha) como cidades-modelo de um desenvolvimento urbano sustentável.

Mayer (2016) ainda atribui uma preocupação quanto à implantação de sistemas de transportes sustentáveis no mundo. Ao tratar como um exemplo de considerável importância o sistema de transporte público de Curitiba (Brasil), afirmando que:

“o grande desafio será desenvolver cidades verdes sustentáveis em países emergentes, onde há pressões urbanísticas e também desafios relacionados aos níveis de pobreza, limitações em temas de governança municipal e falta de recursos para implementar ideias verdes. No entanto, há numerosos exemplos de como as cidades nesses países estão se voltando para um desenvolvimento mais sustentável.”

3.1.4. Cidades Inteligentes

Uma outra vertente de desenvolvimento que agrega em sua concepção a defesa de uma relação benéfica entre usuários e infraestrutura, é a de aplicar diretamente as inovações tecnológicas ao uso dos sistemas de transporte urbano.

O conceito de cidades que utilizam a inteligência tecnológica para tratar o desenvolvimento dos sistemas de transportes é apresentado como um dos objetos de estudo e inovação mais difundidos no mundo.

As *Smart Cities*, se apresentam como um dispositivo estratégico que abrange fatores de produção urbana modernos com uma estrutura em comum e, em particular, para destacar a importância das Tecnologias de Informação e Comunicação (*Information and Communication Technologies _ ICT's*) que nos últimos 20 anos serviram para melhorar o perfil competitivo de uma cidade (CARAGLIU, DEL BO & NIJKAMP, 2011).

De forma a atender as demandas provenientes da visão de cidades inteligentes, o desenvolvimento de tecnologias urbanas que garantam uma resposta em tempo real e uma rede integrada de informações se fazem necessárias. Desta forma, a Internet das Coisas (*Internet of Thing _IoT*) intenciona explorar as mais avançadas tecnologias de comunicação para apoiar os serviços de valor agregado (humano e comercial) para administração da cidade e para os cidadãos (ZANELLA et al., 2014).

Souza (2016) caracteriza o emprego de inovações tecnológicas para a infraestrutura das cidades como critério a atribuição do título de “inteligente”, de modo que a demanda da população é o fator determinante na escolha e desenvolvimento de novas tecnologias, e assim, define exemplos de infraestrutura inteligente para o sistema urbano de transporte incluindo vias que monitoram o grau de congestionamento e os locais de maior probabilidade de acidentes, com ajuste da velocidade recomendada de tráfego conforme necessário; sistemas de ônibus que utilizam veículos com diferentes tamanhos em diferentes horários de acordo com a demanda.

3.2. Mobilidade Urbana

O inciso II do Art. 4º da Lei de Mobilidade Urbana do Brasil, Nº 12.587 de 3 de janeiro de 2012, define mobilidade urbana como a “condição em que se realizam os deslocamentos de pessoas e cargas no espaço urbano”.

Ao denotar-se o transporte urbano que compõe uma cidade, a mobilidade é reflexo direto do comportamento conjunto das viagens provenientes dos usuários, independentemente do modo (motorizados e não-motorizados), da classificação quanto ao objeto (passageiro ou de cargas), da característica do serviço (coletivo e individual) e da natureza do serviço prestado (público e privado). Portanto, as diretrizes que regem a Lei de Mobilidade Urbana do Brasil são caracterizadas por assegurar:

- A integração com a política de desenvolvimento urbano e respectivas políticas setoriais de habitação, saneamento básico, planejamento e gestão do uso do solo no âmbito dos entes federativos.
- A prioridade dos modos de transportes não motorizados sobre os motorizados e dos serviços de transporte público coletivo sobre o transporte individual motorizado.
- A integração entre os modos e serviços de transporte urbano.
- A mitigação dos custos ambientais, sociais e econômicos dos deslocamentos de pessoas e cargas na cidade e a priorização de projetos de transporte público coletivo estruturadores do território e indutores do desenvolvimento urbano integrado.

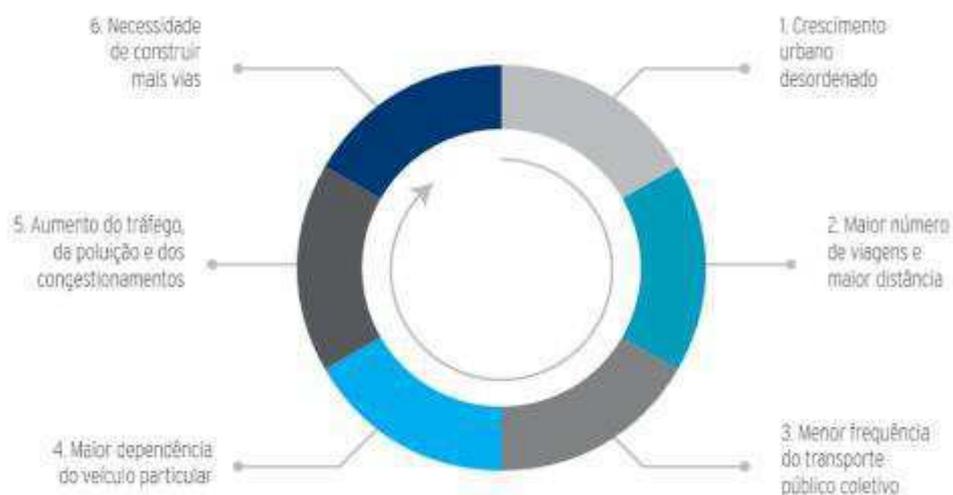
Deste modo, caracterizar uma acessibilidade universal e uma equidade no acesso dos cidadãos ao transporte público coletivo (incisos I e III do Art. 5º da Lei Nº12.587) em concordância a uma priorização dos modos de transportes não motorizados sobre os motorizados e dos serviços de transporte público coletivo sobre o transporte individual motorizado (inciso II do Art.6º da Lei Nº12.587) são princípios fundamentais a serem aplicados no desenvolvimento dos planos de mobilidade urbana municipais, assim como previsto no Art. Nº 187 da Constituição Federal (1988) e pelo § 2º do art. 40 da Lei Nº 10.257 de 10 de julho de 2001, o que se apresenta em discordância ao verificado nos principais centros urbanos brasileiros.

Questão: Homem x Automóvel

Determinar a influência do sistema de transporte no desenvolvimento urbano das cidades é falar sobre sistema de transporte rodoviário. Por décadas, a dimensão humana tem sido um tópico do planejamento urbano esquecido, enquanto várias outras questões ganham mais força, como a acomodação do vertiginoso aumento do tráfego de automóveis (GEHL, 2013).

Em discordância as definições legais caracterizadas pelas políticas de desenvolvimento urbano nacionais, verifica-se um ciclo tendencioso atuante nos principais centros urbanos brasileiros, os quais, em resposta a crescente frota de automóveis nas cidades, preconizam o transporte motorizado individual como fator predominante na configuração das vias locais, Figura 2.

Figura 2_Círculo vicioso da falta de planejamento urbano.



FONTE: Confederação Nacional dos Transportes, 2017.

No Brasil, em 2019, a frota de transportes rodoviários apresentou um crescimento de 3,94% em relação ao ano anterior, dos quais 48,58% do aumento é decorrente do acréscimo de 1.904.366 no número de automóveis, segundo dados do Ministério da Infraestrutura (2019).

A consequência direta ao modelo urbanístico voltado ao automóvel é a falta de espaço ofertado para permitir a continuidade das expansões já realizadas nas vias, o que arremete em planos que priorizam o transporte público como alternativa a demanda acentuada de viagens, porém, com uma redução na ocupação ocasionada pelos veículos, como afirma Gehl (2013) ao apresentar que:

“[...] grandes quantidades de carros invadiram as cidades do mundo todo, marcando o início do processo que corroeu as condições necessárias para as pessoas se envolverem em uma vida na cidade [...] alguns desenvolvimentos positivos surgiram como reação à falta de interesse pela vida urbana como se via por volta de 1960. Não é surpresa que progresso e melhorias sejam vistos principalmente nas áreas economicamente mais avançadas do mundo”.

A Confederação Nacional dos Transportes (2017) demonstra a relação entre as taxas de ocupação e emissão de CO₂ entre o automóvel e o ônibus, Tabela 1, e a *Cycling Promotion Fund* (2015), faz uma representação visual da taxa de ocupação entre o ônibus, o automóvel e a bicicleta, para um mesmo número de passageiros, como forma de conscientizar sobre o uso de modos de transporte saudáveis, Figura 3.

Tabela 1_ Emissões de CO₂ (kg CO₂/km) do automóvel e do ônibus.

Automóvel		Ônibus	
Ocupação média:	Ocupação máxima/ideal:	Ocupação baixa/capacidade ociosa:	Ocupação máxima:
1,3 pass./veículo	5 pass./veículo	15 pass./veículo	45 pass./veículo
Emissão		Emissão	
0,146 kg CO ₂ /km	0,038 kg CO ₂ /km	0,085 kg CO ₂ /km	0,028 kg CO ₂ /km

FONTE: Confederação Nacional dos Transportes, 2017.

Figura 3_ O Transporte de Canberra na Austrália. Ocupação dos veículos com 69 passageiros.



FONTE: The Cycling Promotion Fund (2015).

Com a problemática observada pelo crescimento acentuado do número de veículos, o engenheiro de transportes tem como responsabilidade acomodar todas as demandas de viagem provenientes da sociedade, provendo maneiras eficientes de satisfazer as necessidades de mobilidade da população (PAPACOSTAS & PREVEDOUROS, 2000),

e conseqüentemente, atribuir medidas para sanar as problemáticas observadas em detrimento do crescimento acentuado do número de automóveis.

3.3. Tráfego nos Países em Desenvolvimento

De forma a acompanhar o desenvolvimento do principal modal de transporte nacional, o Departamento Nacional de Trânsito _ DENATRAN, estabelece para as entidades do Sistema Nacional de Trânsito as informações necessárias para a análise da implantação ou manutenção dos polos geradores de tráfego, também denominados de atrativos de trânsito.

As metodologias de análise são caracterizadas pela formação de estudos de impacto na circulação viária do polo gerador de tráfego. São duas as formas de análise apresentadas, na primeira, o empreendedor elabora o estudo de acordo com um roteiro pré-estabelecido; na segunda, o próprio órgão executivo de trânsito ou rodoviário o desenvolve (DENATRAN, 2001).

Mesmo com a aplicação de métodos de controle e análise de tráfego, os principais centros urbanos brasileiros se enquadram entre os 100 maiores níveis de congestionamento no mundo, como expressos pela Tabela 2 a seguir:

Tabela 2_ Posição das cidades brasileiras nos 100 primeiros colocados no Ranking de maiores congestionamentos analisados.

Cidade	Ranking Mundial	Nível de Congestionamento	Varição em relação ao ano anterior
Recife	10 ^a	49%	+2%
São Paulo	21 ^a	42%	0%
Rio de Janeiro	22 ^a	42%	+2%
Salvador	35 ^a	38%	-3%
Fortaleza	50 ^a	35%	+1%
Porto Alegre	63 ^a	33%	+1%
Belo Horizonte	68 ^a	33%	+1%

FONTE :Adaptado de TomTom, 2018.

A pesquisa realizada entre 403 cidades de 56 países distintos de 6 continentes fornece estatísticas e informações imparciais sobre os níveis de congestionamento, com base nos dados de GPS e de comprimento de vias (rodovias e não-rodovias) nas cidades (TomTom, 2018).

Vasconcellos (2000) enumera as condições gerais de transporte e trânsito para os países em desenvolvimento, as quais devem partir como os princípios diretos na tomada de decisões mitigadoras:

- a) Uma dependência generalizada dos meios não motorizados de transporte (caminhada, bicicleta) e dos meios públicos de transporte, em comparação aos países industrializados, nos quais a disponibilidade de automóvel é elevada;
- b) Inequidade geral nas condições de transporte, com a maioria das pessoas submetidas a condições inadequadas de acessibilidade, segurança e conforto para realizar as atividades diárias, em comparação a uma distribuição equitativa do acesso nos países industrializados.

3.4. Transporte Público Urbano: Ônibus

Os sistemas de transporte não são construídos nem como expressões puras de engenhosidade da engenharia nem como monumentos de qualidade puramente estética. Eles são construídos para servir as pessoas em suas atividades econômicas, sociais e culturais (PAPACOSTAS & PREVEDOUROS, 2000).

Os motivos de viagens também são influenciados por fatores sociais, econômicos e culturais. O trabalho e a escola parecem ser os motivos universalmente mais relevantes, independentemente do local e do nível de renda do país. Enquanto a oferta de transporte privado (bicicleta, automóvel) está geralmente sujeita apenas as regras de mercado, a oferta de transporte público está sempre sujeita a alguma forma de regulamentação, mesmo quando a operação é responsabilidade privada (VASCONCELLOS, 2000).

Contudo, as configurações aplicadas ao sistema de ônibus urbano contribuem diretamente a uma acessibilidade desigual entre os usuários. Condensar as linhas nas áreas mais centrais condicionam a regiões periféricas menos servidas, assim como verificam Couto & Lobo (2019) ao relatarem para o Vetor Norte da região Metropolitana de Belo Horizonte que a distribuição desigual e concentrada dos itinerários de linhas de ônibus enseja níveis desiguais de acessibilidade ao transporte metropolitano, restando a deslocamentos complementares a capilaridade relacionada às porções territoriais afastadas desses itinerários.

Em suma, o efeito final de todas as dificuldades para os usuários cativos de transporte público é que uma longa viagem fora de casa é comum (VASCONCELLOS, 2000).

Pode-se afirmar que, nas grandes cidades brasileiras e em outros centros urbanos de países em desenvolvimento, os sistemas de ônibus encontram-se em transição, ainda que sejam observados falhas, retrocessos, perdas de oportunidades, etc. (CORREIA, 2019).

3.5. Sistemas de Otimização

A eficiência do sistema de transporte público é diretamente relacionada ao tempo de viagem e a regularidade do serviço. Desta forma, configurações que permitam melhorias na eficiência destes sistemas se fazem necessárias, sejam com a introdução de estruturas específicas, como o BRT e as faixas exclusivas para ônibus ou com o desenvolvimento de novas tecnologias ou métodos de gestão de tráfego especializados.

3.5.1. BRT

Os sistemas de Transporte Rápido por Ônibus (*Bus Rapid Transport* – BRT) correspondem a corredores de tráfego exclusivo que permitem o fluxo constante dos ônibus, conhecidas como “metrô com rodas de borracha”, tornando-se interessantes pelo fato de serem econômicas, de fácil implantação e por transportarem grande número de passageiros de forma rápida e confortável, por toda a cidade (GEHL, 2013).

A infraestrutura adotada em um projeto de BRT’s tem características semelhantes a sistemas de transportes sobre trilhos, como via segregada, centro de controle operacional e arrecadação externa (off-board) de tarifas, o que agiliza o embarque e o desembarque de passageiros e reduz o tempo médio de viagem, (FERREIRA, 2012).

Os BRT’s são erguidos sobre sistemas viários mais ou menos convencionais. Junte-se o fato de que parte, se não a maioria, das concessões desses sistemas são ocupados por grupos empresariais com origem na construção civil. O resultado é que uma parte dos projetos apresentam um viés de maior dedicação à Engenharia Civil do que à Engenharia de Transportes ou, ainda mais precisamente, à Engenharia de Operação de Sistemas de Transportes (CORREIA, 2019).

Um impacto secundário previsto a aplicação de um sistema BRT é o de que os usuários do carro das vias remanescentes sofrem com congestionamentos e maiores tempos de viagem, podendo o BRT atrair estes usuários devido terem prioridade e menor tempo de viagem.

Desta forma, McDonnell & Zellner (2011) investigaram o potencial desses impactos primários e secundários, desenvolvendo um modelo baseado em agentes protótipos para

investigar a natureza dessas interações e como elas se desenvolvem nos padrões de compartilhamento modal e tempos de viagem em todo o sistema; que permitisse testar os efeitos de várias suposições sobre o comportamento de agentes individuais, à medida que respondem a diferentes incentivos introduzidos por mudanças nas políticas de BRT ajudando os formuladores de políticas a examinar a eficácia de diferentes esquemas de BRT, aplicados a ambientes mais amplos.

Ao caracterizar o modelo a ser aplicado, a viabilidade técnico-financeira prediz a eficiência do uso com base em casos de sucesso, como no Brasil, onde o rápido crescimento urbano de Curitiba, concentrou-se em corredores lineares de crescimento ao longo das novas rotas de ônibus da cidade. Mais tarde, o transporte rápido por ônibus em suas faixas exclusivas serviu de inspiração para muitas cidades (GEHL, 2013).

3.5.2. Faixa Exclusiva para Ônibus

Um modelo de remediação aos congestionamentos formados pelo crescente número de veículos nas cidades é a transição do uso do veículo automóvel individual para o transporte público urbano, especificamente para o ônibus.

Desta forma, torna-se necessário atribuir configurações ao fluxo de veículos garantindo melhores condições aos usuários do transporte público tendo como respostas diminuição do tempo de viagem, pontualidade e frequência, além da cobrança de tarifas que assegurem a equidade do serviço prestado.

Uma alternativa é a implementação de faixas exclusivas para ônibus nas principais vias da cidade, de forma que, ao extinguir a disputa por espaços entre o automóvel e o transporte público (ônibus) se permita que haja tanto um ganho na velocidade média de tráfego do ônibus, quanto se evite o acúmulo de delays, ou acréscimos, no tempo de viagem dos automóveis devido ao embarque e desembarque de passageiros nos pontos de parada dos ônibus (BASSO *et al.*, 2011).

Oliveira & Júnior (2015) definem ainda que, os requisitos para a implantação de sistemas de transporte urbano modernos, como o caso de uma faixa exclusiva para ônibus em Luanda, dentre as questões sociais a serem consideradas no planejamento do sistema, a segurança, a equidade dos serviços e a formulação de atrativos a novos usuários devem ser previstos nos planos de execução, além de serem complementados por “uma estrutura

de gestão e técnica que habilite o órgão gestor a exercer, com proficiência, suas funções de planejamento, organização, direção, monitoramento e controle do sistema proposto”.

Assim sendo, assegurar a eficiência do trânsito requer a mudança do pensamento urbanístico voltado ao automóvel individual para o desenvolvimento de políticas de inserção e ajuste do transporte público, que garantam uma melhor distribuição dos espaços disponíveis, aliada a segurança ambiental e social proveniente do desenvolvimento de novas tecnologias em infraestrutura e logística.

3.5.3. Tendências Futuras

Atribuir novas tecnologias a manutenção dos fluxos de tráfego requer, a princípio, a reorganização funcional dos sistemas, buscando a sustentabilidade do serviço e benefícios no atendimento dos usuários de modo a aumentar a eficiência por meio da reestruturação das redes (CORREIA, 2019).

Assim, os sistemas podem se desenvolver em novas tecnologias de operação ou ferramentas de infraestrutura. De modo a atuar em concordância com os sistemas de comunicação web, aos conjuntos de infraestrutura e logística, introduzindo caracteres de automação e acionamento induzido ao controle do tráfego veicular.

Intelligent Transportation Systems (ITS)

Os Sistemas Inteligentes de Transporte (*Intelligent Transportation Systems* _ ITS), caracterizam a automação do sistema por meio de tecnologias de reconhecimento de fluxo, de modo a verificar modelos de aprimoramento de ferramentas já aplicadas, como os semáforos e os sensores de velocidade, e ao automatizar o acionamento dos sistemas com o uso computacional disponível, como o uso da inteligência artificial.

Transit Signal Priority (TSP)

O Sistema de Prioridade de Sinal (*Transit Signal Priority System* (TSP)) baseia-se na priorização do ônibus de serviço público em face aos semáforos conflitantes (Suarez, et al., 2018).

Com o propósito de aplicação de um sistema que otimizasse o tempo de viagem em um dos corredores centrais (tronco) da linha de transporte rápido por ônibus (BRT) da cidade de Medellín, Colômbia, a pesquisa apresentada por Suarez *et al.*, (2018)

caracterizaram o transporte público por ônibus como o fator de prioridade na operação de trânsito de um dos maiores centros urbanos da América Latina.

Sendo correspondente a um tempo adicional calculado de aproximadamente 30 minutos, as interseções semaforicas ao longo da via analisada tornaram-se os objetos passivos de resolução, cabendo uma solução direta de baixo impacto baseada na tecnologia *Transit Signal Priority* (TSP), em que os ônibus que utilizam a Linha 1 do BRT (METROPLUS) são classificados por tipo de prioridade em relação ao tempo de atraso acumulado verificado a partir da transmissão GPS de sua localização em tempo real. A computação dos dados num controlador central, definem o acionamento dos semáforos ao longo do percurso do ônibus, de modo que seja reestabelecido o tempo previsto para uma dada rota, além de que se verifique uma solução de efeito minimizado ao tráfego dos demais veículos.

Desta forma, o sistema apresentou uma redução média em aproximadamente 20 minutos para os ônibus que trafegam pela Linha 1 do METROPLUS, algo correspondente a -23% do valor observado anteriormente.

Sistema de Controle de Velocidade

De forma a atuar em paralelo aos sistemas de monitoramento de tráfego, e em vista o crescimento populacional acentuado na Índia, Verma *et al.*, (2016) caracterizaram um sistema de controle de tráfego em interseções semaforicas onde há o acionamento do vermelho, caracterizando-o como um combate direcionado a infrações específicas e rotineiras no dia a dia do trânsito urbano moderno.

O funcionamento do sistema de Verma *et al.* (2016) se dá através de sensores ultrassônicos que utilizam do princípio doppler de efeito desencadeado de propagação de ondas para a detecção de veículos que ultrapassem o sinal com o sinal vermelho acionado, permitindo então a captura da placa do veículo infrator, e posteriormente a aplicação das devidas penalidades.

Da mesma forma, outro sistema de monitoramento e controle de velocidade em vias urbanas, utiliza módulos ultrassônicos arbitrados por microcontroladores de hardware e software configuráveis e de baixo custo, o Arduino, e computação de dados. O sistema de Begum & Bashir (2019) utiliza do reconhecimento de imagem através de um banco de dados definido para validar o veículo como imune (ambulâncias e caminhões de

bombeiros não podem ser punidos por excesso de velocidade) e não-imune (demais veículos) ao registro das placas dos veículos para aplicação de penalidades legais.

3.6. Semáforos

O Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT, 2010), caracteriza o semáforo como um “valioso instrumento para o controle, fluidez e a segurança do tráfego de veículos e de pedestres”, que possui como função básica a de “executar o controle do tráfego num cruzamento por meio da alternância do direito de passagem exibido em grupos focais de cores regulamentadas pelo Código de Trânsito Brasileiro”.

O modelo de semáforo típico utilizado para controlar uma interseção fornece uma exibição sequencial das indicações verde, amarelo, vermelha e alguma outra sinalização especial, como setas de gripo simples ou combinadas, de acordo com a interseção abordada (PAPACOSTAS & PREVEDOUROS, 2000).

