

AVALIAÇÃO DE MEDIDAS DE PRIORIDADE AO TRANSPORTE PÚBLICO EM INTERSECÇÕES CONTROLADAS POR SINAIS LUMINOSOS

DANIELA DE MEO DULCINI

Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de

MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL

ESPECIALIZAÇÃO EM PLANEAMENTO DO TERRITÓRIO E TRANSPORTES

Orientador: Professor Doutor José Pedro Maia Pimentel Tavares

MARÇO DE 2023

MESTRADO EM ENGENHARIA CIVIL 2022/2023

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

Tel. +351-22-508 1901

✉ m.ec@fe.up.pt

Editado por

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Rua Dr. Roberto Frias

4200-465 PORTO

Portugal

Tel. +351-22-508 1400

✉ feup@fe.up.pt

🌐 <http://www.fe.up.pt>

Reproduções parciais deste documento serão autorizadas na condição que seja mencionado o Autor e feita referência a *Mestrado em Engenharia Civil - 2022/2023 - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2023*.

As opiniões e informações incluídas neste documento representam unicamente o ponto de vista do respetivo Autor, não podendo o Editor aceitar qualquer responsabilidade legal ou outra em relação a erros ou omissões que possam existir.

Este documento foi produzido a partir de versão eletrónica fornecida pelo respetivo Autor.

A meus Pais e meu Irmão

Feliz aquele que transfere o que sabe e aprende o que ensina

Cora Coralina

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar gostaria de agradecer aos meus pais Sergio e Silvana e ao meu irmão Fernando, que possibilitaram a realização do sonho de estudar fora do país. Agradeço pelo amor incondicional e por todo o carinho que sempre foi a base da nossa relação. Agradeço pela educação, pela confiança nas minhas capacidades e por serem sempre meu porto seguro. Mesmo longe estamos sempre juntos e dedico esta tese a vocês.

Agradeço aos meus avós João, Camila, José Antônio e Tomico por todo o amor e carinho e por sempre torcerem pela minha felicidade e sucesso.

Um especial agradecimento ao meu orientador, Professor Doutor José Pedro Maia Pimentel Tavares por todo o apoio e disponibilidade na orientação deste trabalho. Agradeço pela paciência e pela dedicação em me ensinar, me incentivar e guiar nesta jornada.

Agradeço à FEUP por todos os conhecimentos e experiências que pude vivenciar aos longo dos anos, que serviram para o meu crescimento pessoal e profissional. Agradeço também à SOLTRÁFEGO e toda a equipa, em especial ao Doutor Carlos Estima, pela oportunidade de realizar a dissertação em ambiente empresarial e por todo o apoio que me forneceram.

Agradeço ao meu namorado Eduardo por todo o amor e carinho, por sempre me apoiar, me incentivar e acreditar em mim. Agradeço pela paciência, por me ajudar a seguir em frente com leveza e ser meu porto seguro.

Agradeço a todos os meus amigos que sempre estiveram comigo nessa jornada, muito obrigada pelas risadas, pelos momentos de alegria e também por todo o suporte nos momentos difíceis. Um especial agradecimento às minhas amigas Bianca Alves e Eneida Aguiar por todo o apoio, incentivo e por sempre estarem ao meu lado.

Por fim, agradeço à Ariana Simplício e ao João Véstia da TIS e à Camila Carpinteiro por toda a ajuda e atenção que me deram para que eu pudesse desenvolver o trabalho e aprofundar meus conhecimentos quanto ao *software* utilizado. Agradeço também a todos que de alguma forma contribuíram para a realização deste trabalho.

RESUMO

O uso intensivo dos automóveis nas áreas urbanas tem causado uma série de consequências negativas para o meio ambiente e para a população. Os problemas vão desde poluição sonora e atmosférica, até congestionamento e aumento do tempo de percurso. É sob este panorama que surge a necessidade de investimento nas condições operacionais dos Transportes Públicos para torná-los mais atrativos para a população.