Uma fase do semáforo corresponde a duração específica para cada sinal, de modo que haja uma distribuição das permissibilidades no fluxo em cada sentido das vias componentes de uma interseção.

O controle de acionamento do semáforo pode ser do tipo “*pretimed*” (pré-programados) ou “*demand-actuated*” (ativados por demanda). Para o caso dos semáforos do tipo “*pretimed*” um ciclo constante pré-definido se repete constantemente, enquanto os sinais do tipo “*demand-actuated*” têm a capacidade de responder à presença de veículos ou pedestres no cruzamento (PAPACOSTAS & PREVEDOUROS, 2000).

3.6.1. Sistemas de detecção veicular

Dentre os semáforos do tipo ativados por demanda, a sua utilização se baseia nos equipamentos de detecção utilizados, podendo estes ser do tipo detecção por passagem ou de presença.

A detecção de passagem é realizada com um pequeno laço que é ocupado apenas brevemente por um veículo em movimento. Nesse caso, um pulso de curta duração é gerado para sinalizar a passagem do veículo. A detecção de presença é realizada através de um *loop* longo ou de uma série de loops curtos interconectados (PAPACOSTAS & PREVEDOUROS, 2000).

IR (Infravermelho)

Devi *et al.*, (2017) desenvolveram um sistema de controle semafórico com base na densidade do tráfego nas vias. Empregando a tecnologia de sensores infravermelhos (IR) para a contagem dos veículos que percorrem uma determinada faixa, tornando possível a definição do ciclo do semáforo que priorizasse as vias com maior demanda veicular.

Internet das Coisas (Internet of Things – IOT)

A aplicação do conceito de Internet das Coisas (*Internet of Things* _IOT) no desenvolvimento de sistemas inteligentes de controle dos semáforos se apresentam como alternativa para sanar problemáticas decorrentes de sistemas pré-programados, os quais não levam em consideração o comportamento do fluxo de trânsito na definição do tempo e direção de abertura do sinal verde.

A proposta de um sistema que utiliza uma rede de conexão *wireless* entre sensores infravermelho (IR) de contagem de veículos e microcontroladores Arduino para estabelecer a programação do ciclo semafórico (V2I, *Vehicles to Infrastructure*) em relação ao fluxo (número de veículos por intervalo de tempo) e densidade (veículos por unidade de espaço) de uma via é apresentado por Anitha & Badu (2018), de modo que objetivaram encontrar uma redução no tempo de espera, formação de congestionamento e, conseqüentemente, na emissão de poluentes comuns ao gasto energético gerado pelo consumo de combustíveis nestas situações.

De forma similar, Abdselmaee *et al.*, (2018) empregaram uma rede de sensores de proximidade interligados pela comunicação *wireless* para estimar o tempo e prever a abertura do sinal verde para vias de maior tráfego veicular, buscando evitar a formação de engarrafamentos e, conseqüentemente, maiores gastos de tempo nas viagens, conseguindo ainda a prevenção contra possíveis acidentes.

O sistema desenvolvido por Abdselmaee *et al.*, (2018) utilizam de sensores ultrassônicos para captar a presença de veículos nas vias; além de placas Arduino agindo como microcontroladores para os semáforos e sensores, estabelecendo uma comunicação entre as placas por transmissores *wireless* do tipo *Zigbee* (*XBee*).

Optical Wireless Communication _ OWC

Das *et al.*, (2016) propõem a modificação dos métodos tradicionais de transmissão de dados (data) usados pelos ônibus (sistema cabeado) para um sistema de transmissão wireless utilizando a metodologia *Optical Wireless Communication (OWC)*, a qual se baseia na transmissão de dados através da emissão da luz visível.

Singh *et al.*, (2017) estabelecem assim um sistema de comunicação entre os veículos usuários de uma via com cobrança de pedágios utilizando a comunicação wireless por *light waves (LIFI)* entre os carros e cabines de pedágio. Uma placa Arduino UNO é instalada na parte inferior de cada veículo (diminuindo a interferência solar) possibilitando a comunicação luminosa com o Arduino receptor da cabine de pedágios. Informações do veículo, condutor e uma senha de acesso ao pedágio permitem uma diminuição das filas e conseqüentemente o tempo de espera e gasto de combustíveis por parte dos veículos.

Inteligência Artificial

Os modelos convencionais de controle de semáforo empregam sistemas pré-programados de tempos de ciclo, de forma que o seu funcionamento independe da situação atual do tráfego local.

A inteligência artificial integra o sistema de controle semaforico ao tomar como input os dados de imagem das vias de uma dada interseção semaforica, cabendo a lógica *Fuzzy* de inferência, a incumbência de analisar o tempo de espera e comprimento da fila de congestionamento formada, com base na densidade de fluxo.

O uso de sistemas de obtenção, tratamento e computação de dados de imagens nas vias onde haja uma interseção semaforica, se apresenta como uma aplicação direta dos conceitos de cidades inteligentes, visto um comportamento adequado a demanda estabelecida a uma dada situação.

Desta forma, Kushi (2017) propõe o uso de câmeras para a coleta, em tempo real, dos fluxos e densidade de tráfego para uma dada via; microcontroladores Arduino, para a integração entre os sensores e as máquinas computacionais de análise e tratamento matemático dos dados, correspondendo assim a uma resposta em tempo real a problemática, com base em limites de funcionamento previstos.

De forma semelhante, George & George (2018) propõem a obtenção dos dados de tráfego por meio das imagens das vias, sendo alocadas em nuvem por um microcontrolador Arduino que atribui, em tempo real, a solução ideal por computação dos dados de contagem de veículos e estabelece a lógica de semáforo com base na teoria *Fuzzy*, em tempo de verde da fase semafórica para sanar o tráfego formado.

Sistema de Sensores Wireless _ WSN

Para capacitar o sistema como prioritário, ou seja, que seja distinguido o tipo de veículo captado pelo sensor, definições distintas podem ser consideradas:

- a) Os sensores devem abranger todas as faixas componentes das vias na interseção, de modo a realizar o reconhecimento e contabilização dos ônibus que transitem por cada uma;
- b) Deve compor um sistema para computação dos dados, como o reconhecimento de imagem ou de temperatura, para caracterizar o ônibus dentre os demais veículos;
- c) Deve-se definir uma comunicação direta entre o ônibus e o semáforo para que o sistema reconheça e o priorize na configuração semafórica da interseção.

Os impasses referentes a cada definição do sistema estão relacionados a tecnologia empregada, de modo que o custo, a dificuldade de manutenção, o acesso limitado a estas tecnologias e a demanda de mão de obra especializada, tornam as primeiras configurações para o sistema prioritário apresentadas *a)* e *b)* inviáveis na maioria dos casos.

Sendo assim, em virtude da existência de uma faixa exclusiva para ônibus na via principal da interseção, Avenida Canal (Campina Grande-PB), além do itinerário das linhas de ônibus que possuem a avenida como rota comum estarem disponíveis através das plataformas *on-line*, a possibilidade de instalar sensores pontuais nestes ônibus, permitindo uma comunicação direta com o sistema de controle semafórico se mostra possível.

Um modelo de controle semafórico com base nas redes de sensores *wireless* possibilitará, o acionamento, controle e gestão de um semáforo “inteligente”, capaz de priorizar o fluxo do transporte público coletivo, reduzindo o tempo de espera ao acionar o sinal verde havendo reconhecimento do veículo através de comunicações via rádio.

Para compatibilizar a formação do sistema WSN, a tecnologia utilizada deve compor microcontroladores que empreguem módulos de conexão wireless tanto nos servidores

(ônibus) quanto no mestre (semáforo), capacitando o sistema a tomada de decisões a respeito do acionamento das fases semaforicas.

4. FERRAMENTAS TECNOLÓGICAS E COMPUTACIONAIS

4.1. Arduino

O sistema Arduino caracteriza-se por agregar *hardware* e *software* num código aberto em plataforma eletrônica.

Desenvolvido com o intuito de permitir o desenvolvimento de projetos que utilizem a mecânica eletrônica agregada a lógica computacional para a resolução de problemas ou o sensoriamento de dados, o Arduino é caracterizado por (ARDUINO, 2018):

- a) Apresentar baixo custo em relação a outras plataformas de microcontroladores;
- b) Conter plataforma cruzada entre o *software* próprio (Arduino IDE) e os sistemas operacionais convencionais, como Windows, Linux etc.;
- c) Possuir um ambiente de programação simples e claro, Arduino IDE sendo flexível e de fácil utilização;
- d) Possuir um software aberto e expansivo, utilizando como base as bibliotecas C++;
- e) Possuir um código aberto e hardware extensível, como forma de garantir o desenvolvimento da plataforma e especificação quanto a destinação de uso do usuário.

Deste modo, a configuração de um sistema WSN se dá por meio do emprego de módulos transceptores wireless, que definam uma transmissão de dados via rádio, garantindo a comunicação do tipo *master-slaves* (Figura 4).

Figura 4_ Esquema do sistema master-slave de conexão entre o semáforo e o ônibus.



Um módulo capacitado ao desenvolvimento de tal tarefa é o *módulo Transceptor Wireless NRF24L01* de 2.4GHz de comunicação desenvolvido pela *Nordic*

Semiconductors, caracterizado pela implementação de comunicações com baixo custo energético e alto desempenho, Figura 5.

Figura 5_ Módulo Transceptor Wireless NRF24L01 de 2.4GHz com antena.



FONTE: Blog Master Walker Shop (2019).

O uso de antena acoplada permite o estabelecimento de conexões de longo alcance, permitindo uma comunicação entre os dados de até 100 m de distância.

Logo, a concretização de um sistema de semáforo que empregue os princípios da internet das coisas (*Internet of Things*) na concepção de um sistema inteligente de transporte é possível, levando em consideração o baixo custo, a confiabilidade na comunicação estabelecida entre os sensores e na manutenção do sistema.

Deste modo, a necessidade de desenvolver e implementar um sistema semafórico que não só atribua benefícios ao tráfego veicular nos centros urbanos, mas que caracterize o transporte público como prioritário no acionamento das fases semaforicas, caracteriza as premissas do modelo urbanístico que assegure os parâmetros legais de mobilidade urbana.

4.2. Simulações

O uso da modelagem virtual para transpor o comportamento do fluxo de tráfego em um determinado trecho urbano, se vale da aproximação de parâmetros matemáticos que buscam equiparar o modelo ao comportamento típico dos veículos e seus condutores.

A formulação do modelo de tráfego real, exige o levantamento dos parâmetros de caracterização locais, de forma que, os resultados observados do tráfego na modelagem sejam próximos ao encontrado em campo (BLOOMBERG & DALE, 2000).

O uso de mecanismos de simulação pode ocasionar em resultados distorcidos por não reproduzirem com total fidelidade o que ocorre na situação comum de tráfego, contudo, servem como indicativos de erros decorrentes do sistema já vigente (UNITED STATES, 2013).

Os parâmetros de avaliação de tráfego empregados nos modelos se baseiam nos critérios de viagem para as vias principais do trecho analisado, sendo caracterizados os seguintes processos (PTV, 2018):

- 1) Contagem de veículos: Contagem pontual do volume médio de veículos em zonas de coleta de dados especificados em cada semáforo;
- 2) *Queue Cuonter* (Comprimento de filas): O comprimento de filas de veículos define-se como o fator-chave nas previsões de tempos de espera médios para os usuários de uma determinada rota. A contabilização do tempo de espera dos motoristas define a satisfação quanto a percepção e reação característica ao ponto de estresse limite dos usuários;
- 3) *Vehicle Travel Times* (Tempo de viagem dos veículos): Caracterizar o tempo médio de viagem nos trechos de links analisados definem o modelo, mesmo que seccionado, como uma proximidade da situação real, permitindo uma análise contínua e aplicada dos pontos de interseção a jusante e montante do ponto específico.

As possíveis variações nos dados caracterizam os impactos na acessibilidade do trecho analisado, de modo a caracterizar a viabilidade da implementação de propostas de viabilizar e otimizar o tráfego do transporte público nas esferas econômica, social e ambiental.

4.2.1. *Car following*

A lógica de comportamento aplicada aos veículos integrantes das simulações, o *car following*, se baseia no fluxo em corrente do tráfego, de forma a estimar a densidade e velocidade média dos veículos.

Dentre os modelos de *car following* propostos, os formatos apresentados por Wiedemann, tanto em 1974 quanto em 1999, se baseiam em estímulos dos motoristas a partir de um veículo “líder”.

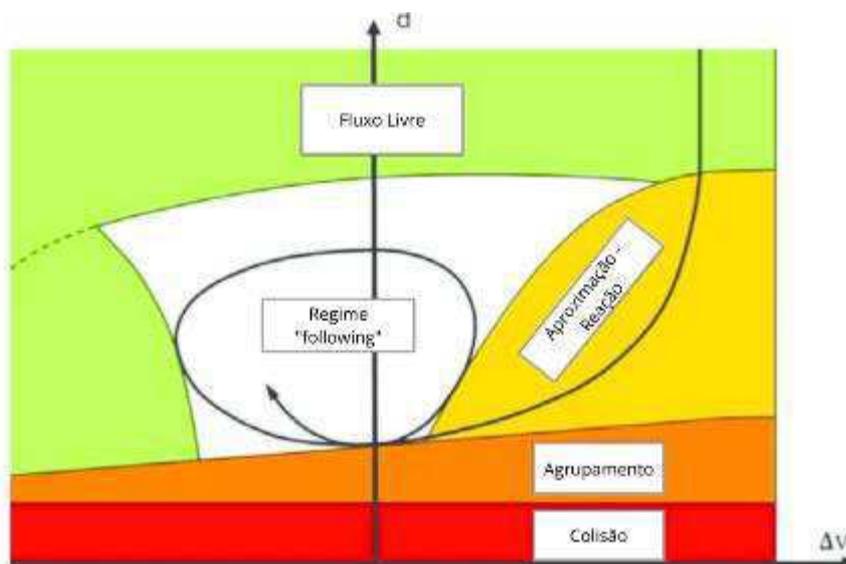
Os tempos de reação do motorista, assim como fatores de distância de segurança compõem os limites para definir os diferentes regimes de comportamento dos carros. Alguns desses limites usam parâmetros de velocidade, mas outros se baseiam unicamente na diferença de velocidade entre o veículo em questão e o veículo líder (HIGGS, ABBAS & MEDINA, 2011). Ambos os modelos, Wiedemann 74 e Wiedemann 99, são baseados

em limiares de percepção humana, mas o cálculo desses limiares é diferente em ambos os modelos.

Wiedemann 74 e 99 (W74 e W99)

O modelo apresentado por Wiedemann (1974), Figura 6, corresponde a um tipo psicofísico, em que o eixo das abscissas corresponde à diferença de velocidade (ΔV) entre os veículos seguidor e líder, e o eixo das ordenadas representa a distância entre eles (d).

Figura 6_Modelo de car following de Wiedemann.



FONTE: Adaptado de PTV AG (2015).

A Figura 7 descreve um comportamento típico de *car following*, em que um veículo pode se definir em quatro casos diferentes, sendo estes:

- Fluxo Livre (*Free Flow*): O veículo não é influenciado por outros veículos; o veículo tenta manter a velocidade desejada, mas flutua em torno de sua velocidade desejada devido ao controle do acelerador imperfeito.
- Aproximação-Reação (*Approaching*): Uma vez que o veículo percebe que está se aproximando de outro veículo, ele desacelera para corresponder a velocidade do veículo líder à medida que atinge sua distância de segurança desejada.
- Seguindo (*Following*): No estado seguindo, os veículos seguem inconscientemente o veículo líder enquanto ele mantém a diferença de velocidade e aceleração baixas.
- Emergência: Se a distância do veículo cair abaixo de uma distância de seguimento desejada, ele reage aplicando desaceleração máxima para evitar colisão.

Os parâmetros empregados no *car following* proposto pelo modelo de Wiedemann, como ressaltam Motamedidehkordi, Margreiter & Benz (2016) são:

a) Para o Wiedemann 74

A distância mínima desejada entre o veículo líder e o veículo em estado *following*, *headway* mínimo, é proporcional ao quadrado da velocidade do veículo mais lento, podendo ser o mais lento tanto o líder quanto o veículo que o segue.

Desta forma, a equação que retrata o *headway* mínimo é:

Equação 1_ Headway mínimo definidor pelo modelo Wiedemann 74.

$$abx = ax + bx$$

Em que:

abx: *headway* mínimo de *following*;

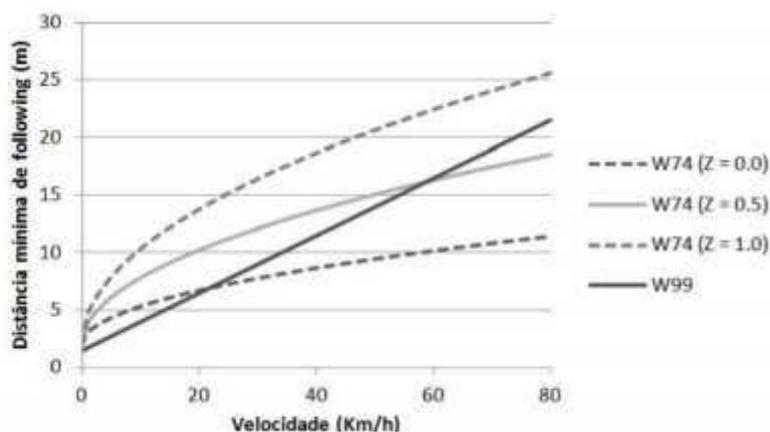
ax: *headway* entre os veículos quando parados;

bx: distância de segurança adicional deixada pelo veículo seguidor pelo fato deste estar em movimento.

b) Para o Wiedemann 99

O modelo Wiedemann 99 se assemelha ao 74, contudo, alguns limites calculados se distinguem, de modo que a relação entre os parâmetros de calibração e o *headway* mínimo é linear e não mais quadrática, Figura 7.

Figura 7_ Relação entre distância mínima de *following* (*d*) e velocidade (*v*) para algoritmos de *car-following* W74 e W99.



FONTE: (LACERDA & NETO, 2014)

Ademais, os parâmetros de calibração para o modelo W99 são dez, não mais três como no modelo W74.

A Tabela 3 apresenta os parâmetros do modelo *car following* Wiedemann 99.

Tabela 3_Parâmetros de Calibração para o modelo de *car following* Wiedemann 99.

Parâmetro	Unidade	Descrição
CC0	m	Distância média entre veículos quando parados em fila.
CC1	s	Define o tempo, em segundos, que o motorista deseja permanecer seguindo o líder.
CC2	m	Define a distância de segurança desejada (abx) antes que o motorista se mova intencionalmente ao motorista líder.
CC3	s	Define o início, em segundos, do processo de desaceleração.
CC4	m/s	Definem a diferença de velocidade, em m/s, durante o processo de <i>following</i> . Contudo o CC4 controla a diferença de velocidade durante o final do processo (-), enquanto o CC controla a diferença de velocidades durante o início do processo (+).
CC5		
CC6	1/(m*s)	Define a influência da distância na oscilação de velocidade durante o regime <i>following</i> .
CC7	m/s ²	Define a aceleração atual durante as oscilações do regime de <i>following</i> .
CC8	m/s ²	Define a aceleração desejada ao partir de uma parada.
CC9	m/s ²	Define a aceleração desejada quando estiver a 80 km/h.

4.2.2. PTV VISSIM

Um dos softwares de simulação microscópica de tráfego (microsimulação) mais utilizados é o programa da *Vision Traffic Suite*, PTV VISSIM.

Caracterizado por ser um programa de modelagem operacional de transportes multimodal (PTV, 2018), o VISSIM permite a realização de interações entre os equipamentos urbanos e os diversos tipos de veículos através dos algoritmos de comportamento integrados, como o *car following*, de maior destaque.

A multifuncionalidade do VISSIM permite a sua utilização em estudos diversos como a análise da interação dos veículos com os pedestres num determinado trecho urbano (AMADO *et al.*, 2019), a estimação da velocidade média dos veículos em vias urbanas

(LACERDA, 2016), até a codificação de rodovias de pista simples em regiões montanhosas a partir de simulações criadas com base nos dados do Google Earth (MAMAN, 2018).

Desta forma, análises de priorização do transporte público exigem do software utilizado a calibração com base nas configurações da localidade aplicada, como a proposta de aplicação de um corredor de prioridade para o transporte público na cidade do Porto (VIEIRA, 2017) e avaliação do tempo de viagem dos sistemas de transportes público por ônibus em corredores de tráfego misto de Fortaleza (SOUSA, 2016).

Portanto, dados coletados em campo para avaliar configurações de trânsito pré-existentes, como o fluxo médio de veículos (LACERDA & NETO, 2014) ou os parâmetros de aceleração e *headway* médio (OLIVEIRA & CYBIS, 2008), garantem a validação dos modelos construídos.

Wiedemann no PTV VISSIM

O PTV VISSIM recomenda em seu manual de usuário que o modelo Wiedemann 74 seja aplicado em simulações de tráfego urbano, enquanto o modelo W99 seja aplicado em rodovias rurais ou de tráfego mais intenso, (PTV, 2015).

Assim como definem Lacerda & Neto (2014), ao considerarem as diferenças na aplicação do Wiedemann 74 e o 99 (W74 e W99) em microsimulações utilizando a ferramenta VISSIM, o emprego de cada modelo varia de acordo com a finalidade buscada, sendo relevantes na estimativa do tempo de viagem e na densidade de veículos.

Entretanto, o modelo W74 não permite ao usuário definir valores as variáveis próprias do modelo de Wiedemann (como *sdv*, *sdx*, *cldv* e *opdv*), sendo atribuídos valores embutidos, *default*. Desta forma Lacerda & Neto (2014) atribuem valores aos parâmetros de calibração do W99 para reproduzir o comportamento dos motoristas brasileiros, Tabela 4.

Tabela 4_ Parâmetros de calibração para o motorista brasileiro.

PARÂMETRO	COMPORTAMENTO DO MOTORISTA		UNIDADE
	Cauteloso	Agressivo	
CC3	-15	-4	s
CC4	-2	-0,1	m/s
CC5	2	0,1	m/s
CC6	20	2	1/(m*s)
CC7	0,15	0,5	m/s ²
CC8	2	3,5	m/s ²
CC9	0,65	2,3	m/s ²

FONTE: (Lacerda & Neto, 2014)

5. ESTUDO DE CASO

Considerado como o segundo maior município do estado da Paraíba, comportando polos industriais e centros universitários, Campina Grande apresentou um aumento de aproximadamente 80.000 veículos na sua frota do ano de 2010 a 2018, como demonstra os dados do DETRAN-PB (2018) na Tabela 5 a seguir:

Tabela 5_Evolução da Frota de Campina Grande.

FROTA DE VEÍCULOS CAMPINA GRANDE		
ANO	FROTA	CRESCIMENTO ANUAL
2000	47508	-
2001	52298	10,08%
2002	57206	9,38%
2003	61509	7,52%
2004	66173	7,58%
2005	71154	7,53%
2006	77881	9,45%
2007	85423	9,68%
2008	94968	11,17%
2009	104274	9,80%
2010	115014	10,30%
2011	125834	9,41%
2012	135558	7,73%
2013	144337	6,48%
2014	151920	5,25%
2015	157973	3,98%
2016	165751	4,92%
2017	177167	6,89%
2018	184118	3,92%

FONTE: DETRAN-PB (2018).

Diante disso, as respostas observadas no trânsito da cidade são congestionamentos constantes, aumento nos tempos de viagens, crescimento no comprimento das filas de carros, e conseqüentemente maiores emissões de CO₂ e outros gases poluentes, dentre outros fatores comuns ao aumento da frota.

Este comportamento foge aos objetivos apresentados nas diretrizes do Plano Diretor Municipal (CAMPINA GRANDE, 2006), o qual define para o sistema de mobilidade urbana a promoção da melhoria do tráfego pelo aperfeiçoamento das atividades de fiscalização, operação, educação e engenharia de tráfego, além de estruturar o sistema viário priorizando o uso de vias pelo transporte público de passageiros.

Assim, ao se realizar um estudo sobre o trânsito local de Campina Grande, selecionar trechos ou espaços de maior solicitação permite a generalização do comportamento do tráfego.

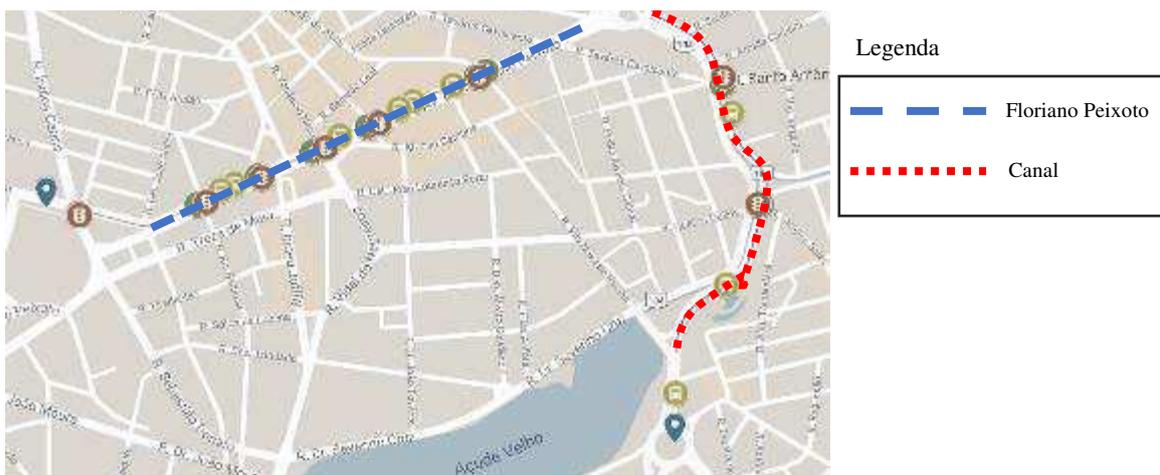
Analisando os períodos com maior fluxo de veículos, ou seja, em situações de trânsito caótico, o comportamento observado nestes trechos possibilita a obtenção de respostas que expliquem ou até se proponham mitigar a problemática do trânsito, o que permitiria replicar essas respostas e soluções em outros pontos da cidade com fluxo ou configuração similares ao analisado.

Dessa forma, estabelecer os parâmetros e requisitos à seleção da área a ser estudada corresponde a uma das etapas iniciais e de maior impacto no estudo de priorização do transporte público, pois permite posterior generalização das mitigações obtidas.

Em Campina Grande, as vias de acesso aos bairros e centros comerciais da cidade, como as vias arteriais e coletoras de alta demanda de tráfego, tornam-se os objetos principais nas análises de priorização do transporte público urbano.

Dentre elas, a Avenida Floriano Peixoto, Figura 08, e o seu acesso pela Avenida Canal, se destacam devido a presença de infraestrutura e equipamentos urbanos como semáforos, faixas exclusivas, paradas de ônibus e faixas de pedestres, além de serem rotas comuns do transporte público e o acesso principal ao centro da cidade.

Figura 8_ Avenidas Canal e Floriano Peixoto.



FONTE: MyMaps (Google), 2020.

A interseção entre a Avenida Canal e as ruas Campos Sales e Quebra Quilos, Figura 09, corresponde a um destes acessos e chega a ser um “funil de tráfego” antecedendo a Avenida Floriano Peixoto, criando pontos de congestionamento constantes.

Figura 9_ Trecho analisado entre a Rua João Florentino e a Avenida Vinte e Sete de Julho.



FONTE: MyMaps (Google), 2019.

Caracterizada por possuir um conjunto semafórico contendo 3 semáforos, Figura 10, além de faixa exclusiva em ambos os sentidos da Avenida Canal, a interseção possui outros critérios fundamentais que justificam sua seleção para estudo, sendo estes:

Figura 10_Locação dos Semáforos contidos na interseção.



FONTE: Google Earth (2019).

Além disso, há a presença de uma faixa exclusiva em ambos os sentidos da Avenida Canal, a interseção possui outros critérios fundamentais que justificam sua seleção para estudo, sendo estes:

- a) Estar localizado em uma área central da cidade;

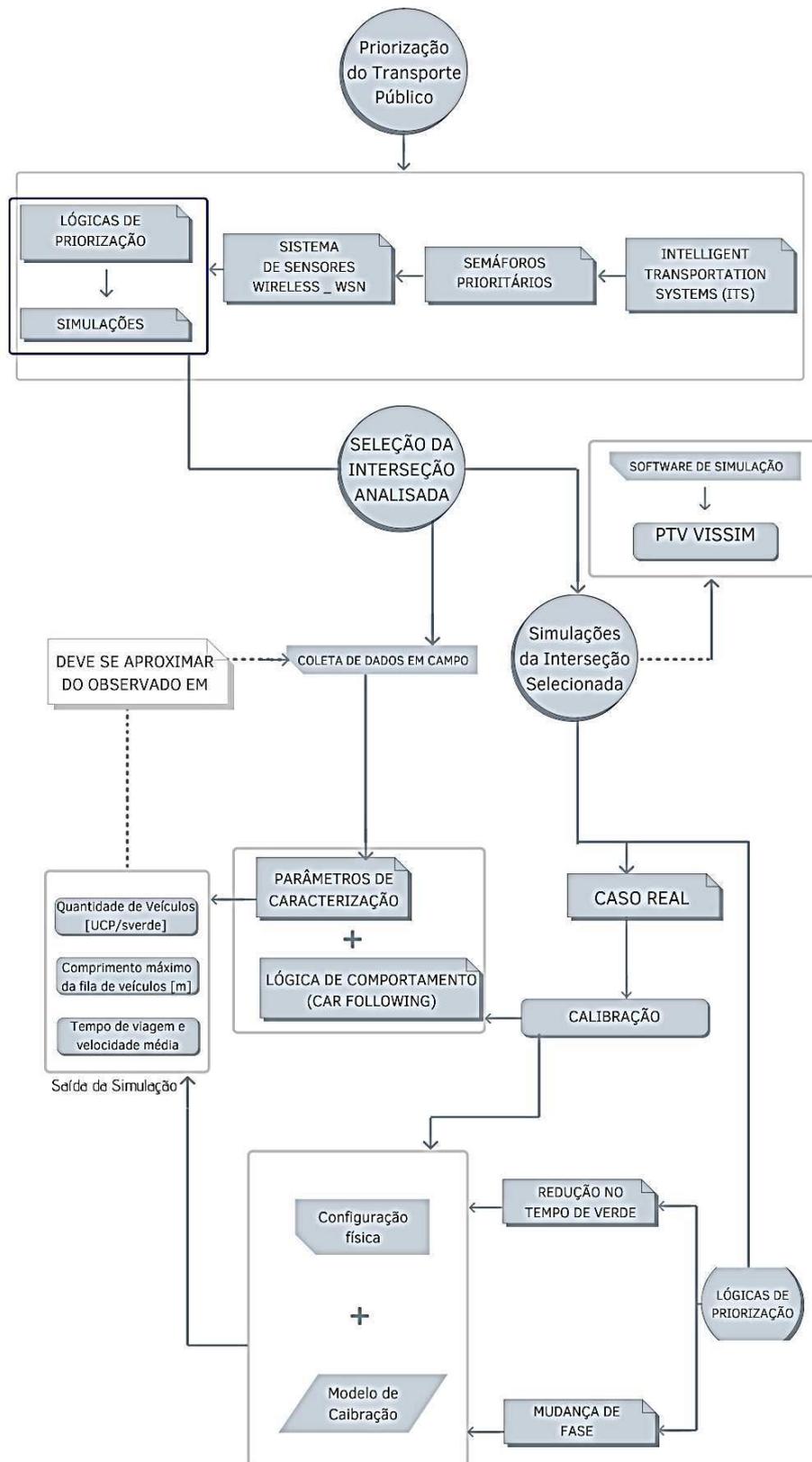
- b) Ser composta por vias de elevado fluxo (ponto de acesso a feira central, maternidade e bairros populares);
- c) Possuir vias com grande número de linhas (ônibus) e acessos;
- d) Possuir três semáforos para regulamentar o fluxo do tráfego;
- e) Apresentar elevado número de áreas de conflito pelas conexões permitidas;
- f) **Possuir faixa exclusiva para ônibus, veículos de lotação e táxis com passageiros.**

Logo, a partir dos critérios apresentados, as possibilidades que o tráfego no trecho selecionado possui, permitem analisar os efeitos que a priorização do transporte público urbano em faixas exclusivas de vias com grande fluxo de veículos deve garantir, por meio de resoluções ou reabilitação das infraestruturas já empregadas no sistema.

6. METODOLOGIA

A partir da conceptualização da problemática e seleção da área de estudo, os métodos de avaliação da eficácia do sistema proposto seguem as etapas apresentadas na Figura 11.

Figura 11_Fluxograma das etapas realização da metodologia.



6.1. Sistemas Propostos: Lógicas De Priorização

A partir das tecnologias discutidas, esse estudo propõe dois modelos distintos de sistemas lógicos de semáforo inteligente para priorização do transporte público urbano em vias com faixa exclusiva.

A lógica empregada ao controle semafórico varia de acordo com a quantidade de semáforos já existentes nas interseções aplicadas, de modo que o aumento da velocidade média e a redução no tempo de viagem das linhas dos ônibus que percorrem o trecho sejam considerados como fatores de decisão na configuração do sistema a ser utilizado.

No primeiro modelo proposto ocorre o acionamento das fases do semáforo visando a priorização do ônibus no tráfego com a redução do tempo de verde dos semáforos adjacentes ao semáforo que controla a faixa exclusiva, enquanto o segundo modelo prioriza a fase verde e modifica o ciclo do semáforo da faixa exclusiva.

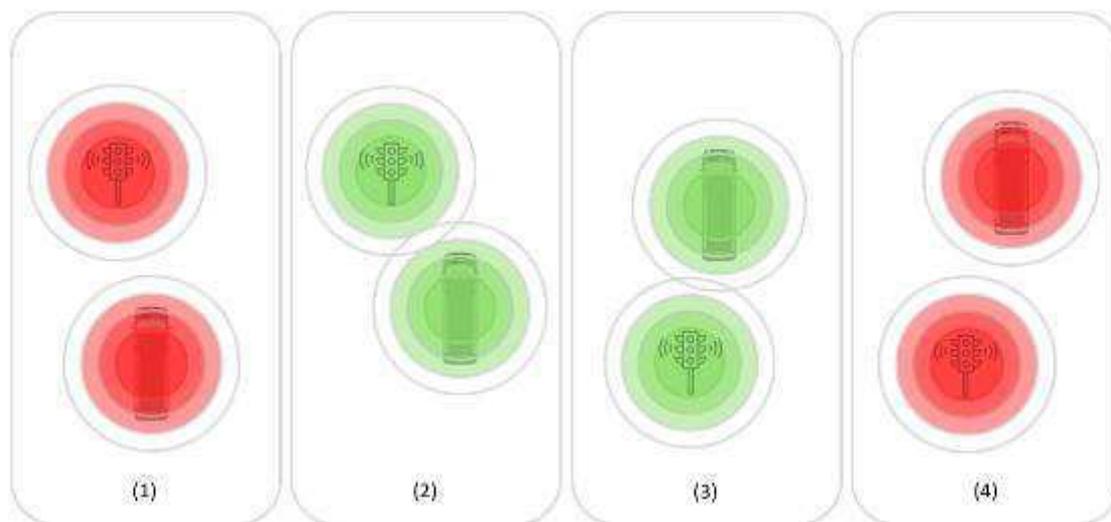
Sendo assim, os “estágios”, conjunto de fases simultâneas num grupo de semáforos, se comportam como ferramentas que indicam e conservam o estado dos semáforos no momento de ocorrência de uma conexão, permitindo a entrada de um ciclo prioritário e o retorno a configuração original do ciclo dos semáforos.

6.1.1. Funcionamento do sistema

Para adequar o funcionamento do sistema à interseção desejada, foi necessário definir o controle semafórico regular, ou seja, o funcionamento comum aos semáforos com seus tempos de verde, amarelo e vermelho já estabelecidos para a situação em que não haja conexão com algum ônibus.

O funcionamento do sistema ocorre de forma que, Figura 12, havendo uma proximidade entre um ônibus integrante da faixa exclusiva e o semáforo (1), a distância de conexão é atingida (2), o estágio em que o conjunto semafórico se encontra é armazenado e, a depender da lógica de controle do ciclo especial utilizada para a interseção ou ocorrerá uma redução no tempo de verde dos semáforos adjacentes ao semáforo que controla a faixa exclusiva ou então ocorrerá a mudança de fases no ciclo semafórico priorizando o acionamento de verde do semáforo da faixa exclusiva (3). Após a perda de conexão entre o ônibus e o semáforo (4), haverá o retorno do controle regular original do sistema, aguardando uma nova conexão.

Figura 12_ Estágios de conexão do sistema.

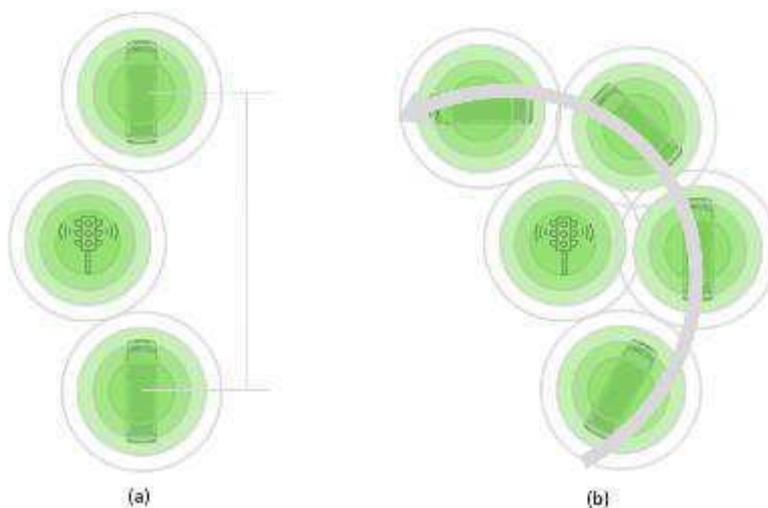


6.1.2. Estágios Ampliados: ampliação do tempo de verde

O tempo de verde ampliado corresponde ao tempo necessário para que o ônibus perca a conexão com o semáforo. A definição do tempo de verde ampliado é fundamental para evitar conexões simultâneas, no caso de vários ônibus em série demandando conexão ao semáforo.

A Figura 13 apresenta a variação no cálculo do tempo de verde ampliado, de acordo com a geometria utilizada na interseção, visto que esta reflete na demanda calculada, podendo ser simples em geometria reta (a), ou possuir uma maior demanda numa geometria mais complexa (b).

Figura 13_ Tempo de verde ampliado, (a) geometria simples, (b) geometria complexa.



Caso o tempo de verde ampliado calculado seja inferior ao tempo de verde regular, deve ser mantido o valor regular para o semáforo da faixa exclusiva.

A redução no tempo de verde para os semáforos integrantes do sistema, deve ser estimada a partir dos valores dos tempos requeridos de verde estabelecidos pelos órgãos de controle de trânsito responsáveis pela via, de modo que o percentual de redução não seja superior a 50% do valor original.

Deste modo, o ganho esperado de velocidade para o ônibus que utilize a faixa exclusiva é obtido a partir da redução do tempo de espera no semáforo em comparação ao ciclo original.

6.2. Simulações

Utilizando o software de simulação de fluxo de tráfego multimodal microscópico, PTV VISSIM, o estudo referente a interseção semaforica apresentada é necessário para averiguar os impactos decorrentes da aplicação de um sistema WSN de priorização do ônibus por comunicação wireless com base nas duas lógicas definidas (redução no tempo de verde e mudança de fase).

São definidos três casos de análise, o primeiro corresponde a simulação da interseção na sua configuração atual em campo (caso real); o segundo corresponde a aplicação da lógica de priorização do transporte público propondo a redução no tempo de verde dos semáforos adjacentes; e o terceiro corresponde a aplicação da lógica de priorização que propõe a mudança de fase.

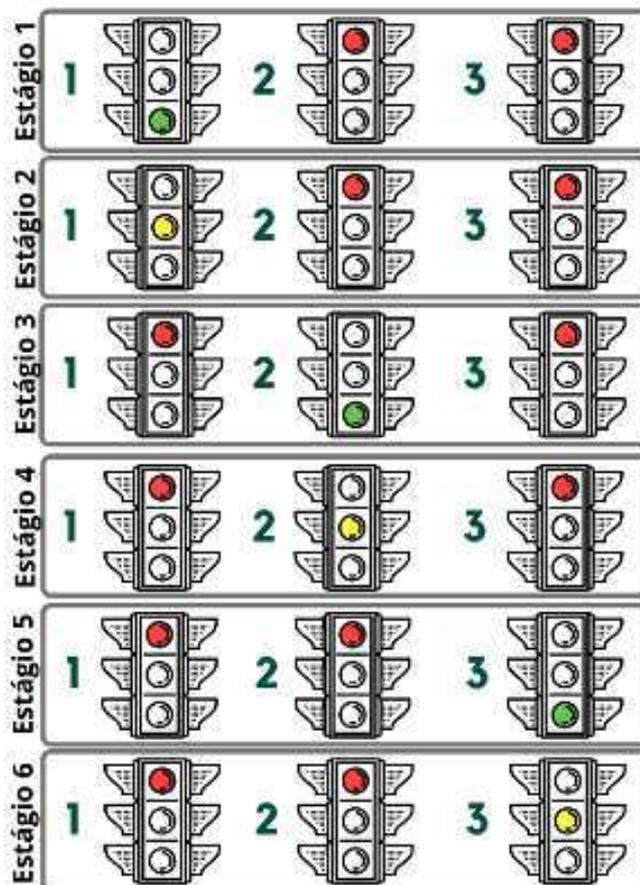
A simulação acontecerá em 600 segundos, tempo disponível de simulação para a versão de estudante do VISSIM, e a saída da corresponderá então a quantidade de veículos que passam pelos semáforos em cada ciclo completo, e deve ser empregada como a unidade de verificação da eficiência das soluções empregadas.

Cada semáforo da interseção recebeu a nomenclatura correspondente a via de entrada dos veículos, ou seja, para o semáforo de controle da Avenida Canal (CAT-CENT), o nome dado é semáforo 01, assim como para a Avenida Canal (CENT-CAT), é semáforo 02, e para a Rua Campos Sales é semáforo 03.

O conjunto de fases formado durante o ciclo semaforico corresponde aos estágios que são enumerados, de modo que permita o controle de acionamento durante a aplicação dos

métodos de priorização nas demais simulações realizadas. Deste modo, a Figura 14 representa os seis estágios contabilizados na atual configuração de ciclo dos semáforos.

Figura 14_ Estágios que compõem o ciclo semaforico, caso real.



A medição do total de veículos que ultrapassam cada semáforo ocorre nos pontos de coleta de dados posicionados imediatamente anteriores a cada semáforo, Figura 15, sendo o resultado apresentado em Unidades de Carro de Passeio por segundo de verde [UCP/s_{verde}] do semáforo correspondente, definida a partir da Equação 2.

Figura 15_Pontos de coleta de dados nos semáforos da interseção.



Equação 2_ Unidade de controle de veículos.

$$\frac{V_{veic}}{T_{verde}} = \left[\frac{UCP's}{S_{verde}} \right]$$

A simulação será considerada como calibrada quando as saídas correspondentes a cada semáforo atingirem uma aproximação de no mínimo 80% com os valores de UCP/S_{verde} levantados em campo.

6.2.1. Calibração do Caso Real

A construção do modelo de simulação real deve, a partir da configuração definida e do levantamento de dados de infraestrutura, Figura 16, representar o mesmo comportamento do fluxo de veículos observado em campo. Para tanto, a validação do modelo criado ocorre a partir da calibração da simulação por meio dos parâmetros de configuração físicos e da lógica de comportamento dos veículos e condutores na interseção.

Figura 16_Modelo real de simulação.



Parâmetros de caracterização

Para formulação do modelo real de tráfego da interseção, algumas considerações foram levantadas de modo a aproximar as respostas a serem obtidas em simulação ao encontrado na situação real.

Desta forma, a caracterização geométrica e de tráfego da interseção é realizada considerando parâmetros específicos necessários listados a seguir:

- 1) *Número e largura das faixas de rolamento*: Definidas de acordo com a classificação das vias adotadas em campo;
- 2) *Interseções e sentido de fluxos*: A definição das interseções e sentidos das vias que reproduzam as distribuições reais existentes, de modo que, as rotas atribuídas a cada rua ou avenida ocorram de acordo com o definido na prática;
- 3) *Áreas de Conflito*: Correspondem as áreas de movimentos conflitantes nas interseções devido as conexões permitidas por cada via;
- 4) *Programação Semafórica*: Caracteriza as fases semafóricas definidas para as sinalizações presentes na interseção;
- 5) *Composição de Veículos e Fluxos Relativos*: Caracteriza, em grupos, os veículos componentes do trânsito comuns das vias;
- 6) *Entrada de Veículos (input)*: A entrada do volume de fluxo de veículos por hora, é aplicada em pontos estratégicos de forma a ocorrer a distribuição adequada do tráfego comum a interseção;

Com a entrada exigida em volume por hora de simulação pelo software PTV VISSIM, o input total para cada ponto de entrada de veículos é definido pela multiplicação do volume médio de veículos por via para um ciclo semafórico com o número de ocorrência de ciclo em uma hora (razão de uma hora pelo tempo de um ciclo, 2 minutos e 7 segundos), Equação 3.