A prioridade semafórica é uma das medidas mais utilizadas para proporcionar condições que privilegiem o autocarro. Porém, como a priorização dos autocarros afeta não só a via por onde eles circulam, mas a intersecção como um todo, é preciso uma avaliação cuidadosa das condições de tráfego da intersecção, para minimizar eventuais impactos negativos.

Assim, o presente trabalho propôs-se a estudar estratégias de prioridade semafórica, utilizando como caso de estudo uma intersecção da cidade do Porto. A avaliação dos resultados pautou-se na comparação do Cenário Base com o Cenário Alternativo. No primeiro, não foi aplicada nenhuma estratégia de prioridade à intersecção e no segundo, duas estratégias foram abordadas, a Antecipação do Verde e a Extensão do Verde, ambas aplicadas a fase da via priorizada.

A análise foi feita através de microsimulação, utilizando o *software* PTV Vissim 2022 para modelar a rede e os cenários estudados e o módulo PTV VisVAP para fazer a atuação dos autocarros. Os indicadores de desempenho utilizados para avaliar o desempenho das medidas adotadas na intersecção foram o Atraso médio do passageiro, Atraso médio do veículo, Comprimento de fila médio e Nível de serviço.

Com os resultados foi possível observar que as medidas de prioridade melhoraram o desempenho dos transportes públicos e da via priorizada como um todo, porém em detrimento da via não priorizada, que teve seu desempenho prejudicado.

Dessa forma, concluiu-se que as medidas de prioridade podem de facto ser uma alternativa para melhorar o desempenho do autocarro, porém é preciso um estudo cuidadoso para minimizar o impacto negativo na via não priorizada.

PALAVRAS-CHAVE: Transporte público, Prioridade semafórica, Antecipação do verde, Extensão do verde, Indicadores de desempenho.

ABSTRACT

The increasing use of private cars in urban areas has a negative impact for the environment and the population. The problems range from noise and air pollution to congestion and increased travel time. It is under this reality that the need for investment in the operational conditions of public transportation arises, in order to make it more attractive to the population.

Transit signal priority is one of the most used measures to provide conditions that prioritize public transportation. However, since bus prioritization affects not only the lane they travel on, but the intersection as a whole, a careful evaluation of the intersection traffic conditions is necessary to minimize the possible negative impacts.

Thus, this research work proposed to study traffic signal priority strategies, using as a case study an intersection in the city of Porto. The evaluation of the results was based on the comparison of the Base Scenario with the Alternative Scenario. In the first scenario, no priority strategy was applied to the intersection, and in the second one, two strategies were addressed, Green Anticipation and Green Extension, both applied to the prioritized street phase.

The analysis was done through microsimulation, using the PTV Vissim 2022 software to model the network and the studied scenarios and the PTV VisVAP to module buses' priority. The performance indicators used to evaluate the performance of the studied measures at the intersection were the Average Passenger Delay, Average Vehicle Delay, Average Queue Length, and Level of Service.

From the results it was possible to observe that the priority measures improved the performance of public transportation and the prioritized lane as a whole, but to the detriment of the nonprioritized lane, which had its performance impaired.

Thus, it was concluded that the priority measures can indeed be an alternative to improve the performance of public transport, but a careful study is needed to minimize the negative impact on the nonprioritized lane.

KEY WORDS: Public Transport, Transit signal Priority, Green Anticipation, Green Extension, Performance Indicators.