Equação 3_Cálculo do Input total a ser aplicado na simulação.

$$Input_{total (via X)} = (Volume\ de\ Veículos_{médio (via X)}) * \frac{60_{min}}{2,12_{min}}$$

- 7) *Velocidades Desejadas (Desired Speed)*: As velocidades máximas definidas por via devem ser empregadas no modelo;

A velocidade desejada de operação deve corresponder a 40km/h, como definido para vias coletoras pelo Código Brasileiro de Trânsito, Lei Nº 9.503, de 23 de setembro de 1997.

- 8) *Configuração do transporte público por ônibus*: Para caracterização do transporte público, algumas informações devem ser estabelecidas sobre a frota e o seu comportamento no trânsito. Deste modo, são definidos:
 - a) Linhas integrantes do trecho especificado;
 - b) Os horários de viagem e as locações de embarque e desembarque dos ônibus;

- c) A locação das paradas;
- d) A velocidade média de tráfego dos ônibus;
- e) As zonas de desembarque e as percentagens de embarque por parada.

Assim, a representação virtual da configuração física observada na interseção selecionada, Av. Canal com as ruas Campos Sales e Quebra Quilos, pôde ser construída, sendo necessária a determinação da lógica de comportamento dos veículos e condutores que trafegam por ela.

Lógica de Comportamento

A seleção do modelo lógico de comportamento dos veículos na interseção também é influenciada pelas repostas das UCP's por segundo de verde [UCP/s_{verde}] coletadas em campo para cada semáforo, de modo que, a saída da simulação atinja resultados aproximados ao real, garantindo que os veículos e condutores virtuais tenham condutas semelhantes à dos motoristas que normalmente trafegam pela interseção.

Os modelos de Wiedemann, W74 e W99, modelo A e B, foram utilizados em suas configurações pré-estabelecidas no VISSIM, *default*, a fim de que o *car following* que obtivesse a solução mais próxima aos valores observados na Tabela 14 pudesse ser aplicada nas simulações realizadas.

Para isso, são estabelecidos conjuntos de modelos lógicos compostos por valores específicos para cada parâmetro de calibração do Wiedemann 74 (ax, bx_add, bx_mult) e 99 (CC0 a CC9), denominados de classes, de forma que, a influência de cada um dos parâmetros de calibração pudesse ser verificada e fosse obtido um resultado em que, no mínimo, as vias principais (Avenida Canal em ambos os sentidos) obtivessem mais de 80% de proximidade com o valor médio de campo.

Desta forma, a primeira classe corresponde ao conjunto de modelos de calibração formados por: modelo com parâmetros de calibração *default* do VISSIM, modelo B, e os modelos correspondentes aos dois grupos de parâmetros definidos por Lacerda & Neto (2014) para o motorista brasileiro (agressivo e cauteloso), modelos C e D, Tabela 6.

Tabela 6_ Classe de modelos de Calibração 01.

CLASSE DE MODELOS DE CALIBRAÇÃO: 01	
MODELO	CARACTERÍSTICA
B	<i>default</i>
C	Motorista Cauteloso
D	Motorista Agressivo

Em seguida foram definidas as classes 2, 3 e 4, a partir da variação dos parâmetros de calibração de maior relevância (CC3 ao CC9) nos modelos analisados da classe, sendo os valores de cada parâmetro modificado a fim de que o seu grau de influência seja observado quanto aos resultados obtidos da quantidade de veículos para cada semáforo.

Assim, as Tabelas 7, 8 e 9 apresentam, respectivamente, as classes 2, 3 e 4 de modelos de calibração W99 cauteloso modificado, W99 agressivo modificado e W99 *default* modificado, respectivamente.

Tabela 7_ Classe 02: Modelos de Calibração Cauteloso Modificado.

CLASSE W99 Cauteloso Modificado								
PARÂMETRO DE CALIBRAÇÃO	MODELOS							
	E	F	G	H	I	J	K	L
CC0	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
CC1	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9
CC2	4	4	4	4	4	4	4	4
CC3	-16	-17	-18	-15	-15	-15	-15	-15
CC4	-2	-2	-2	-3	-2	-2	-2	-2
CC5	2	2	2	3	2	2	2	2
CC6	20	20	20	20	25	20	20	20
CC7	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,05	0,15	0,15
CC8	2	2	2	2	2	2	1	2
CC9	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65	0,5
PARÂMETRO MODIFICADO ->	CC3	CC3	CC3	CC4 e CC5	CC6	CC7	CC8	CC9

Tabela 8_ Classe 03: Modelos de Calibração Agressivo Modificado.

CLASSE W99 Agressivo Modificado								
PARÂMETRO DE CALIBRAÇÃO	MODELOS							
	M	N	O	P	Q	R	S	T
CC0	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
CC1	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9
CC2	4	4	4	4	4	4	4	4
CC3	-5	-3	-2	-4	-4	-4	-4	-4
CC4	-0,1	-0,1	-0,1	-0,2	-0,1	-0,1	-0,1	-0,1
CC5	0,1	0,1	0,1	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1
CC6	2	2	2	2	1	2	2	2
CC7	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,7	0,5	0,5
CC8	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	4,5	3,5
CC9	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	3
PARÂMETRO MODIFICADO ->	CC3	CC3	CC3	CC4 e CC5	CC6	CC7	CC8	CC9

Tabela 9_ Classe 04: Modelos de Calibração Default Modificado.

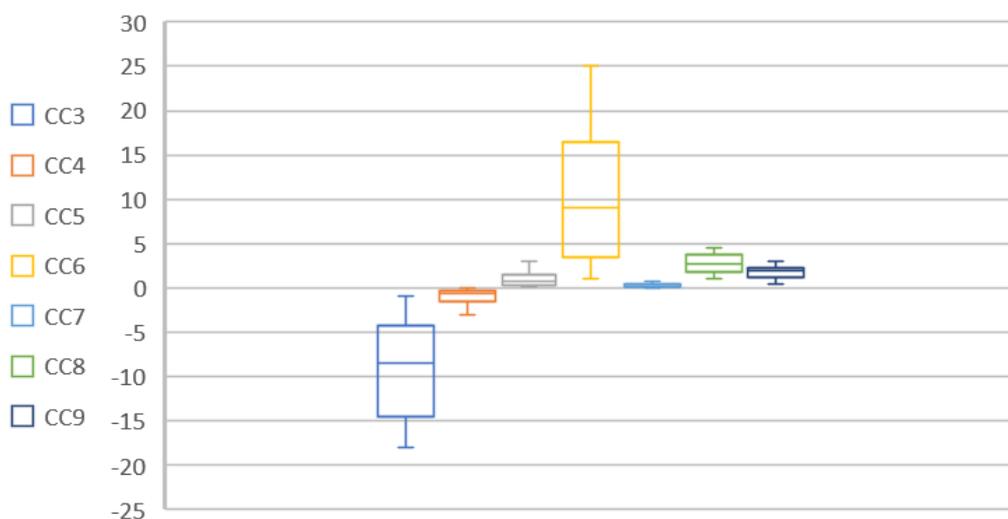
CLASSE W99 default Modificado								
PARÂMETRO DE CALIBRAÇÃO	MODELOS							
	U	V	W	X	Y	Z	AA	AB
CC0	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
CC1	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9
CC2	4	4	4	4	4	4	4	4
CC3	-7	-9	-10	-8	-8	-8	-8	-8
CC4	-0,35	-0,35	-0,35	-0,5	-0,35	-0,35	-0,35	-0,35
CC5	0,35	0,35	0,35	0,5	0,35	0,35	0,35	0,35
CC6	11,44	11,44	11,44	11,44	8	11,44	11,44	11,44
CC7	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,5	0,25	0,25
CC8	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	4,5	3,5
CC9	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	2,5
PARÂMETRO MODIFICADO ->	CC3	CC3	CC3	CC4 e CC5	CC6	CC7	CC8	CC9

A variação do parâmetro CC3 foi a mais solicitada por corresponder ao início, em segundos, do processo de desaceleração dos veículos em estado de *following*.

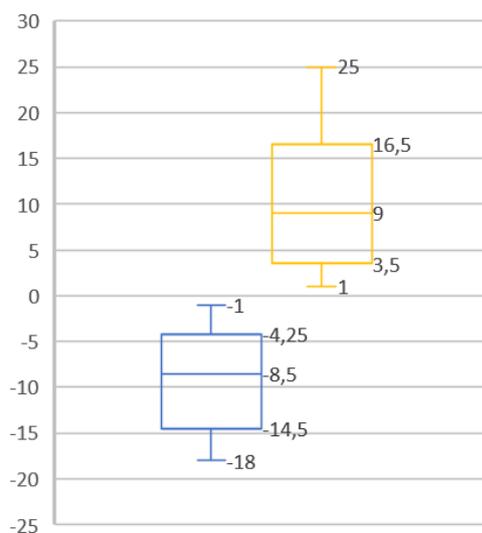
Os parâmetros de calibração utilizados nos modelos de todas as quatro classes anteriores apresentam uma considerável variação entre os valores adotados, como apresenta a Figura 16. De modo que, uma classe adicional de modelos com parâmetros de calibração de valores aleatórios foi desenvolvida com base nos intervalos estabelecidos para cada parâmetro, classe 5.

Figura 17_ Variação nos parâmetros de calibração aplicados nas classes 1, 2, 3 e 4 de modelos. (a) Intervalo de variação dos parâmetros CC6 a CC9. (b) Intervalo de variação dos parâmetros CC3 e CC6. (c) Intervalo de variação dos parâmetros CC4 e CC5. (d) Intervalo de variação dos parâmetros CC7, CC8 e CC9.

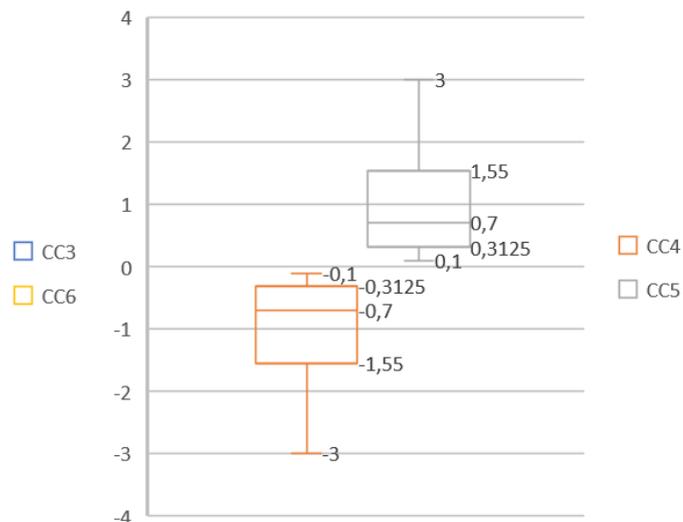
PARÂMETROS DE CALIBRAÇÃO APLICADO NAS CLASSES



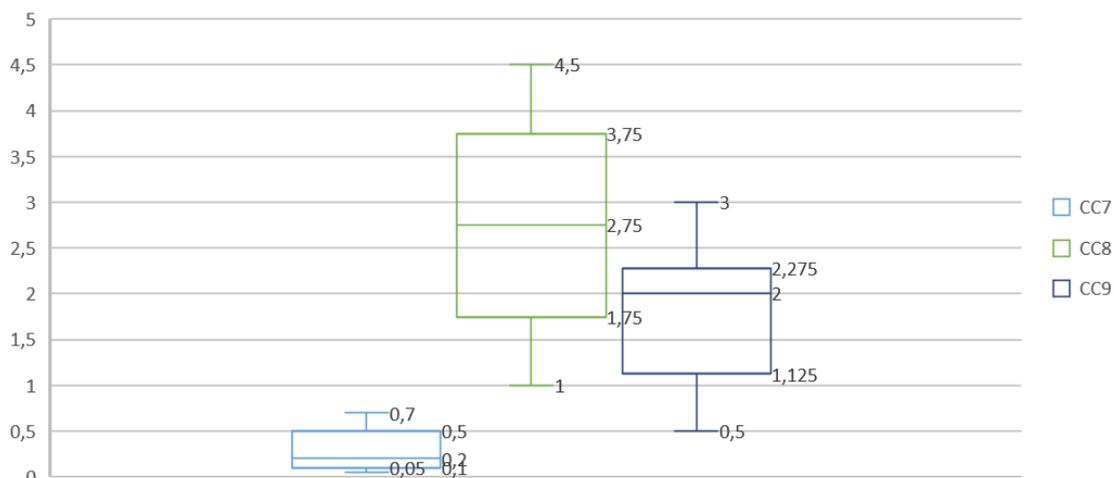
(a)



(b)



(c)



(d)

A classe 5 dos modelos aleatórios, Tabela 10, utiliza dos intervalos de dados gerados para a adoção dos valores de parâmetros de calibração.

Tabela 10_Classe 05: Modelos de Calibração Aleatórios.

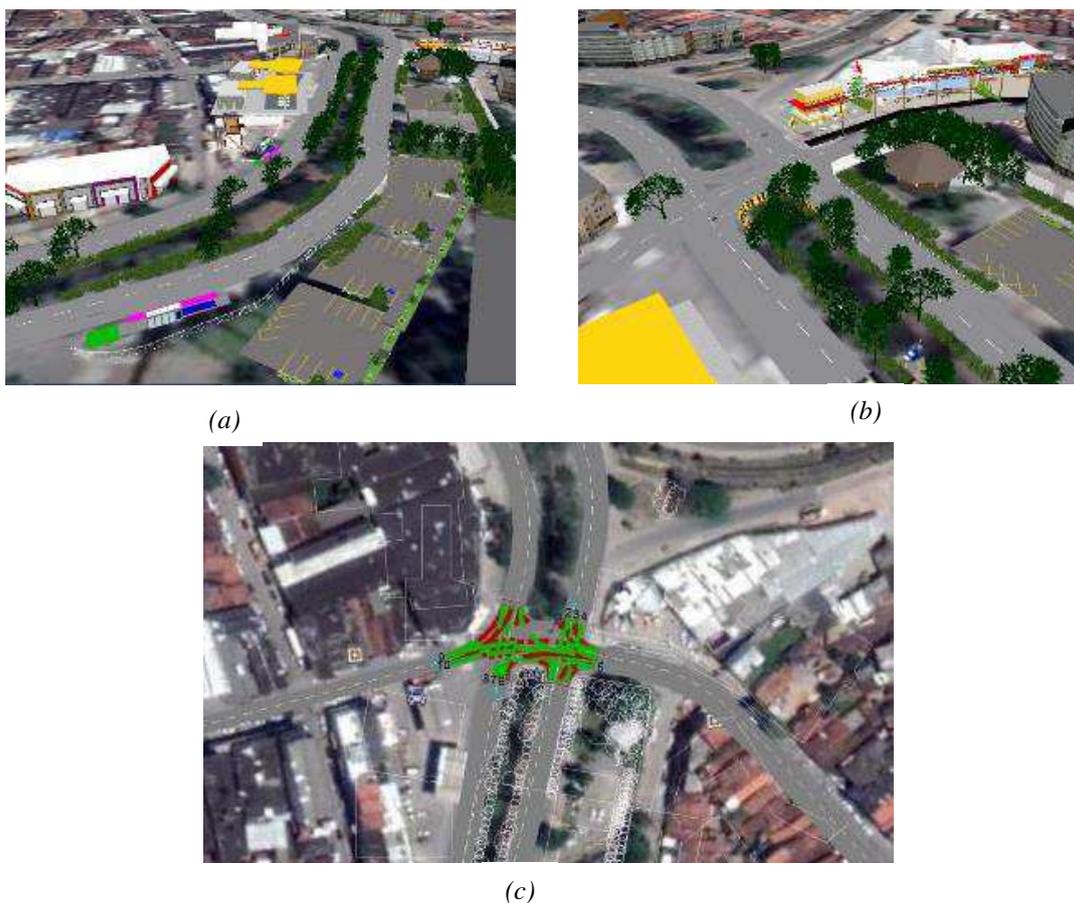
PARÂMETRO DE CALIBRAÇÃO	CLASSE W99 Modelos Aleatórios							
	AC	AD	AE	AF	AG	AH	AI	AJ
CC0	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
CC1	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9
CC2	4	4	4	4	4	4	4	4
CC3	-1	-5	-13	-6	-8	-11	-15	-2
CC4	-0,6	-0,15	-1,5	-1	-0,4	-1,7	-0,8	-1,4
CC5	0,6	0,15	1,5	1	0,4	1,7	0,8	1,4
CC6	5	7,5	12	18	8	10	3	2
CC7	0,1	0,15	0,25	0,2	0,15	0,2	0,25	0,1
CC8	2	3,5	3	2,5	3,5	3	2,5	2
CC9	1	2	2,2	1,25	1,5	2,1	2,25	1,35

Assim, foi feita a seleção do modelo lógico de comportamento dos veículos para a simulação com os critérios de seleção com base na aproximação das respostas de quantidade de veículos obtida.

6.2.2. Lógicas de Priorização

Com a validação e a calibração da simulação do caso real, os conjuntos de parâmetros e a configuração da infraestrutura de tráfego, Figura 18, as lógicas de priorização do transporte público por ônibus na via com faixa exclusiva, Avenida Canal sentido centro e terminal de integração (CAT-CENT), podem ser aplicadas ao modelo virtual, sendo coletados os dados de fluxo e velocidade para cada semáforo.

Figura 18_ Configuração final da simulação (elementos 3D incluídos). (a) Detalhes Av. Canal, FIEP. (b) Detalhes interseção. (c) Visão geral da interseção e elementos 3D incluídos.



6.2.2.1. Redução no tempo de verde

A primeira lógica aplicada é a redução no tempo de verde dos semáforos adjacentes (semáforos 02 e 03) ao da faixa exclusiva (semáforo 01) após o reconhecimento, ou conexão, do ônibus que trafegam na faixa exclusiva com o controle semafórico da interseção. Essa redução de tempos nos semáforos 02 e 03 implicará na ampliação do tempo de verde do semáforo 01.

Nesse sentido, foram propostas reduções progressivas para os verdes dos semáforos 02 e 03 que variaram de 10% a 50% do valor apresentado na Tabela 11, resultando em novos valores totais de ciclo semafórico.

Tabela 11 Tempos de ciclos reduzidos.

			Tempo de Ciclo [s]									TOTAL	
			Semáforo 01			Semáforo 02			Semáforo 03				
LÓGICA COM REDUÇÃO DO TEMPO DE VERDE	CONFIGURAÇÃO			Verde	Amarelo	Vermelho	Verde	Amarelo	Vermelho	Verde	Amarelo	Vermelho	
	CLASSE	MODELO	REDUÇÃO PROGRESSIVA	45	3	79	55	3	69	18	3	106	127
	VERDE COMUM	C.RED-10	REDUÇÃO (10%)	45	3	72	50	3	67	16	3	101	120
		C.RED-15	REDUÇÃO (15%)	45	3	68	47	3	66	15	3	98	116
		C.RED-20	REDUÇÃO (20%)	45	3	64	44	3	65	14	3	95	112
		C.RED-25	REDUÇÃO (25%)	45	3	61	41	3	65	14	3	92	109
		C.RED-30	REDUÇÃO (30%)	45	3	57	39	3	64	13	3	90	105
		C.RED-35	REDUÇÃO (35%)	45	3	53	36	3	63	12	3	87	101
		C.RED-40	REDUÇÃO (40%)	45	3	50	33	3	62	11	3	84	98
		C.RED-45	REDUÇÃO (45%)	45	3	46	30	3	61	10	3	81	94
		C.RED-50	REDUÇÃO (50%)	45	3	43	28	3	60	9	3	79	91
		VERDE AMPLIADO	C.AMP-10	REDUÇÃO (10%)	51	3	72	50	3	67	16	3	101
	C.AMP-15		REDUÇÃO (15%)	51	3	68	47	3	66	15	3	98	122
	C.AMP-20		REDUÇÃO (20%)	51	3	64	44	3	65	14	3	95	118
	C.AMP-25		REDUÇÃO (25%)	51	3	61	41	3	65	14	3	92	115
	C.AMP-30		REDUÇÃO (30%)	51	3	57	39	3	64	13	3	90	111
	C.AMP-35		REDUÇÃO (35%)	51	3	53	36	3	63	12	3	87	107
	C.AMP-40		REDUÇÃO (40%)	51	3	50	33	3	62	11	3	84	104
	C.AMP-45		REDUÇÃO (45%)	51	3	46	30	3	61	10	3	81	100
	C.AMP-50		REDUÇÃO (50%)	51	3	43	28	3	60	9	3	79	97

Novo ciclo semafórico

Replicar o comportamento do sistema de priorização com redução no tempo de verde dos semáforos 02 e 03 na simulação exige a tomada de algumas considerações:

- Assume-se que o sistema WSN esteja funcionando para os ônibus da faixa exclusiva da Av. Canal (CAT-CENT);
- Como forma de replicar o período de maior solicitação de veículos na interseção, durante os seiscentos segundos simulados (correspondentes a 4,7 vezes a ocorrência do ciclo semafórico completo), o acionamento dos semáforos responderá a um ciclo semafórico especial, correspondente ao modelo de redução progressiva aplicado;
- É empregado o modelo de calibração selecionado para o caso real, com seu respectivo conjunto de parâmetros de calibração.

Logo, as respostas para quantidade de veículos, comprimento máximo das filas por faixa das vias, tempo médio de viagem e velocidade de operação são contabilizados.

6.2.2.2. Mudança de fase

A segunda lógica de priorização do transporte público por ônibus é a mudança de fase dos semáforos que se baseia na priorização dos estágios correspondentes ao semáforo 01, ou seja, após finalizado o tempo de verde dos semáforos 02 e 03, o semáforo 01 retorna ao ciclo semafórico, realizando suas fases verde e amarela.

Assim, as respostas para quantidade de veículos, comprimento máximo das filas por faixa das vias, tempo médio de viagem e velocidade de operação puderam ser contabilizados para o modelo de *car following* W99 selecionado.

6.2.3. Saídas das Simulações

A partir das simulações realizadas, caso real e as lógicas de priorização do transporte público por ônibus (redução do tempo de verde e mudança de fase), com atribuição dos parâmetros de calibração do modelo selecionado, os resultados referentes ao tráfego observado no intervalo simulado se dividem em três grupos: quantidade de veículos, comprimento máximo das filas de veículos e velocidade média de operação.

a) Quantidade de veículos e comprimento máximo das filas de veículos

Em conjunto com os dados das quantidades de veículos por intervalo simulado, o comprimento máximo de filas de veículos por faixa é responsável por averiguar o impacto da aplicação das lógicas de otimização dos ônibus que trafegam pela faixa exclusiva da Av. Canal (CAT-CENT), no trânsito das demais vias.

b) Tempo e velocidade média de viagem

Os parâmetros de avaliação do desempenho causado pelas lógicas aplicadas na otimização do tráfego dos ônibus na faixa exclusiva são o tempo de viagem e, conseqüentemente, a velocidade média de operação neste trecho.

Para permitir a comparação entre os tipos de simulação realizados, trechos com pontos de início, de término e distâncias conhecidas são aplicados para cada uma das movimentações permitidas por via de entrada de veículos, Figura 19.

Figura 19_ Tempo requerido entre o Input da Rua Campos Sales (semáforo 3) e o ponto de coleta de dados à 159,73m.



Deste modo, o tempo necessário para que uma UCP percorra o trecho definido, em relação a distância, em metros conhecida, resultará na velocidade média de operação dos veículos.

A Tabela 12 apresenta os comprimentos estabelecidos para cada movimentação permitida na interseção. A faixa exclusiva da Av. Canal (CAT-CENT) entra como um movimento adicional, de modo que, as variações no tempo de viagem dos ônibus pudessem ser acompanhadas.

Tabela 12_ Comprimento dos trechos definidos para medição do tempo de viagem.

VIA	MOVIMENTOS	COMPRIMENTO DO TRECHO [m]
AV. CANAL (CAT-CENT)	1	317,9381
	2	433,3614
	3	368,6292
	4	470,0036
FAIXA EXCLUSIVA	X	439,4774
AV. CANAL (CENT-CAT)	5	372,0334
	6	485,9315
	7	356,9355
	8	449,7723
RUA CAMPOS SALES	9	353,094
	10	303,0855
	11	405,4239

7. RESULTADOS E DISCUSSÕES

7.1. Calibração do Caso Real

A formulação dos três casos simulados (real, redução no tempo de verde e mudança de fase) ocorreu segundo a metodologia estabelecida, em que as primeiras etapas desenvolvidas foram a coleta de dados em campo, o levantamento dos parâmetros de configuração e a definição da lógica de comportamento aplicada (modelo de calibração com o respectivo conjunto de parâmetros de calibração).

7.1.1. Parâmetros de Configuração

1 e 2) Número e largura das faixas de rolamento e Interseções e sentido de fluxos:

A locação dos equipamentos urbanos buscou reproduzir a situação real, deste modo, a posição, o comprimento, largura e o sentido das vias obedeceram às mesmas configurações existentes.

Cada via presente na interseção, apresentadas na Figura 20, foram caracterizadas ou pela presença de faixas exclusivas para ônibus como a (a) Avenida Canal sentidos (1) Catolé-Centro (CAT-CENT) e (2) Centro-Católé (CENT-CAT), ou por serem vias secundárias de acesso ao bairro José Pinheiro, (b) Rua Campos Sales, e de sentido único de acesso à maternidade e feira central e (c) Rua Quebra Quilos.

Figura 20_ Vias participantes da interseção, a) Avenida Canal sentido (1) Catolé-Centro (CAT-CENT) e (2) Centro-Católé (CENT-CAT), b) Rua Campos Sales, (c) Rua Quebra Quilos e (d) imagem de satélite da interseção.



FONTE: MyMaps (Google), 2019.

A coleta de dados sobre a infraestrutura das vias foi feita a partir de pesquisa em campo, com a verificação do número de faixas, sentidos das vias e a medição da largura média por faixa, Tabela 13:

Tabela 13_ Largura média e número de faixas por via.

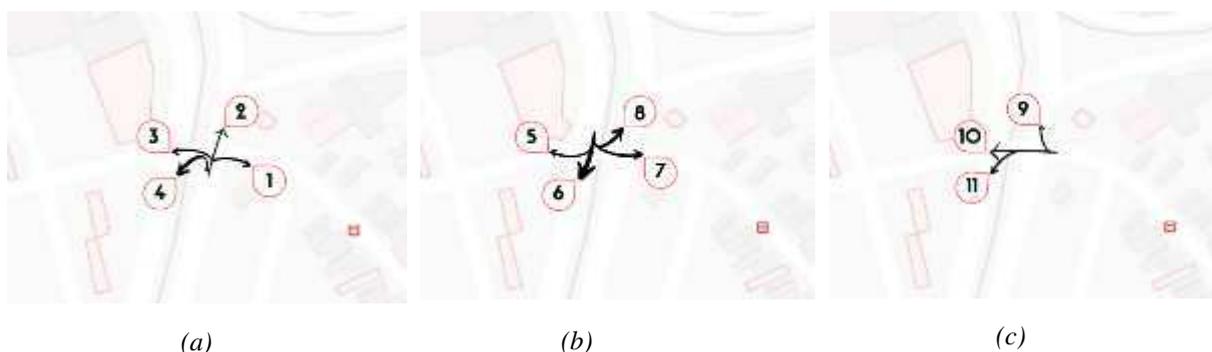
Via	Nº de faixas	Largura média de cada faixa [m]
Av. Canal (CAT-CENT)	3	3,00
Av. Canal (CENT-CAT)	3	3,00
Rua Campos Sales	2	3,00
Rua Quebra Quilos	2	3,00

3) Áreas de Conflito

As conexões permitidas por cada via presente na interseção são contabilizadas, de modo que as distribuições das viagens e os movimentos conflitantes possam ser verificados.

A Figura 21 apresenta as movimentações possíveis por via, de modo que estas são enumeradas em: (a) movimentações permitidas pela Av. Canal (CAT-CENT), (b) movimentações permitidas pela Av. Canal (CENT-CAT) e (c) movimentações permitidas pela Rua Campos Sales.

Figura 21_ Movimentações possíveis nas vias integrantes da interseção estudada, sendo (a) Av Canal (CAT-CENT), (b) Av Canal (CENT-CAT) e (c) Rua Campos Sales.



A partir da distribuição das movimentações, as áreas de conflito ou movimentações conflitantes são classificadas de acordo com o tipo, sendo:

X: cruzamento;

C: convergência;

D: divergência;

0: sem influência.

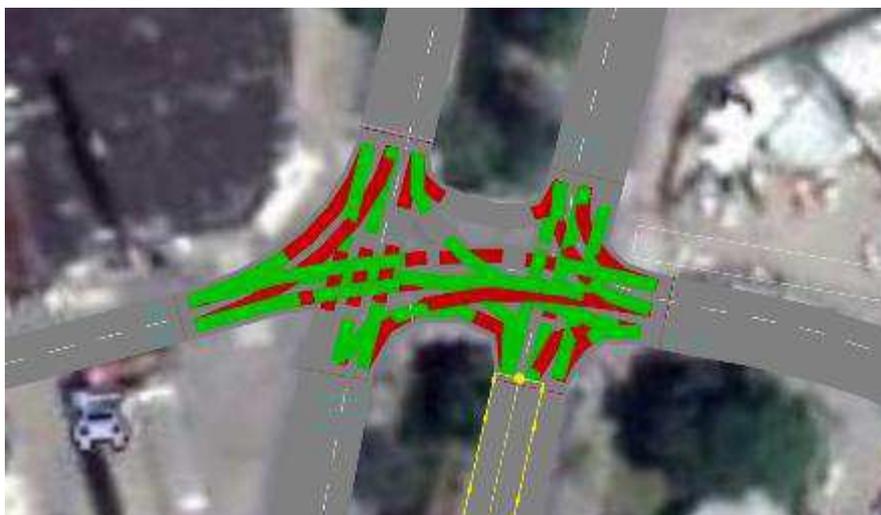
Logo, a Tabela 14 apresenta os conflitos existentes entre as vias:

Tabela 14_Conflitos existentes entre as vias da interseção.

TABELA DE CONFLITOS PARA A INTERSEÇÃO											
MOVIMENTOS	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	-	0	0	0	0	0	C	0	0	0	0
2	D	-	0	D	0	0	X	C	C	X	X
3	0	0	-	0	C	X	X	0	0	C	0
4	0	0	D	-	0	C	0	0	0	0	C
5	0	0	C	0	-	D	0	0	0	C	0
6	0	0	X	C	0	-	D	0	0	X	C
7	C	X	0	0	0	0	-	0	0	X	X
8	0	C	0	0	0	0	0	-	C	X	0
9	0	C	0	0	0	0	0	C	-	0	0
10	0	X	C	0	C	X	X	0	0	-	D
11	X	X	X	C	0	C	X	0	0	0	-

Deste modo, a configuração real da infraestrutura de tráfego existente na interseção possui 44 áreas conflitantes, as quais devem ser replicadas no modelo de simulação criado utilizando o PTV VISSIM, para evitar a formação de desvios no comportamento dos veículos. A Figura 22 apresenta o uso das áreas conflitantes no modelo simulado, de modo que o tipo e número se iguale ao modelo real.

Figura 22_Áreas conflitantes no modelo simulado criado utilizando o PTV VISSIM.



4) Programação Semafórica

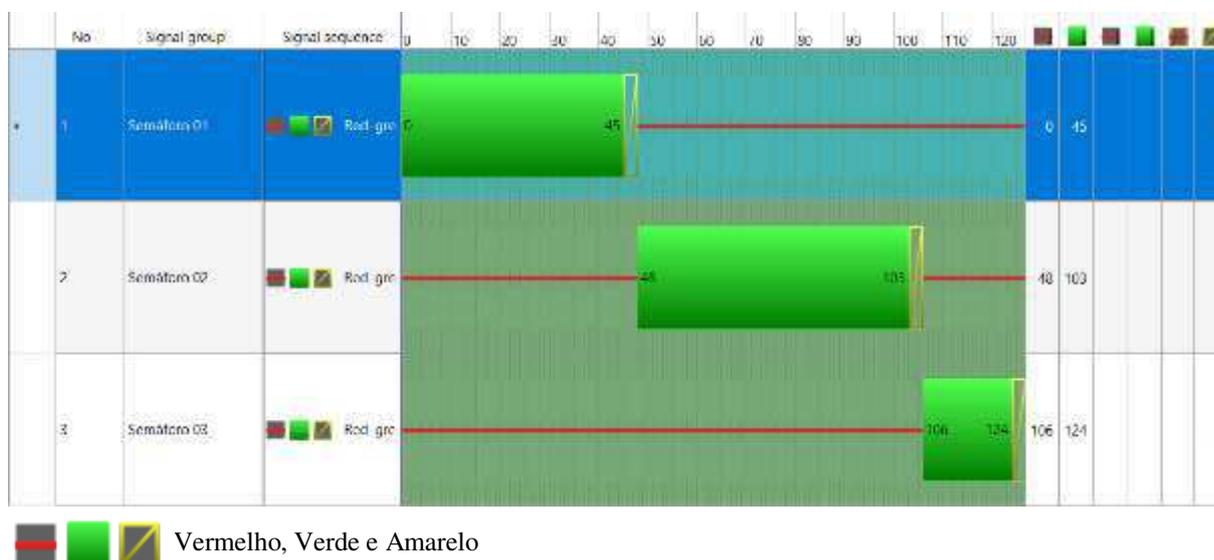
Os três semáforos que compõem a interseção são responsáveis pelo controle das movimentações apresentadas na Figura 22, sendo aplicados na simulação (*signal heads*) nas mesmas localizações dos semáforos em campo (Figura 10).

Os tempos de verde, vermelho e amarelo para cada semáforo foram contabilizados em campo, com o uso de cronômetros, de modo que os valores são apresentados na Tabela 15. Sendo o conjunto de semáforos do tipo vermelho-verde-amarelo, o ciclo ocorre seguindo a ordem numérica da nomenclatura adotada, Figura 23.

Tabela 15_ Tempo de fase para os semáforos da interseção.

Semáforo	TEMPO DE CICLO (s)			
	Verde	Vermelho	Amarelo	Total
01	45	79	3	127
02	55	69	3	127
03	18	106	3	127

Figura 23_ Ciclo semaforico, caso real.

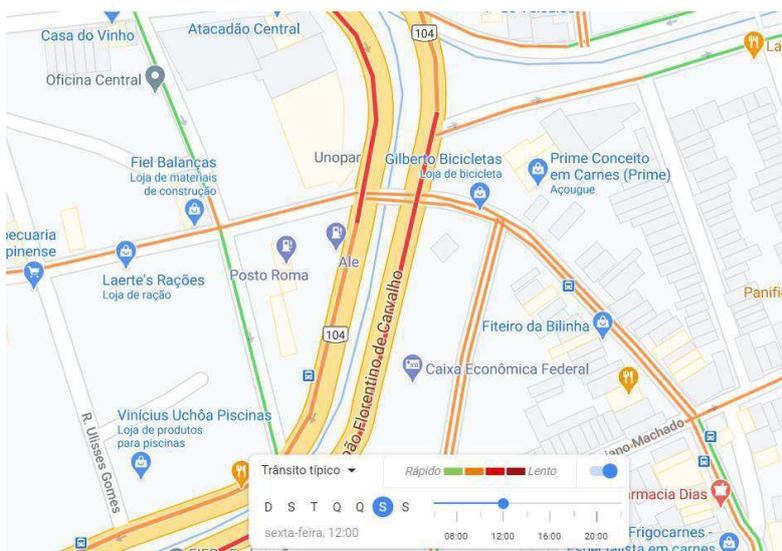


5 e 6) Composição de Veículos e Fluxos Relativos e Entrada de Veículos (input):

Os grupos de veículos corresponderam em tipo e em volume ao observado nos horários de maior solicitação do trânsito local. Portanto, inicialmente definiu-se os períodos em que o fluxo de veículos no trecho era maior e observou-se os grupos componentes do tráfego nestes horários.

Analisando o rastreamento dos usuários do aplicativo Google Maps, o trânsito típico para a região é classificado por meio dos horários, podendo ser classificado entre rápido (maior velocidade de tráfego, menor quantidade de usuários por área e menor tempo de viagem no trecho) à lento (maior número de usuários contabilizados no trecho, menor velocidade média de tráfego e consequentemente maior tempo de viagem no trecho) (GOOGLE, 2020), Figura 24.

Figura 24_ Trânsito típico para a interseção analisada.

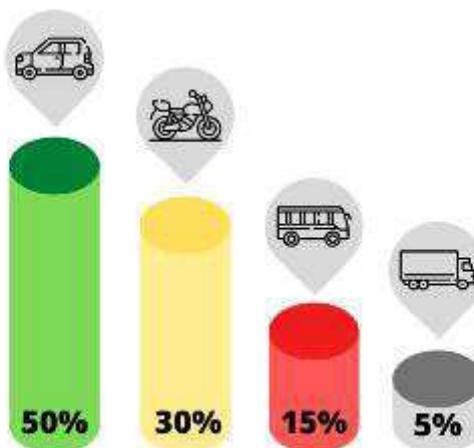


FONTE: Google Maps (2020).

Assim, foi estabelecido que para os dias úteis da semana (segunda à sexta), o período de maior solicitação de tráfego, ou o pico de trânsito, ocorria entre as 10:00 e 12:00 horas. A partir do intervalo definido, foram coletados dados durante os dias 10 a 14 de agosto de 2020, com a contabilização dos tipos, volumes e a movimentação realizada por cada veículo durante o tempo de um ciclo semafórico, em intervalos de 30 minutos entre as leituras.

A partir dos dados coletados foi possível verificar a distribuição média dos tipos de veículo por ciclo semafórico na interseção, correspondendo à 50% de veículos do tipo automóveis e caminhonetes, 30% de motocicletas, 15% de veículos do tipo ônibus, micro-ônibus e vans além de 5% de veículos do tipo caminhões e demais veículos pesados, como apresenta a Figura 25.

Figura 25_ Distribuição média dos tipos de veículos observados por ciclo semafórico.



Para definição do volume médio de veículos por ciclo semafórico, foi realizada a conversão dos veículos para Unidade de Carro de Passeio (UCP), de modo que os fatores de equivalência aplicados na conversão se baseiam no Manual Brasileiro de Sinalização de Trânsito (DENATRAN, 2007) e são descritos na Tabela 16.

Tabela 16_ Fatores de Equivalência para UCP.

Tipo de Veículo	Fator de Equivalência
Automóvel	1,00
Motocicleta	0,33
Ônibus	2,00
Caminhão (2 eixos)	2,00
Caminhão (3 eixos)	3,00

FONTE: DENATRAN, 2007.

Assim, a entrada de veículos na interseção foi definida pelo valor médio do volume normalizado em UCP's, de modo que, o volume estimado correspondesse ao esperado para uma hora de simulação, assim como prevê a função input no PTV VISSIM (2018). Desta forma, são aplicadas margens adicionais de volume a média obtida correspondentes a um acréscimo de 10%, 20% e 30%. Os acréscimos ocorrem devido:

- a) Ao tempo requerido de entrada da UCP na simulação até o ponto de coleta de dados no semáforo para a contagem;
- b) Devido a variação nas leituras do volume de veículos por fase semafórica, Figura 27;
- c) Devido a função *input*, pois em uma hora de ocorrência do trânsito, a variação do volume foge da média observada, as adições de 10% a 30% cobrem essa variação.

As Figuras 26 e 27 correspondem aos *inputs* dos semáforos 01, 02 e 03, com a média e as margens adicionais aplicadas e a variação da quantidade de veículos durante o período de maior solicitação de tráfego (das 10:00 as 12:00 horas), respectivamente

Figura 26_ Resumo dos volumes de veículos por ciclo semaforico, com as margens adicionais de 10%, 20% e 30%.

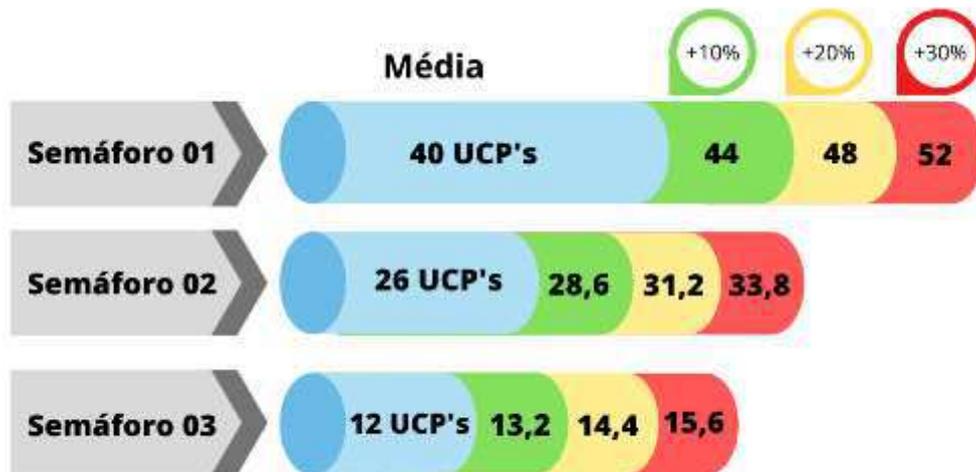
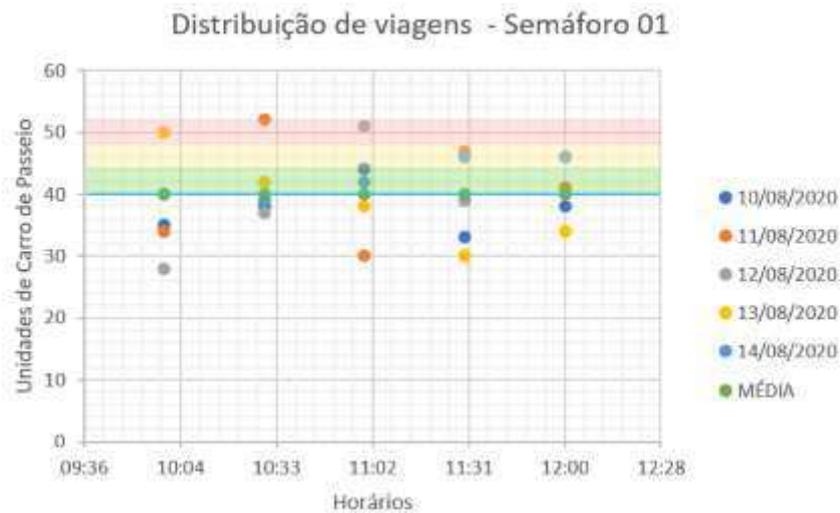
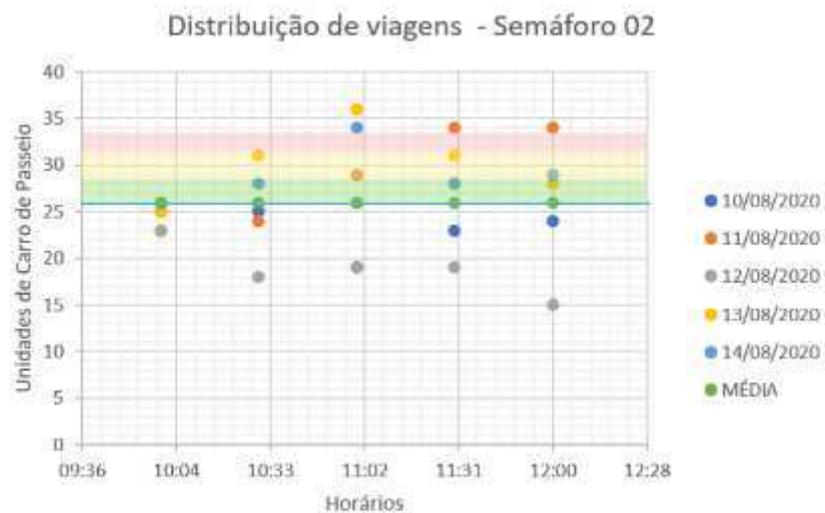


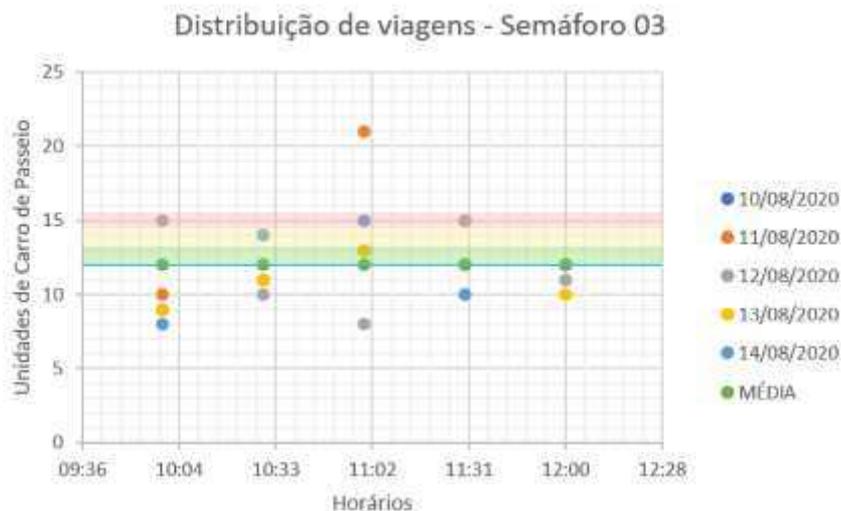
Figura 27_ Volume de veículos por tempo de verde (nas datas e horários definidos) para o semáforo 1 (a), para o semáforo 2 (b) e para o semáforo 3 (c). A média em azul e as margens adicionais de 10% (verde), 20% (amarelo) e 30% (vermelho).