ÍNDICE GERAL

AGRADECIMENTOS	i
RESUMO	iii
ABSTRACT	v

1.INTRODUÇÃO 1 |

1.1. ENQUADRAMENTO	1
1.2. OBJETIVOS	2
1.3. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	2

2.TRANSPORTE PÚBLICO RODOVIÁRIO 5 |

2.1. INTRODUÇÃO	5
2.2. CARACTERIZAÇÃO DOS TRANSPORTES PÚBLICOS	6
2.2.1. LINHAS	6
2.2.2. PARAGENS	8
2.3. ESTRATÉGIAS DE PRIORIDADE	8
2.3.1 INTERVENÇÕES VIÁRIAS	9
2.3.1.1. Corredor BUS	9
2.3.1.2. Faixas Exclusivas	10
2.3.3. PRIORIDADE NAS PARAGENS DE AUTOCARRO	10
2.3.4. PRIORIDADE SEMAFÓRICA	11
2.3.4.1. Estratégias de Prioridade Passiva	12
2.3.4.1. Estratégias de Prioridade Ativa	13
2.4. TECNOLOGIAS DE DETECÇÃO DE VEÍCULOS	17
2.5. BENEFÍCIOS DA PRIORIDADE SEMAFÓRICA	19

3. METODOLOGIA 23 |

3.1. INTRODUÇÃO	23
3.2. MODELO DE SIMULAÇÃO	25
3.2.1.SIMULADOR MICROSCÓPICO PTV VISSIM	25
3.3. INDICADORES DE DESEMPENHO	27

3.3.1.PTV VISSIM - ANÁLISE	28
----------------------------------	----

4. CASO DE ESTUDO 31

4.1. ENQUADRAMENTO.....	31
-------------------------	----

4.2. CARACTERIZAÇÃO DA ZONA DE ESTUDO	34
---	----

4.2.1. SINALIZAÇÃO LUMINOSA A TEMPOS FIXOS	35
--	----

4.3. CARACTERIZAÇÃO DO CENÁRIO ALTERNATIVO	38
--	----

4.3.1. TRANSPORTE PÚBLICO - LINHAS.....	38
---	----

4.3.2. TRANSPORTE PÚBLICO - PARAGENS	40
--	----

4.4. DEFINIÇÃO DAS ESTRATÉGIAS DE PRIORIDADE.....	43
---	----

4.4.1. ANTECIPAÇÃO DO VERDE	43
-----------------------------------	----

4.4.2. EXTENSÃO DO TEMPO DE VERDE	45
---	----

4.5. DEFINIÇÃO DOS ELEMENTOS DE AVALIAÇÃO	46
---	----

5. ANÁLISE DE RESULTADOS..... 49

5.1. ENQUADRAMENTO.....	49
-------------------------	----

5.2. ANÁLISE DO DESEMPENHO DOS TRANSPORTES PÚBLICOS	49
---	----

5.3. ANÁLISE DO DESEMPENHO DA INTERSECÇÃO	53
---	----

5.3.1. ATRASO MÉDIO DO VEÍCULO	53
--------------------------------------	----

5.3.2. COMPRIMENTO DE FILA MÉDIO	56
--	----

5.3.3. NÍVEL DE SERVIÇO.....	58
------------------------------	----

6. CONCLUSÃO 61

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	65
---------------------------------	----

ANEXOS.....	69
-------------	----

ANEXO I.....	71
--------------	----

ANEXO II.....	75
---------------	----

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Exemplo de linha - Linha 303. Fonte: <i>site STCP</i> .	6
Figura 2 - Exemplo de horário - Linha 303. Fonte: <i>site STCP</i> .	7
Figura 3 - Tipos de linhas. Fonte: Costa, A. 2008.	7
Figura 4 – Faixa Exclusiva. Fonte: Pistas e Faixas Exclusivas - Prefeitura Belo Horizonte.	10
Figura 5 – Faixa exclusiva, no fluxo, sem segregação física, com baia para ultrapassagem. Fonte: Prioridade para o Transporte Coletivo, Relatório Técnico (2002).	11
Figura 6 – Prioridade incondicional – Fluxograma. (Adaptado de Peron, L., 2015)	14
Figura 7 - Prioridade semafórica condicional. Fonte: Peron, L. (2015).	15
Figura 8 – Prioridade Semafórica – Extensão do verde e Antecipação do verde. Fonte: Christofa, E. (2012).	16
Figura 9 - Prioridade Semafórica – Realocação de fase. Fonte: NACTO.	17
Figura 10 – Detetor de <i>loop</i> indutivo. Fonte: Johnson, J. (2016).	18
Figura 11 – Detetor de câmara de vídeo. Fonte: <i>ATC Moving Traffic</i> .	18
Figura 12 - Metodologia da Dissertação.	23
Figura 13 – Metodologia de avaliação dos resultados. (Adaptado de Neves, J., 2006).	29
Figura 14 – Área de Estudo. Fonte: <i>Google Maps</i> , 2023.	32
Figura 15 - Rede base construída no programa PTV Vissim. Fonte: SOLTRÁFEGO SA, 2022.	33
Figura 16 - Intersecção do Caso de estudo.	34
Figura 17 - Composição dos veículos no PTV Vissim.	35
Figura 18 - Distribuição de velocidade dos veículos adotada no modelo no PTV Vissim.	35
Figura 19 - Diagrama de Implantação. Fonte: SOLTRÁFEGO (2022).	36
Figura 20 - Diagrama de Ciclo (HPM / HPT). SOLTRÁFEGO (2022).	37
Figura 21 – Diagrama de Fases.	38
Figura 22 - Dados para caracterização das linhas de autocarros no PTV Vissim.	39

Figura 23 - Cronograma da linha 402 (Boavista – S. Roque) na paragem FG2. Fonte: <i>Site STCP, 2023</i>	40
Figura 24 - Frequência de partida da linha 402 (Boa Vista – S. Roque) no PTV Vissim.	40
Figura 25 – Localização das Paragens na área de estudo. Fonte: <i>Google Maps, 2023</i>	41
Figura 26 - Dados para caracterização das paragens no PTV Vissim – <i>Base data</i>	41
Figura 27 - Dados para caracterização das paragens no PTV Vissim – <i>Boarding Passengers</i>	42
Figura 28 - Lógica de atuação – Antecipação do Verde.....	44
Figura 29 - Lógica de atuação – Extensão do Verde.....	45
Figura 30 - Elementos de Avaliação do modelo (PTV Vissim).	47
Figura 31 – Gráfico representativo do Atraso Médio do Passageiro (HPM).....	50
Figura 32 - Gráfico representativo do Atraso Médio do Passageiro (HPT).	52
Figura 33 - Gráfico representativo do Atraso Médio do Veículo (HPM).....	53
Figura 34 - Gráfico representativo do Atraso Médio do Veículo (HPT).	55
Figura 35 - Gráfico representativo do Comprimento de Fila Médio (HPM).	56
Figura 36 - Distância entre a intersecção em análise e a intersecção anterior. Fonte: <i>Google Maps, 2023</i>	57
Figura 37 - Gráfico representativo do Comprimento de Fila Médio (HPT).	58
Figura 38 – Matriz O/D local HPM SLAT 087 (Seção 1).....	76
Figura 39 – Matriz O/D local HPM SLAT 087 (Seção 2).....	76
Figura 40 – Matriz O/D local HPT SLAT 087 (Seção 1).....	77
Figura 41 – Matriz O/D local HPT SLAT 087 (Seção 2).....	77
Figura 42 - Matriz O/D local HPM SLAT 086	78
Figura 43 - Matriz O/D local HPT SLAT 086	79

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 - Impactos das Estratégias de Prioridade. (Adaptado de Brinckerhoff, P., <i>et al.</i> , - 2013).	20
Tabela 2 – Paragens e Linhas inseridas na rede.....	42
Tabela 3 – Comparação do atraso médio do passageiro entre o Cenário Base e as diferentes estratégias de prioridade ao Transporte Público (HPM)	51
Tabela 4 - Comparação do atraso médio do passageiro entre o Cenário Base e as diferentes estratégias de prioridade ao Transporte Público (HPT).....	52
Tabela 5 - Comparação do atraso médio do veículo entre o Cenário Base e as diferentes estratégias de prioridade ao Transporte Público (HPM).....	54
Tabela 6 - Comparação do atraso médio do veículo entre o Cenário Base e as diferentes estratégias de prioridade ao Transporte Público (HPT)	55
Tabela 7 - Nível de Serviço da Intersecção (HPM).....	58
Tabela 8 - Nível de Serviço da Intersecção (HPT).....	59