(a)



(b)



(c)

A Tabela 17 apresenta os valores que foram usados como referência na calibração do sistema, obtidos a partir do volume médio e do tempo de verde correspondente para cada semáforo coletados em campo.

Tabela 17_Valores de referência para calibração da simulação [UCP/sverde].

DATA COLLECTION POINT	VOLUME MÉDIO [UCP]	TEMPO DE VERDE [s]	[UCP/sVerde]
SEMÁFORO 01	40	45	0,888888889
SEMÁFORO 02	26	55	0,472727273
SEMÁFORO 03	12	18	0,666666667

Assim, a partir da aplicação da Equação 3, a Tabela 18 apresenta os valores correspondentes as entradas para as vias por margem adicional aplicada.

Tabela 18_Inputs utilizados nas simulações.

	INPUT [UCP/h]			
	0%	10%	20%	30%
MARGEM ADICIONAL ->				
AV. CANAL (CAT-CENT)	1132	1245,2	1358,4	1471,6
AV. CANAL (CENT-CAT)	735,8	809,38	882,96	956,54
RUA CAMPOS SALES	339,6	373,56	407,52	441,48

8) Configuração do transporte público por ônibus:

a) Linhas integrantes do trecho especificado;

As linhas de ônibus que percorrem o trecho estudado são levantadas de forma que não apenas o fluxo cotidiano seja retratado, mas que sejam verificados os efeitos da aplicação do sistema WSN nas linhas que percorrem a Avenida Canal (CAT-CENT) sentido

Avenida Floriano Peixoto, por ser uma área de comércio central da cidade e caminho ao terminal de integração do município.

b) Os horários de viagem e as locações de embarque e desembarque dos ônibus;

A Superintendência de Trânsito e Transporte Público de Campina Grande disponibiliza, em tempo real, os horários de embarque e desembarque das linhas dos ônibus participantes dos consórcios conveniados ao governo municipal, Santa Maria e Santa Verônica, por meio da página digital e aplicativo MOOVIT. Logo, as linhas selecionadas e seus respectivos horários de circulação da frota em um dos intervalos (30 minutos) do período de maior fluxo no tráfego são representadas na Tabela 19.

Tabela 19_ Linhas de ônibus selecionadas e os horários de circulação para o intervalo de 30 minutos entre as 11:30 e 12:00 horas.

Horários dos ônibus									
Pico (11:30 a 12:00)		HORÁRIO				Espera ao próximo ônibus			
	LINHA	HORÁRIO				Espera ao próximo ônibus			
SANTA VERÔNICA	404	12:20	12:45	13:10	13:31	00:00	00:25	00:25	00:21
	444	11:48	12:38	13:03	13:26	00:00	00:50	00:25	00:23
	955	12:02	13:12	13:42	14:12	00:00	01:10	00:30	00:30
SANTA MARIA	903A	12:18	13:38	14:18	-	00:00	01:20	00:40	-
	903B*	11:44	12:28	12:53	13:18	00:00	00:44	00:25	00:25
	92	11:40	13:00	13:34	13:51	00:00	01:20	00:34	00:17

* A linha 903B não realiza o trecho pela Avenida Floriano Peixoto, mas é incluída por fazer parte do tráfego de ônibus na interseção analisada.

Devido às limitações da versão estudantil do software PTV VISSIM quanto ao tempo de simulação permitido, apenas 600 segundos (10 minutos), verifica-se que, a partir dos horários de circulação da frota apresentados na Tabela 19, a ocorrência de maior oferta de ônibus em 10 minutos ocorre como apresentado na Tabela 20.

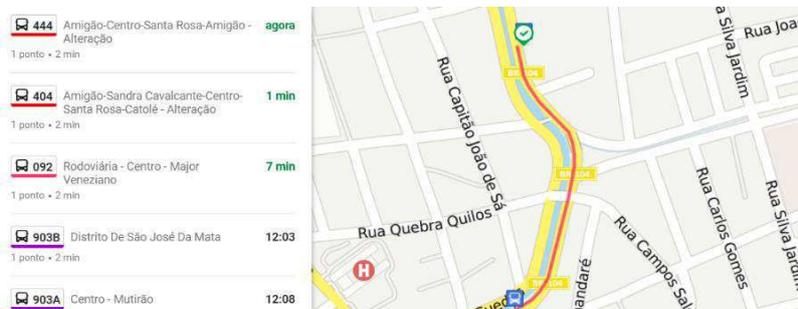
Tabela 20_ Maior oferta de ônibus em intervalo de 10 minutos.

LINHA	92	903B	444
HORÁRIO	11:40	11:44	11:48
TEMPO ATÉ O PRÓXIMO	00:00	00:04	00:04
ACUMULADO: TEMPO ATÉ O PRÓXIMO	00:00	00:04	00:08

Sendo assim, para o tratamento experimental das simulações e considerando a redução na frota circulante devido a presença do SARS-COVID, empregou-se uma oferta de frota circulante correspondente a um ônibus sendo introduzido por minuto simulado, Figura 28.

Com relação a velocidade de operação para as linhas de ônibus do trecho definido utilizou-se como base a média dos tempos estimados de chegada dos ônibus, disponibilizados na página MOOVIT, nas paradas de ônibus apresentadas na Figura 29. A distância entre as paradas 01 e 02, 418 metros, é então dividida pelos valores de viagem estimados, Figura 30.

Figura 30_ Tempo estimado de chegada dos ônibus nas paradas do trecho selecionado.



FONTE: MOOVIT. Acesso em: 15/08/2020.

Os parâmetros utilizados para os ônibus simulados são apresentados na Tabela 21. Os valores *default* do VISSIM de atraso no fechamento das portas, porcentagem de desembarque, tempo mínimo de permanência e *input* de pedestres na parada são mantidos, com o local de desembarque ocorrendo pela porta traseira como nos ônibus da frota de Campina Grande.

Tabela 21_Parâmetros definidos para os ônibus.

PARÂMETROS DEFINIDOS PARA O ÔNIBUS	
Velocidade média	15km/h
Atraso no fechamento das portas	1,5 s
Tempo de permanência mínimo	5s
Local de desembarque	Traseira
Input Pedestres	60 /h
Fluxo de veículos	1/min
% Desembarque por parada	60%

7.1.2. Lógica de Comportamento

As configurações de parâmetros de calibração aplicados para os modelos correspondentes ao Wiedemann 74 e Wiedemann 99 são apresentados nas Tabelas 22 e 23.

a) Modelo A: Wiedemann 74 (*default*)

Tabela 22_ Modelo A: Parâmetros de calibração W74 (*default*).

MODELO	PARÂMETROS W74 APLICADOS		
	ax	bx add	bx mult
A	2	2	3

b) Modelo B: Wiedemann 99 (*default*)Tabela 23_ Modelo B: Parâmetros de calibração W99 (*default*).

MODELO	PARÂMETROS W99 APLICADOS									
	CC0	CC1	CC2	CC3	CC4	CC5	CC6	CC7	CC8	CC9
B	1,5	0,9	4	-8	-0,35	0,35	11,44	0,25	3,5	1,5

As respostas de UCP's/s_{verde} são obtidas para cada modelo de calibração aplicado a simulação do caso real, A e B, permitindo a comparação com a média observada em campo, Tabelas 24 e 25.

Tabela 24_ Quantidade de veículos por ciclo semafórico [UCP's/sverde]. Caso A (W74 *default*).

MODELO	QUANTIDADE DE VEÍCULOS POR CICLO SEMAFÓRICO							
A (W74 <i>default</i>)	DATA COLLECTION POINT	REAL	0%	10%	20%	30%		
SEMAFÓROS	01	TOTAL	40	32,76595745	34,89361702	35,95744681	35,95744681	
		[UCP'sVerde]	0,88888889	0,728132388	0,775413712	0,799054374	0,799054374	
	03	TOTAL	12	5,744680851	7,021276596	7,872340426	8,936170213	
		[UCP'sVerde]	0,666666667	0,319148936	0,390070922	0,437352246	0,496453901	
	02	TOTAL	26	27,87234043	29,78723404	31,4893617	32,76595745	
		[UCP'sVerde]	0,472727273	0,506769826	0,541586074	0,572533849	0,595744681	

Tabela 25_ Quantidade de veículos por ciclo semafórico [UCP's/sverde]. Caso B (W99 *default*).

MODELO	QUANTIDADE DE VEÍCULOS POR CICLO SEMAFÓRICO							
B (W99 <i>default</i>)	DATA COLLECTION POINT	REAL	0%	10%	20%	30%		
SEMAFÓROS	01	TOTAL	40	32,76596	35,957447	38,08511	35,74468	
		[UCP'sVerde]	0,888889	0,728132	0,7990544	0,846336	0,794326	
	03	TOTAL	12	5,744681	7,0212766	8,297872	8,93617	
		[UCP'sVerde]	0,666667	0,319149	0,3900709	0,460993	0,496454	
	02	TOTAL	26	27,87234	30,212766	32,12766	32,76596	
		[UCP'sVerde]	0,472727	0,50677	0,549323	0,584139	0,595745	

O percentual da quantidade de veículos por ciclo semafórico obtido para cada modelo, Tabela 26, demonstra que, o *car following* W99 (modelo B) consegue uma maior aproximação, atingindo mais de 90% dos valores esperados em cinco situações, duas das quais numa mesma margem adicional (20%).

Tabela 26_ Quantidade de veículos por ciclo semafórico [UCP's/sverde]: Percentual de aproximação. Modelos A e B (W74 e W99 *default*).

MODELO A	W74 <i>default</i>	QUANTIDADE DE VEÍCULOS POR CICLO SEMAFÓRICO [%]							
		DATA COLLECTION POINT	REAL	0%	10%	20%	30%		
MODELO B	W99 B <i>default</i>	01	[UCP'sVerde]	0,88888889	81,91%	87,23%	89,89%	89,89%	
			[UCP'sVerde]	0,666666667	47,87%	58,51%	65,60%	74,47%	
		03	[UCP'sVerde]	0,472727273	107,20%	114,57%	121,11%	126,02%	
			[UCP'sVerde]	0,472727273	107,20%	116,20%	123,57%	126,02%	
		02	[UCP'sVerde]	0,88888889	81,91%	89,89%	95,21%	89,36%	
			[UCP'sVerde]	0,666666667	47,87%	58,51%	69,15%	74,47%	
		[UCP'sVerde]	0,472727273	107,20%	116,20%	123,57%	126,02%		

Assim sendo, a continuidade da calibração e validação do caso real tomou como base a variação da lógica proposta pelo método Wiedemann 99, modelo B.

As respostas obtidas para os modelos da classe 1, modelos *default* e de Lacerda & Neto (2014), Tabela 27, apresentaram melhoras perceptíveis nos percentuais de

aproximação, com ênfase nos *inputs* da margem adicional de 30%. Além de que, o comportamento tido como “cauteloso”, chegou a obter 3,19% a mais de aproximação percentual em comparação ao “agressivo”.

Tabela 27_ Quantidade de veículos por ciclo semafórico [UCP's/Verde]: Percentual de aproximação. Casos C e D (cauteloso e agressivo W99).

MODELO C	W99 C cauteloso	QUANTIDADE DE VEÍCULOS POR CICLO SEMAFÓRICO [%]					
		DATA COLLECTION POINT	REAL	0%	10%	20%	30%
		01	[UCP's/Verde] 0,888888889	81,91%	89,89%	95,21%	94,15%
		03	[UCP's/Verde] 0,666666667	47,87%	58,51%	69,15%	74,47%
		02	[UCP's/Verde] 0,472727273	107,20%	116,20%	123,57%	130,11%
MODELO D	W99 D agressivo	QUANTIDADE DE VEÍCULOS POR CICLO SEMAFÓRICO [%]					
		DATA COLLECTION POINT	REAL	0%	10%	20%	30%
		01	[UCP's/Verde] 0,888888889	81,91%	89,89%	92,02%	93,62%
		03	[UCP's/Verde] 0,666666667	47,87%	58,51%	65,60%	74,47%
		02	[UCP's/Verde] 0,472727273	107,20%	116,20%	121,11%	128,48%

A partir das classes definidas de modelos de calibração, os modelos O da classe 03 de modelos de calibração agressivo modificado e o modelo AI da classe 05 de modelos de calibração aleatório, obtiveram melhores aproximações aos valores de campo de quantidade de Unidades de Carro de Passeio por segundo de verde (UCP's/verde) para os semáforos, Tabela 28, atingindo mais de 90% de aproximação em três

Tabela 28_ Quantidade de veículos por ciclo semafórico [UCP's/verde]: Percentual de aproximação. Modelos O e AI.

MODELO O	W99 O	QUANTIDADE DE VEÍCULOS POR CICLO SEMAFÓRICO [%]					
		DATA COLLECTION POINT	REAL	0%	10%	20%	30%
		01	[UCP's/Verde] 0,888888889	82,45%	90,43%	96,28%	97,87%
		03	[UCP's/Verde] 0,666666667	47,87%	58,51%	69,15%	78,01%
		02	[UCP's/Verde] 0,472727273	108,02%	116,20%	123,57%	128,48%
MODELO AI	W99 AI	QUANTIDADE DE VEÍCULOS POR CICLO SEMAFÓRICO [%]					
		DATA COLLECTION POINT	REAL	0%	10%	20%	30%
		01	[UCP's/Verde] 0,888888889	81,91%	98,40%	92,55%	98,40%
		03	[UCP's/Verde] 0,666666667	47,87%	78,01%	65,60%	78,01%
		02	[UCP's/Verde] 0,472727273	108,02%	131,75%	121,11%	131,75%

Portanto, considerando o ponto de coleta de dados 01, referente a via com faixa exclusiva a ser otimizada com a aplicação do sistema de priorização do ônibus, como a de maior fluxo e importância, além das demais vias terem obtido valores acima de 75% de aproximação ao observado em campo, o modelo W99 AI com input de margem adicional de 30% é tomado como o conjunto de parâmetros de calibração a ser adotado em todas as demais simulações.

7.2. Lógicas de priorização

7.2.1. Redução do tempo de verde

Para a lógica de redução do tempo de verde, foi estimado o tempo de verde ampliado requerido para a interseção, considerando uma distância média de conexão equivalente à metade do valor garantido pelo módulo de antena wireless, Figura 31 (b), 50 metros, a

distância percorrida pelo ônibus enquanto estiver conectado ao semáforo corresponderá a 210 metros, Figura 32 (a).

Figura 31_Distância conectada do ônibus com o semáforo. (a) Esquema de conexão com o semáforo. (b) Esquema de conexão, escala real.



(a)



(b)

FONTE: MyMaps (GOOGLE), 2020.

Com a velocidade média de operação do ônibus estimada em 15km/h, o tempo necessário para a travessia dos 218 metros para a perda de conexão entre o ônibus e o semáforo corresponderá a 50,4 segundos. Contudo, com o tempo mínimo de espera entre dois ônibus estimado em 2 minutos, a distância necessária para que o primeiro ônibus passe pelo semáforo antes que um segundo ônibus chegue ao mesmo ponto é de 500 metros, assim, o tempo ampliado impede a criação de conexões múltiplas e simultâneas na interseção, Tabela 29.

Tabela 29_ Tempo de verde ampliado para a interseção.

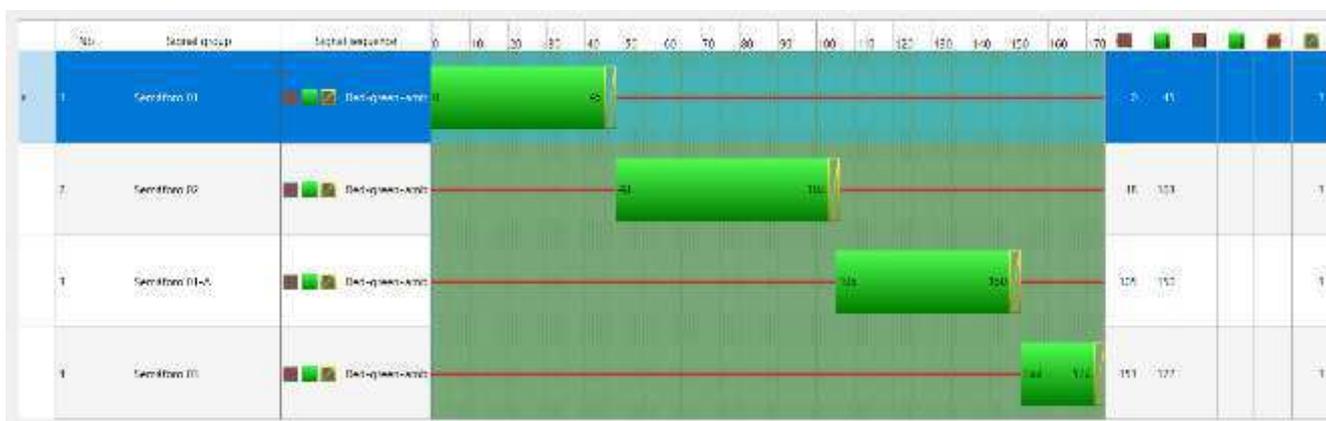
TEMPO DE VERDE AMPLIADO	
Distância de conexão [m]	100
Distância conectada [m]	210
Velocidade média do ônibus [km/h]	15
Tempo de verde necessário para 1 ônibus [s]	50,4
Tempo de distância entre dois ônibus [min]	2
Distância entre dois ônibus [m]	500

Desta forma, o tempo de verde ampliado é aplicado ao semáforo 01 nos modelos C.AMP (com verde ampliado), assim como os ciclos com verde reduzido progressivo nos semáforos 02 e 03, obtendo o conjunto de ciclos semaforicos introduzidos na simulação.

7.2.2. Mudança de Fase

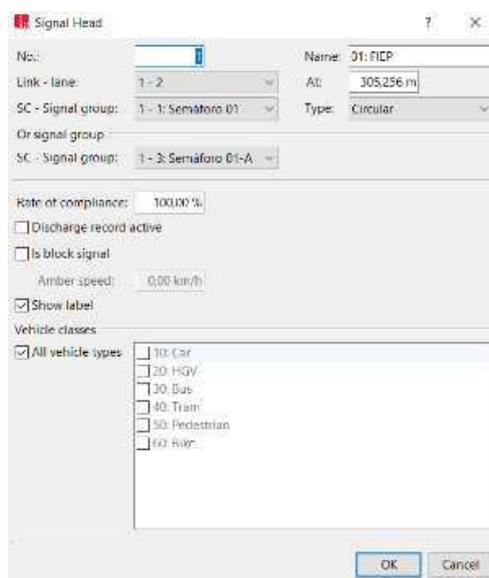
Para a aplicação desta lógica no PTV VISSIM, adicionou-se um novo grupo semaforico, denominado semáforo 01-A, com as mesmas fases do semáforo 01 de modo que o semáforo 01 pudesse ser incluído novamente no ciclo após a finalização das fases correspondentes ao semáforo 02, Figura 32.

Figura 32_ Ciclo semaforico da lógica mudança de fase.



O reconhecimento dos dois semáforos, semáforo 01 e semáforo 01-A, pela via com tráfego controlado pelo semáforo 01 (Av. Canal (CAT-CENT)), ocorre pela adição do semáforo 01-A no grupo semaforico, *signal head*, correspondente definido na simulação, Figura 33.

Figura 33_Configuração do Signal Head referente ao semáforo 01.



7.3. Saídas das Simulações

7.3.1. Quantidade de Veículos

A quantidade total de veículos corresponde ao volume de unidades de carro de passeio por segundo de verde [UCP/s_{verde}] observado dentro do intervalo de simulação (600 segundos) para cada faixa das vias com *inputs* na interseção.

a) Caso Real

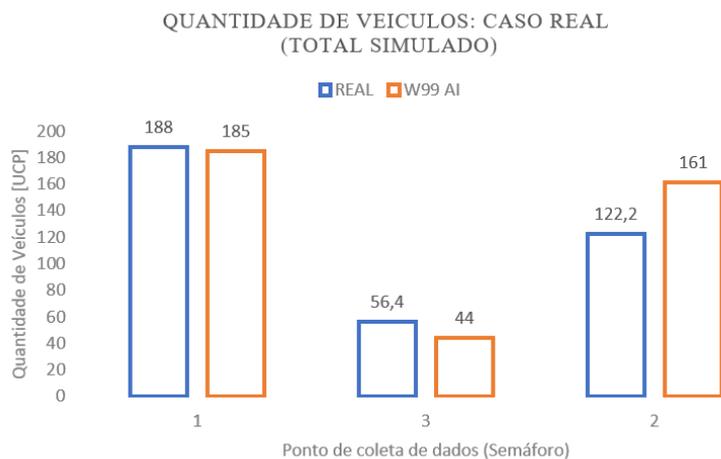
Para a simulação referente a configuração atual da interseção, os valores da quantidade de veículos obtidos para o modelo AI, são apresentados na Tabela 30.

Tabela 30_ Quantidade de veículos por tempo total de simulação: Caso real (W99 AI).

W99 AI	QUANTIDADE DE VEÍCULOS					
	DATA COLLECTION POINT	FAIXAS	0%	10%	20%	30%
	01	1	74	87	76	87
		2	72	90	90	90
		EXCLUSIVA	8	8	8	8
		TOTAL	154	185	174	185
	03	1 e 2 (TOTAL)	27	44	37	44
	02	1	48	66	58	66
		2	74	85	80	85
		3	10	10	10	10
		TOTAL	132	161	148	161

As variações observadas entre o resultado dos modelos de calibração AI e a quantidade de veículo levantada em campo (caso real), Figura 34, atinge um valor +32,57% para o semáforo 02 (Av. Canal (CENT-CAT)) e -21,99% para o semáforo 03 (Rua Campos Sales) para 30% de margem adicional ao *input*. Contudo, devido ao baixo volume de tráfego na via correspondente ao semáforo 03, a redução no valor do volume de veículos não é significativa, assim como o acréscimo de aproximadamente 33% no semáforo 02, por se tratar de uma via de maior importância.

Figura 34_ Comparação entre as quantidades de veículos entre os modelos de calibração (AI) e os dados de campo (REAL).



b) Lógicas de priorização

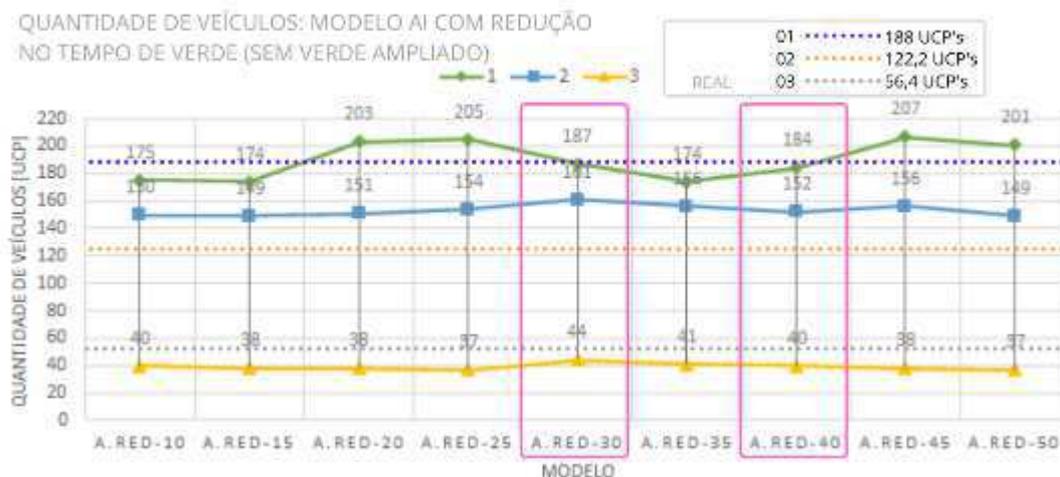
i. Redução no tempo de verde

Com os modelos definidos a partir das reduções progressivas do tempo de verde para os semáforos 02 e 03 e da inclusão do tempo de verde ampliado aos ciclos semaforicos produzidos, os resultados de quantidade de veículos, para a lógica de redução do tempo de verde, se divide em dois grupos principais de análises:

Redução progressiva sem o tempo de verde ampliado

A Figura 35 apresenta o volume de veículos no intervalo simulado para a classe de modelos de redução progressiva sem o tempo de verde ampliado, de modo que, o comportamento do modelo de calibração AI diante a redução aplicada reflete diretamente no total observado para cada semáforo.

Figura 35_Variação da quantidade de veículos no intervalo de simulação para os modelos de redução de tempo de verde sem verde ampliado (W99 AI).

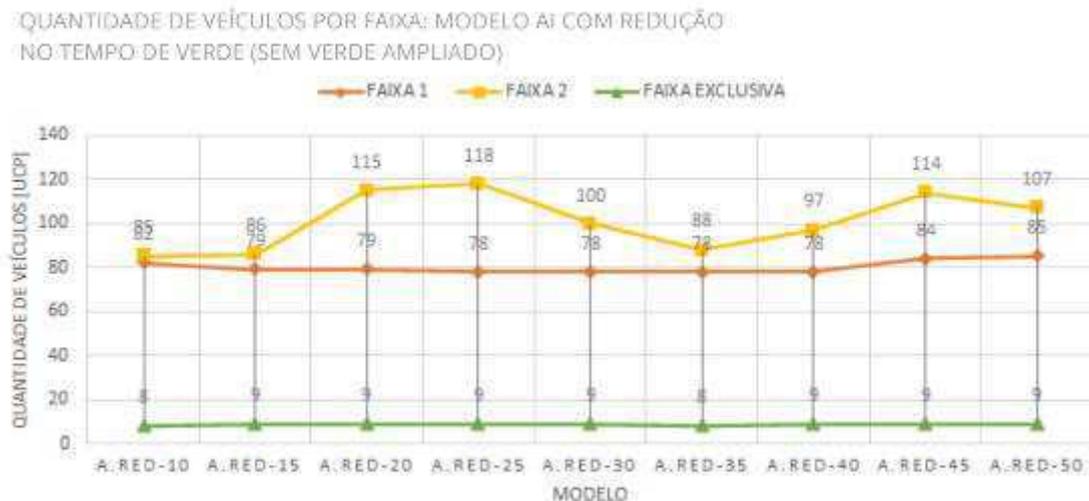


O semáforo de controle da Av. Canal (CENT-CAT), semáforo 02, apresentou aumentos consideráveis em todos os modelos com redução progressiva, enquanto o semáforo 03, da Rua Campos Sales, sofreu redução de até 34,4% em relação aos dados de campo. Estes comportamentos demonstram que, o ciclo semaforico atual, com 55 segundos de verde para o semáforo 02, é superestimado, ao ter um repasse de apenas 18 segundos de verde para o semáforo 03 da Rua Campos Sales.

Devido à instabilidade nos valores de volume para o semáforo 01, como a presença de casos iguais e próximos ao valor real (retângulos rosas), a verificação por faixa, Figura 36, permite observar os ganhos no desempenho da faixa exclusiva, visto o acréscimo de

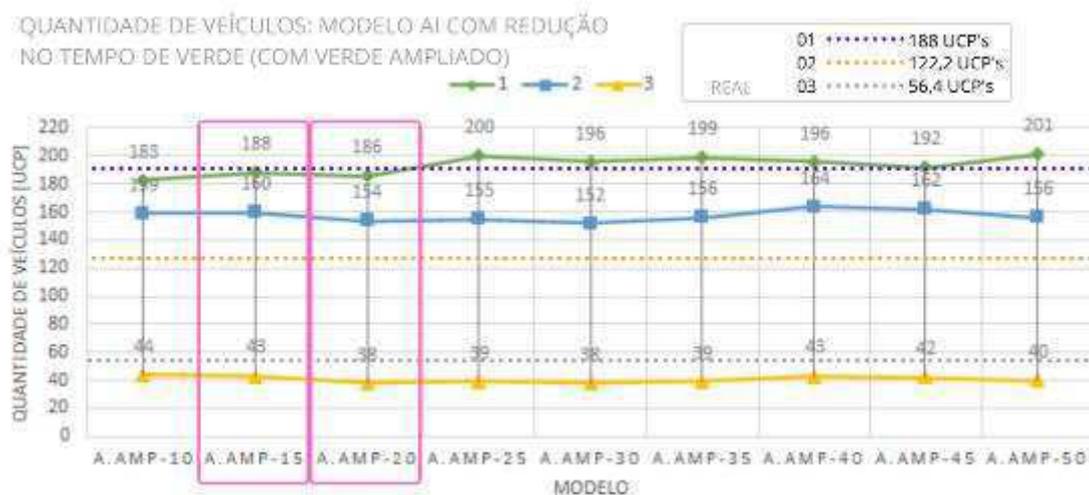
12,5% no volume de veículos que trafegam por ela no período simulado em comparação ao modelo real.

Figura 36_Variação da quantidade de veículos no intervalo de simulação por faixa da Av. Canal (CAT-CENT) para os modelos de redução de tempo de verde, sem a aplicação do tempo de verde ampliado.



Para os modelos de priorização do ônibus com redução de tempo de verde para os semáforos 02 e 03 e incluindo o tempo de verde ampliado no semáforo 01, as respostas na quantidade de veículos por semáforo no intervalo simulado são apresentadas na Figura 37 a seguir:

Figura 37_Variação da quantidade de veículos no intervalo de simulação para os modelos de redução de tempo de verde com verde ampliado. (W99 AI)



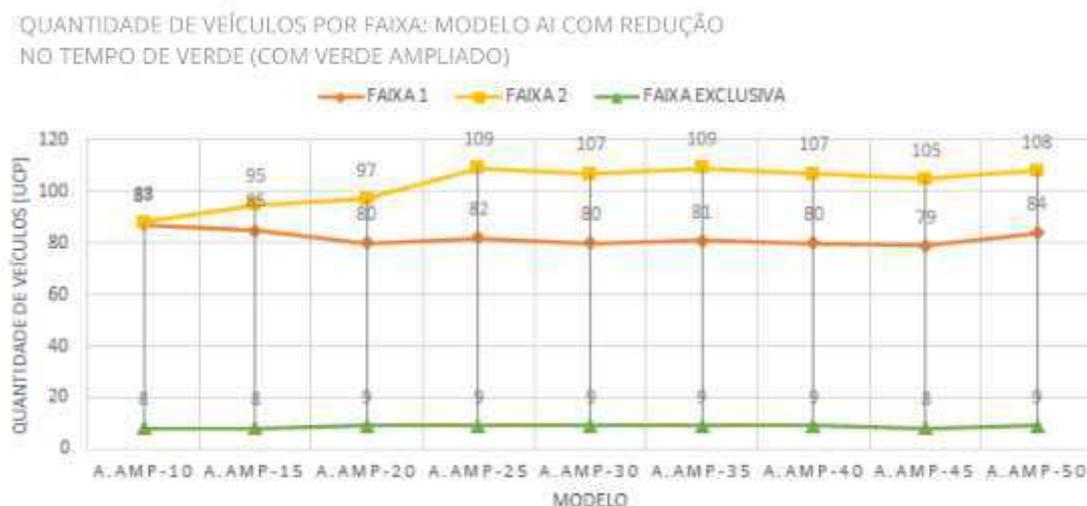
Assim como observado nos modelos sem o verde ampliado, a redução na quantidade de veículos no semáforo 03 em conjunto ao aumento verificado no semáforo 02, demonstram que, a configuração aplicada aos tempos de verde nestes semáforos é superestimada, além de esclarecer que o impacto gerado pela aplicação desse modelo de

otimização não causaria efeitos negativos consideráveis ao tráfego nas demais vias como congestionamentos ou menores velocidades de tráfego.

O crescimento na quantidade de veículos para o semáforo 01 observado em alguns modelos, mesmo que esperados, visto a aplicação do tempo de verde ampliado, ocorre em consonância a uma estabilidade nos valores dos demais semáforos.

A partir da análise do volume de veículo por faixa na Av. Canal (CAT-CENT), Figura 38, é observada a mesma taxa de crescimento no número de ônibus observada nos modelos sem o tempo de verde ampliado aplicado, 12,5%, em comparação ao modelo real, caracterizando ganhos quanto ao uso do sistema.

Figura 38_Variação da quantidade de veículos no intervalo de simulação por faixa da Av. Canal (CAT-CENT) para os modelos de redução de tempo de verde, com a aplicação do tempo de verde ampliado. (W99 AI)



ii. Mudança de fase

Para a lógica de mudança de fase, as quantidades de veículo obtidas para o modelo, Tabela 31, demonstram efeitos diretos nos semáforos 02 e 03 com relação ao semáforo 01 (faixa exclusiva), de modo que, apesar dos ganhos observados tanto na faixa exclusiva quanto nas demais faixas da via do semáforo 01, o efeito contrário gerado nas demais vias inviabiliza a sua aplicação.

Tabela 31_ Quantidade de veículos por tempo total de simulação: Caso mudança de fase (W99 AI).

QUANTIDADE DE VEÍCULOS			
DATA COLLECTION POINT	FAIXAS	REAL	MUDANÇA DE FASE
		W99 AI	W99 AI
1	1	87	82
	2	90	100
	EXCLUSIVA	8	9
	TOTAL	185	191
3	1 e 2 (TOTAL)	44	38
2	1	66	75
	2	85	66
	3	10	10
	TOTAL	161	151

7.3.2. Comprimento máximo das filas de veículos

Os comprimentos máximos para as filas são apresentados a seguir:

a) Caso Real

Para a simulação do caso real, Tabela 32, a proximidade nos valores máximos de fila obtidos para as vias Av. Canal (CENT-CAT) (semáforo 02) e Rua Campos Sales (semáforo 03), permitirá averiguar os efeitos das lógicas de priorização aplicadas, contudo, a divergência nos valores máximos de fila nas faixas 1 e 2 para o semáforo 01 também deve ser considerada nas próximas avaliações.

Tabela 32_ Comprimento máximo da fila de veículos: Caso Real.

COMPRIMENTO MÁXIMO DA FILA DE VEÍCULOS [m]		
DATA COLLECTION POINT	FAIXAS	REAL
		W99 AI
1	1 e 2	192,01
	EXCLUSIVA	14,85
3	1 e 2	64,86
2	1, 2 e 3	71,58

b) Lógicas de priorização

i. Redução no tempo de verde

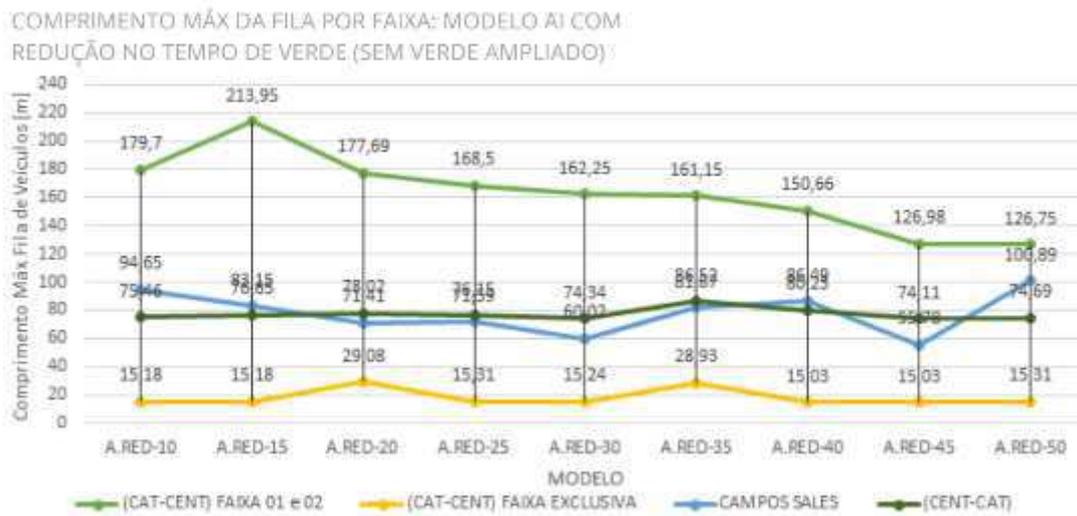
Para a lógica de redução no tempo de verde dos semáforos 02 e 03, os resultados do comprimento máxima da fila de veículos para as vias são divididos em dois grupos:

Redução progressiva sem o tempo de verde ampliado

No primeiro grupo de modelos analisado para a lógica de redução no tempo de verde, os comprimentos máximos de fila obtidos para o modelo W99, Figura 39, demonstram uma redução considerável nas filas nas faixas 01 e 02 da via otimizada, contudo, para a

faixa exclusiva as modificações não aparentam ser significantes, assim como as oscilações encontradas para a Av. Canal (CENT-CAT).

Figura 39_Variação no comprimento máximo da fila de veículos no intervalo de simulação para os modelos de redução de tempo de verde sem verde ampliado. (W99 AI)

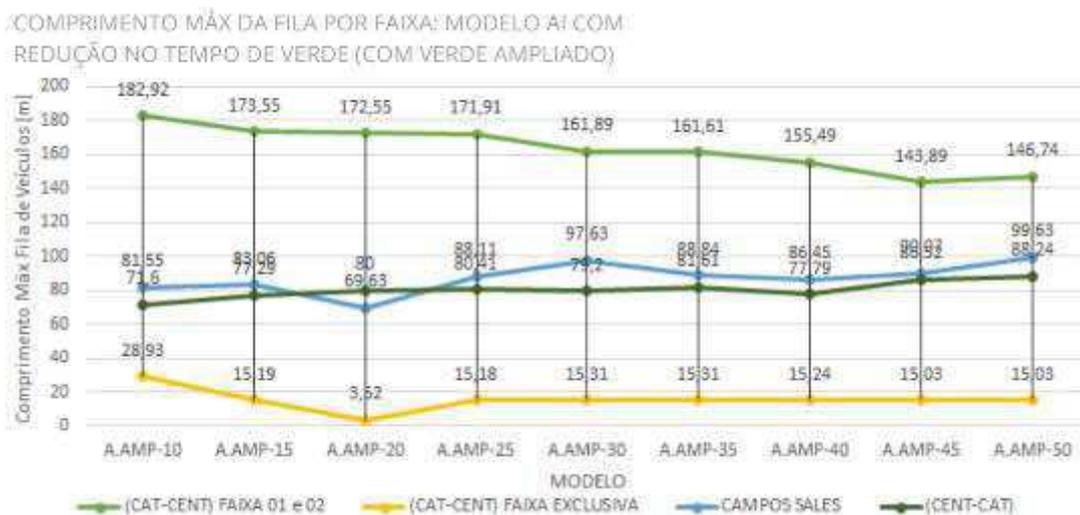


Entretanto, a Rua Campos Sales segue, de forma inversa, a tendência aparente nas faixas da via priorizada, demonstrando o crescimento no congestionamento local com a aplicação da lógica analisada.

Redução progressiva com o tempo de verde ampliado

Assim como nos modelos sem a aplicação do tempo de verde ampliado para o semáforo 01, os comprimentos máximos das filas de veículos contabilizadas para os casos deste segundo grupo, Figura 40, possuem tendências de diminuição para a Av. Canal (CAT-CENT) ao mesmo tempo que indicam crescimento no congestionamento da Rua Campos Sales.

Figura 40_Variação no comprimento máximo da fila de veículos no intervalo de simulação para os modelos de redução de tempo de verde com verde ampliado. (W99 AI)



Para a Av. Canal no sentido oposto a via da faixa exclusiva (otimizada), CENT-CAT, a variação também apresenta uma tendência de crescimento no valor encontrado, mesmo que de menor intensidade do que o observado para a via do semáforo 03. Tal ocorrência é devido ao aumento no tempo de verde do semáforo 01 ocorrer em simultaneidade a redução do verde do seu semáforo de controle, o semáforo 02.

ii. Mudança de fase

O comportamento obtido pela lógica de priorização por mudança de fase quanto ao comprimento máximo das filas de veículos não apresenta resultados satisfatórios, visto que, apesar das reduções em relação ao modelo real atingirem, aproximadamente 25% nas faixas 1 e 2 da via do semáforo 01 para o modelo de calibração W99 AI, todas as demais vias não-priorizadas sofreriam consideráveis aumentos no congestionamento, chegando a 89% de aumento no seu comprimento máximo.

Tabela 33_ Comprimento máximo da fila de veículos: Caso mudança de fase.

COMPRIMENTO MÁXIMO DA FILA DE VEÍCULOS [m]				
DATA COLLECTION POINT	FAIXAS	REAL	MUDANÇA DE FASE	[%]
		W99 AI	W99 AI	W99 AI
1	1, 2 e 3	192,01	162,25	-15,50%
	EXCLUSIVA	14,85	15,31	+3,10%
3	1 e 2	64,86	115,59	+78,21%
2	1	71,58	130,48	+82,29%

Assim, o impacto gerado pela implantação da lógica de priorização dos ônibus que trafegam na faixa exclusiva da Av. Canal (CAT-CENT), com base na mudança de fase, não se mostra eficaz, quando o impacto sobre o trânsito das vias adjacentes é verificado.

7.3.3. Tempo de viagem e velocidade média de operação

Então, assim como no levantamento dos dados de verificação do impacto das lógicas de otimização no tráfego da interseção, os resultados de tempo de viagem e velocidade média são apresentados conforme os grupos a seguir:

a) Caso Real

Para o modelo *car following* aplicado na simulação (W99 AI), Tabela 34, a proximidade nos tempos de viagem e velocidade operacional para a Av. Canal (CAT-CENT), via otimizada, permite que qualquer variação ocorrida após a aplicação das lógicas de priorização do ônibus, possa ser comparada de igual medida.

Tabela 34_Tempo médio de viagem e velocidade média de operação: Caso Real (W99 AI).

VIA	MOVIMENTOS	COMPRIMENTO DO TRECHO [m]	W99 AI	
			TEMPO MÉDIO DE VIAGEM [s]	VELOCIDADE MÉDIA DE OPERAÇÃO [km/h]
AV. CANAL (CAT-CENT)	1	317,9381	90,813	12,60
	2	433,3614	86,157	18,11
	3	368,6292	80,207	16,55
	4	470,0036	83,810	20,19
FAIXA EXCLUSIVA	X	439,4774	172,764	9,16
AV. CANAL (CENT-CAT)	5	372,0334	66,940	20,01
	6	485,9315	60,525	28,90
	7	356,9355	42,437	30,28
	8	449,7723	54,951	29,47
RUA CAMPOS SALES	9	353,094	129,558	9,81
	10	303,0855	150,881	7,23
	11	405,4239	157,651	9,26

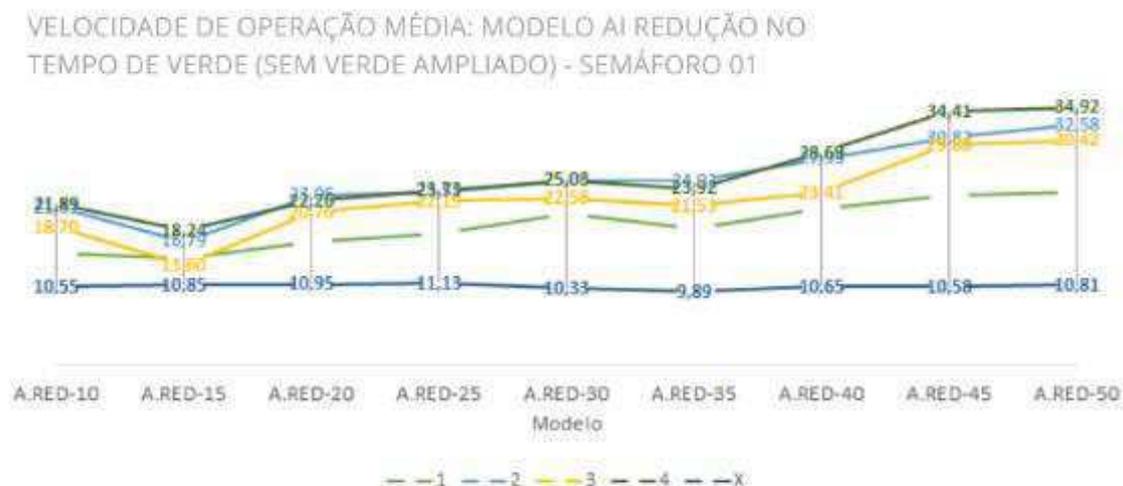
Entretanto, para as vias adjacentes (Av. Canal CENT-CAT e Rua Campos Sales), os modelos não podem ser equiparados, pois apresentam considerável divergência entre os dados de velocidade e tempo de viagem obtidos.

b) Lógicas de Priorização

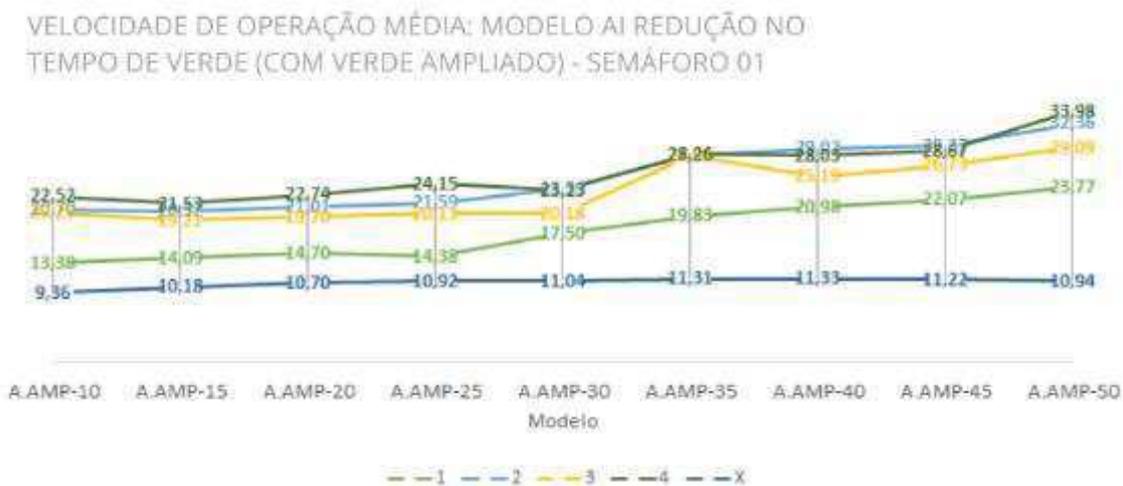
i. Redução no tempo de verde

Através da relação entre o tempo médio de viagem e a velocidade de operação dos veículos, de forma que permita analisar as respostas obtidas pelas simulações após a aplicação das lógicas de priorização do ônibus nos semáforos, a apresentação dos dados para os modelos de redução progressiva do tempo de verde dos semáforos 02 e 03, com ou sem a aplicação dos tempos de verde ampliado, estará disposta para os movimentos correspondentes a via do semáforo 01 (Av. Canal CAT-CENT) (e seu semáforo), sendo apresentado apenas as velocidades obtidas, Figura 41.

Figura 41_ Variação na velocidade média de operação no intervalo de simulação, correspondentes as faixas controladas pelo semáforo 01, para os modelos: (a) W99 AI sem o tempo de verde ampliado. (b) W99 AI com o tempo de verde ampliado.



(a)



(b)

A eficiência da otimização do tempo de viagem médio e, conseqüentemente, na velocidade de operação dos ônibus na faixa exclusiva (X) após a aplicação do sistema de redução do tempo de verde é esclarecida quando analisados os percentuais de variação em relação ao caso real, Tabela 35.

Tabela 35_ Variação percentual da velocidade média de operação em relação ao caso real.

	VARIÇÃO PERCENTUAL DA VELOCIDADE MÉDIA DE OPERAÇÃO								
	A.RED-10	A.RED-15	A.RED-20	A.RED-25	A.RED-30	A.RED-35	A.RED-40	A.RED-45	A.RED-50
AI - SEM VERDE AMPLIADO	+15,24	+18,45	+19,54	+21,50	+12,79	+8,03	+16,29	+15,52	+17,99
AI - COM VERDE AMPLIADO	+2,25	+11,19	+16,80	+19,26	+20,52	+23,54	+23,68	+22,54	+19,44

Sendo atingido um acréscimo de até 23,68% em relação a resposta obtida no caso real para a faixa exclusiva, correspondente a uma redução no tempo de viagem de 33

segundos, é verificada a validação da eficiência da lógica empregada em prover a otimização ao transporte público por ônibus que trafega na faixa exclusiva da interseção analisada.

Mudança de fase

A partir da lógica de mudança de fase, os resultados de tempo médio de viagem e velocidade de operação para a faixa exclusiva apresentam um acréscimo de 21,07% em relação ao modelo real para o modelo W99 AI, de modo que há redução no tempo médio de viagem atinge 30,12 segundos, Tabela 36. Apesar dos ganhos na otimização da faixa exclusiva, o tempo médio de viagem na Rua Campos Sales, para o mesmo modelo, teve um crescimento de 256,6 segundos, indicando a formação de congestionamento, inviabilizando a aplicação da lógica de mudança de fase para este caso.

Tabela 36_ Velocidade média de operação e tempo médio de viagem: Casos Real e Mudança de fase (W99 AI).

			W99 AI			
			REAL		MUDANÇA DE FASE	
VIA	MOVIMENTOS	COMPRIMENTO DO TRECHO [m]	TEMPO MÉDIO DE VIAGEM [s]	VELOCIDADE MÉDIA DE OPERAÇÃO [km/h]	TEMPO MÉDIO DE VIAGEM [s]	VELOCIDADE MÉDIA DE OPERAÇÃO [km/h]
AV. CANAL (CAF-CENT)	1	317,9381	90,813	12,60	58,366	19,61
	2	433,3614	86,157	18,11	53,335	29,25
	3	368,6292	80,207	16,55	44,052	30,12
	4	470,0036	83,810	20,19	48,449	34,92
FAIXA EXCLUSIVA	X	439,4774	172,764	9,16	142,646	11,09
AV. CANAL (CENT-CAJ)	5	372,0334	66,940	20,01	66,115	20,26
	6	485,9315	60,525	28,90	95,562	18,31
	7	356,9355	42,437	30,28	99,637	12,90
	8	449,7723	54,951	29,47	97,776	16,56
RUA CAMPOS SALES	9	353,094	129,558	9,81	238,176	5,34
	10	303,0855	150,881	7,23	223,082	4,89
	11	405,4239	157,651	9,26	250,947	5,82

8. CONCLUSÕES

A construção de modelos virtuais que busquem representar um comportamento ou uma configuração existente em uma situação de tráfego, sempre sofrerá com desvios ou margens de incertezas devido a impossibilidade de incluir todos os fatores de infraestrutura e de comportamento dos veículos que compõem a situação.

Este ponto é atingido já durante a calibração do modelo, quando há a locação dos equipamentos urbanos e há a definição dos parâmetros de comportamento para os veículos.

A entrada de veículos, *inputs*, com margens adicionais conseguiu suprir as variações de entrada que o trânsito cotidiano sofre, já que, os valores levantados eram uma média da quantidade de veículos por ciclo semafórico, o que não obteria uma tendência linear em um intervalo de apenas dez minutos de tráfego.

Assumir o melhor resultado dentre as cinco classes de modelos com parâmetros de calibração do Wiedemann 99, permitiu observar que, apesar do modelo selecionado para o primeiro método (AI) ter sido definido pela formação aleatória de modelos, a sua escolha se deu a partir de intervalos de dados pré-estabelecidos e baseados em valores referenciados.

Somado aos fatores de configuração e controle de comportamento já citados, as lógicas de priorização possuem divergência e especificidades que influenciam diretamente nos resultados obtidos.

De forma geral, ambas as lógicas, independente do modelo de calibração adotado, apresentaram melhorias significativas no fluxo de ônibus para a via otimizada, de modo que foi atingida uma redução de até 33 segundos no tempo médio de viagem para apenas um semáforo.

Levando em consideração que, durante o trecho especificado para estimar o tempo de viagem dos ônibus durante a Av. Canal (CAT-CENT), haviam dois pontos de parada de ônibus que, obrigatoriamente, eram visitados pelos veículos desta faixa durante a simulação, a redução de 33 segundos mesmo com este tempo adicional, representa um valor considerável. Tomando como base a ideia de que o sistema seja aplicado em um conjunto contínuo de semáforos ao longo da avenida, o ganho de 33 segundos para apenas um semáforo se torna significativo.

Contudo, mesmo com a eficácia verificada em ambos as lógicas para priorizar o tráfego dos ônibus, as influências causadas nas demais vias devem ser consideradas, já que, outras linhas podem ser prejudicadas para a otimização das que percorrem a via prioritária.

Desta forma, a lógica de mudança de fase, em prática, se tornaria inviável, não apenas pelas repostas obtidas na simulação, pois como verificado, a configuração adotada para o ciclo com os tempos de verde para os semáforos 02 e 03 sendo respectivamente 55s e 18s se mostra ineficaz, mas também por avaliar que, um motorista aguardando a continuidade do ciclo, se deparar novamente com o acionamento de um semáforo que não o seu, pode aumentar o nível de estresse dele, ou então, ao esperar, logicamente, o acionamento do seu semáforo, ocorra um acidente com um motorista precipitado.

Portanto, os ganhos obtidos pela configuração lógica de redução no tempo de verde, permite verificar que, métodos lógico-operacionais podem ser aplicados para sanar problemas de priorização do transporte público, sem necessariamente serem utilizadas soluções de infraestrutura de trânsito, proporcionando ganhos de tempo, redução de custos e garantindo o bem-estar dos usuários frequentes deste modal prioritário.

9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abdselsamee, N. M., Alsulaimani, H., & Albatati, N. (2018). Experimental Setup of Smart Traffic Control using Wireless Sensor Networks. *2018 21st Saudi Computer Society National Computer Conference (NCC)*. Riyadh, Saudi Arabia: IEEE.
- Amado, H., Soares, F., Ribeiro, P., Elisabete, F., Tavares, J. P., & Ferreira, S. (2019). ANÁLISE EXPLORATÓRIA DOS CONFLITOS VEÍCULO-PEÃO COM RECURSO À MICRO SIMULAÇÃO. *33º Congresso de Pesquisa e Ensino em Transporte da ANPET*, 3419-3426.
- Anitha, & Babu, K. R. (2018). IOT for ITS: An IOT based dynamic traffic signal control. *Proceeding of the International Conference on Inventive Research in Computing Applications (ICIRCA 2018)* (pp. 532-536). Bangalore, India: IEEE.
- ANTP, A. (2017). *CUSTOS DOS SERVIÇOS DE TRANSPORTE PÚBLICO POR ÔNIBUS: INSTRUÇÕES PRÁTICAS*. São Paulo: ANTP.
- ARDUINO. (02 de 04 de 2018). *O que é o Arduino?* Acesso em 15 de 10 de 2019, disponível em Arduino: <https://www.arduino.cc/en/Guide/Introduction>
- Barat, J., & Batista, M. S. (1973). *Transporte público e programas habitacionais*. Brasília DF: Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (Ipea).
- Basil, E., & Sawant, S. D. (2017). IoT based Traffic Light Control System using Raspberry Pi. *IEEE International Conference on Energy, Communication, Data Analytics and Soft Computing (ICECDS-2017)* (pp. 1078-1081). Chennai, Tamil Nadu, India: IEEE.
- Basso, L. J., Guevara, C. A., Gschwender, A., & Fuster, M. (2011). Congestion pricing, transit subsidies and dedicated bus lanes: Efficient and practical solutions to congestion. *Transport Policy*, 676-684.
- Begum, E. K., & Bashir, R. (2019). Implementation of a Speed Control System Using Arduino. *6th International Conference on Electrical and Electronics Engineering (ICEEE)* (pp. 294-297). Stavanger, Norway: IEEE.
- Bloomberg, L., & Dale, J. (2000). *A Comparison of the VISSIM and CORSIM Traffic Simulation Models*. Washington, Estados Unidos: Institute of Transportation Engineers Annual Meeting.
- BRASIL. (1988). *Constituição Federal*. Acesso em 0 de 11 de 2019
- BRASIL. (1997). *LEI Nº 9.503, DE 23 DE SETEMBRO DE 1997. Código Brasileiro de Trânsito*.
- Brasil. (10 de jul de 2001). *LEI No 10.257, DE 10 DE JULHO DE 2001*. Acesso em 03 de 11 de 2019, disponível em Estatuto das Cidades: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/LEIS/LEIS_2001/L10257.htm#art40%C2%A72

- BRASIL. (3 de jan de 3 de Janeiro de 2012). *Lei n. 12.587 Mobilidade Urbana no Brasil*. Acesso em 11 de 03 de 2019, disponível em Diretrizes da Política Nacional de Mobilidade Urbana: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2011-2014/2012/lei/l12587.htm
- Caragliu, A., Del Bo, C., & Nijkamp, P. (2011). Smart Cities in Europe. *Journal of Urban Technology*, 65-82.
- CONFEDERAÇÃO NACIONAL DE TRANSPORTES, & ASSOCIAÇÃO NACIONAL DAS EMPRESAS DE, T. (2017). *Pesquisa: Mobilidade da População Urbana 2017*. Brasília: CNT:NTU.
- Correia, A. L. (2019). *Intervenções operacionais visando a regularidade e a eficiência de sistemas de ônibus urbanos: resenha de estudos acadêmicos e simulações de aplicações com dados reais*. São Paulo: Dissertação apresentada para a obtenção do título de Mestre em Engenharia de Transportes pela Universidade de São Paulo – USP.
- Couto, V. C., & Lobo, C. F. (2019). Desigualdades regionais da acessibilidade ao transporte coletivo por ônibus: análise do Vetor Norte da Região Metropolitana de Belo Horizonte. *Congressos \ ARENA ANTP – Congresso Brasileiro de Transporte e Trânsito 2019*. São Paulo: ANTP e OTM.
- Cycling Promotion Fund. (21 de 08 de 2015). *Canberra Transport Photo*. Acesso em 11 de 12 de 2019, disponível em WeRide!Australia: <https://www.cyclingpromotion.org/>
- Das, S., Chandrakat, N., & Das, S. S. (2016). MIL-STD-1553 Based Wireless Visible Light Communication System. *IEEE International Conference on Advanced Networks and Telecommunications Systems (ANTS)*. Bangalore, India: IEEE.
- DENATRAN, D. (2001). *Manual de Procedimentos para o tratamento de polos geradores de tráfego*. Brasília: DENATRAN/FGV.
- DENATRAN, D. (2007). *Manual Brasileiro de Sinalização de Trânsito*. Brasília.
- DETRAN-PB, D. (2018). *FROTA GERAL DE VEÍCULOS - PARAÍBA*. João Pessoa.
- Devi, R. B., Reddy, D. K., Savani, E., Srujan, G., Shankar, S., & Chakrabartty, D. S. (2017). Density Based Traffic Signal System Using Arduino UNO. *Proceedings of the International Conference on Inventive Computing and Informatics* (pp. 426-429). Coimbatore, India: IEEE.
- DNIT, D. d. (2010). *MANUAL DE SINALIZAÇÃO RODOVIÁRIA* (3ª ed.). Rio de Janeiro: IPR.
- Ferreira, D. Q. (2012). Financiamento a BRTs: a experiência internacional do BNDES. *Revista do BNDES, Rio de Janeiro, n.38, 5-50*.
- Gehl, J. (2013). *Cidades Para Pessoas*. São Paulo: Perspectiva.
- George, A. M., & George, V. (2018). IOT based Smart Traffic Light Contro System. *IEEE International Conference on Control, Power, Communication and*

- Computing Technologies (ICCPCT)* (pp. 148-151). Kannur, Kerala, India: IEEE.
- GOOGLE. (2020). *Google Maps: Trânsito local em tempo real e trânsito típico*.
- Higgs, B., Abbas, M. M., & Medina, A. (2011). Analysis of the Wiedemann Car Following Model over Different Speeds using. *Transportation Research Record*, 1-22.
- Huertas, D. M. (2018). *Território e Circulação: Transporte rodoviário de cargas no Brasil*. São Paulo: UNIFESP.
- IBGE, I. (2017). *Pesquisa de Informações Básicas Municipais: Perfil dos Municípios Brasileiros*. Brasília: IBGE.
- Karlaftis, M. G., & Vlahogianni, E. I. (2011). Statistical methods versus neural networks in transportation research: Differences, similarities and some insights. *Transportation Research Part C*, v.19, 387-399.
- Khushi. (2017). Smart Control of Traffic Light System using Image Processing. *IEEE International Conference on Current Trends in Computer, Electrical, Electronics and Communication (ICCTCEEC-2017)* (pp. 99-103). Bangalore, India: IEEE.
- Knox, P. (2016). Industrialização. Em P. Knox, *Atlas das Cidades* (pp. 12-13). São Paulo: SENAC.
- Lacerda, V. M. (2016). *ESTIMAÇÃO DA VELOCIDADE MÉDIA EM VIAS URBANAS COM USO DO MICROSSIMULADOR VISSIM*. Fortaleza: Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes da Universidade Federal do Ceará. UFC.
- Lacerda, V. M., & Neto, M. M. (2014). CONSIDERAÇÕES SOBRE A CALIBRAÇÃO DO MODELO DE CAR-FOLLOWING DO VISSIM PARA VIAS ARTERIAIS URBANAS. *ANPET - Associação Nacional de Pesquisa e Ensino em Transportes*, 2-12.
- Machado, F. T. (2019). Tarifa zero para todos os usuários de ônibus no município de São Paulo – o sonho continua? *Congressos \ARENA ANTP – Congresso Brasileiro de Transporte e Trânsito 2019*. São Paulo: ANTP e OTM.
- Maman, L. P. (2018). *Proposição de um método de codificação de rodovia de pista simples em região montanhosa a partir dos dados do Google Earth no microssimulador VISSIM : estudo de caso da rodovia ERS-115*. Porto Alegre: Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. UFRGS.
- Marcy, M. C. (2017). *Metodologia Baseada Em Redes Neurais Artificiais para a Detecção de Danos Estruturais*. Brasília, DF: Tese de Doutorado em Estruturas e Construção.
- Mayer, H. (2016). Cidade Verde. Em P. Knox, *Atlas das Cidades* (pp. 211-225). São Paulo: SENAC.

- McDonnell, S., & Zellner, M. (2011). Exploring the effectiveness of bus rapid transit a prototype agent-based model of commuting behavior . *Transport Policy*, 825-835.
- Ministério da Infraestrutura. (02 de Fev de 2019). *DENATRAN*. Acesso em 03 de 11 de 2019, disponível em Frota Nacional 2019: <https://www.denatran.gov.br/component/content/article/115-portal-denatran/8559-frota-de-veiculos-2019.html>
- Motamedidehkordi, N., Margreiter, M., & Benz, T. (2016). Shockwave Suppression by Vehicle-to-Vehicle Communication. *Transportation Research Procedia*, 471-482.
- My Maps, G. (s.d.). *Mapa da definição do trecho analisado*. Acesso em 14 de 09 de 2019, disponível em <https://www.google.com/maps/d/u/0/edit?hl=pt-BR&mid=1dpRZrslcB8zMu5iWUippgg76cd3lX1f&ll=-7.220819967625879%2C-35.88208730000002&z=16>
- Oliveira, C. C., & Junior, S. A. (2015). Dificuldades e expectativas oriundas da implantação de faixa exclusiva para ônibus em Luanda. . *ANTP 20º Congresso Brasileiro de Transporte e Trânsito: IX INTRANS Exposição Internacional de Transporte e Trânsito*. Santos: ANTP.
- Oliveira, E. (18 de 01 de 2019). *Como usar com Arduino – Módulo Transceptor Wireless NRF24L01 2.4GHz com Antena*. Acesso em 17 de 09 de 2019, disponível em Blog Master Walker Shop: <https://blogmasterwalkershop.com.br/arduino/como-usar-com-arduino-modulo-transceptor-wireless-nrf24l01-2-4ghz-com-antena/>
- Oliveira, M. L., & Cybis, H. B. (2008). Revisão da Experiência de Calibração do Software Vissim Aplicado a um Estudo de Caso de Autoestrada Brasileira. *VIII SEPROSUL- Semana de Engenharia de Produção Sul-Americana*, Bento Gonçalves.
- Papacostas, C. S., & Prevedouros, P. D. (2000). *Transportation Engineering and Planning* (3ª ed.). Englewood Cliffs, New Jersey, U.S.: Prentice Hall.
- PTV, G. (2015). *VISSIM 8 Manual*. Karlsruhe, Germany.
- PTV, G. (2018). *PTV VISSIM 9: User Manual*. Karlsruhe, Alemanha.
- Singh, D., Sood, A., Thakur, G., Arora, N., & Kumar, A. (2017). Design and Implementation of Wireless Communication System for Troll Colletction Using LIFI. *4th IEEE International Conference on Signal Processing, Computing and Control (ISPCC,2017)* (pp. 510-515). Solan, Índia: IEEE.
- Sousa, V. V. (2016). *Uso da simulação microscópica para a avaliação do tempo de viagem de sistemas de transporte público por ônibus em corredores de tráfego misto*. Fortaleza: Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes)-Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará.
- Souza, K. C. (2016). Cidade Inteligente. Em P. Knox, *Atlas das Cidades* (p. 232). São Paulo: SENAC.

- Suarez, M. L., Alvarez, L. E., Camacho, P. A., Marin, L. C., Vasquez, B., Gutierrez, G., . . . Henao, S. (2018). Automatic System to Optimize the Travel Time of BRT Metro Plus Buses Line 1 of the City of Medellin. *MOVICI-MOYCOT 2018: Joint Conference for Mobility in the Smart City* (pp. 80-85). Medellin, Colombia: IET Digital Library.
- Sunehra, D., & Sengen, R. (2017). Automatic Street Light Control System using Wireless Sensor Networks. *IEEE International Conference on Power, Control Signals and Instrumentation Engineering (ICPCSI-2017)* (pp. 2915-2919). Chennai: IEEE.
- TomTom. (2018). *Traffic Index*. Amsterdã, Holanda.: TomTom.
- United States, F. H. (2013). *The Effective Integration of Analysis, Modeling, and Simulation Tools*. Washington: United States. Federal Highway Administration. Office of Operations Research and Development.
- Vasconcellos, E. A. (2000). *Transporte urbano nos países em desenvolvimento* (3ª ed.). São Paulo: ANNABLUME.
- Verma, G., Singh, I., Chugh, S., Verma, D., & Kamti, M. (2016). Automated Red Light Enforcement Camera for Traffic Control. *IEEE International Conference on Computing for Sustainable Global Development (INDIACom)* (pp. 1997-2000). New Delhi, India: IEEE.
- Vieira, M. d. (2017). *Análise e proposta de corredor de prioridade ao transporte público em sinalização luminosa na cidade do Porto*. Porto, Portugal.: Relatório de Estágio submetido ao Instituto Superior de Engenharia do Porto para satisfação parcial dos requisitos do grau de Mestre em Engenharia Civil - Infraestruturas.
- Weidemann, R., & Weiter, U. (1992). *Microscopic Traffic Simulation - The Simulation System Mission –Background and Actual State*.
- Wiedemann, R. (1974). *Simulation des Verkehrsflusses*. Karlsruhe, Germany: Dissertação do Instituts fuer Verkehrswesen, Heft 8, Uniersitaet Karlsruhe.
- Wiedemann, R., & Reiter, U. (1992). *Microscopic Traffic Simulation: The Simulation System Mission*. Project ICARUS (V1052) Final Report, Vol. 2, Appendix A, CEC, Brussels.
- Zanella, A., Bui, A., Castellani, A., Vangelista, L., & Zorzi, M. (2014). Internet of Things for Smart Cities. *IEEE Internet of Things Journal*, 22-32.
- Zhang, K., Liu, X., & Jianming, Y. (2019). Identifying the driving forces of CO2 emissions of China's transport sector from temporal and spatial decomposition perspectives. *Environmental Science and Pollution Research*, 24.