SÍMBOLOS, ACRÓNIMOS E ABREVIATURAS

TP – transporte público

HPM – hora de ponta da manhã

HPT - hora de ponta da tarde

HCM – Highway Capacity Manual

STCP – Sociedade de Transportes Coletivos do Porto

CB – Cenário Base

AV – Antecipação do Verde

EV – Extensão do tempo de Verde

1

INTRODUÇÃO

1.1. ENQUADRAMENTO

Com o crescente desenvolvimento económico e tecnológico, o custo para se adquirir um automóvel tem diminuído ao longo dos anos e o poder aquisitivo da população tem aumentado. Os veículos particulares fornecem uma versatilidade e conforto maior quando comparados aos transportes públicos e em muitos casos é sinónimo de *status*.

O uso crescente desses veículos tem alterado o padrão de mobilidade urbana, trazendo consequências negativas para o meio ambiente e para a população. Nota-se nas últimas décadas aumento da poluição atmosférica e sonora, aumento do congestionamento e do tempo de viagem dos veículos, especialmente nas áreas urbanas.

Para solucionar os problemas gerados pelo uso intensivo dos automóveis, as Autoridades Locais têm criado estratégias que incentivam o uso dos transportes públicos. Essas estratégias criam condições que privilegiam o transporte público, tornando-os mais eficientes, confiáveis e atrativos para a população e podem ser classificadas em medidas diretas, indiretas, físicas ou operacionais.

As medidas diretas são aquelas que melhoram a oferta do sistema de transporte público, como por exemplo o aumento da frota de autocarros disponível em determinada linha, enquanto as indiretas agem dificultando e desincentivando o uso dos transportes individuais, como por exemplo com a restrição à circulação de automóveis a certas zonas da cidade, em dias específicos da semana.

Já as medidas físicas são aquelas que fazem alterações na infraestrutura, como por exemplo a implantação de corredores BUS, enquanto as operacionais alteram a forma como os elementos da rede operam, sendo a prioridade de passagem ao autocarro em intersecções controladas por sinais luminosos um exemplo cada vez mais utilizado atualmente.

Dessa forma, essas estratégias buscam aumentar o desempenho dos autocarros, reduzindo o atraso sofrido pelas viaturas e promovendo a fiabilidade do sistema.

1.2. OBJETIVOS

O principal objetivo deste trabalho é avaliar estratégias de prioridade de passagem ao autocarro em intersecções semaforizadas e como essa prioridade afeta, não só o próprio serviço de transporte público, mas também o desempenho das vias e da intersecção como um todo.

O trabalho foi desenvolvido em âmbito empresarial em colaboração com a empresa SOLTRÁFEGO – Soluções de Trânsito, Estacionamento e Comunicações, SA e estudou diferentes estratégias de prioridade ao transporte público, sendo a prioridade semafórica o foco deste trabalho.

A metodologia pautou-se no estudo de uma intersecção da cidade do Porto com recurso à microsimulação e comparação de dois cenários distintos: o primeiro, chamado Cenário Base, em que nenhuma estratégia de prioridade semafórica foi aplicada à intersecção e o segundo, chamado Cenário Alternativo, no qual definiu-se duas estratégias de prioridade para serem estudadas.

A avaliação das medidas de prioridade foi feita através da comparação dos indicadores de desempenho dos diferentes cenários, e das diferentes estratégias aplicadas à intersecção.

1.3. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

A estrutura da dissertação está dividida em 6 capítulos, incluindo o presente onde é apresentado o tema de estudo, um breve enquadramento do problema, os objetivos pretendidos com o trabalho e a estrutura da dissertação.

O segundo capítulo contém o enquadramento do problema, além de informações conceituais para a caracterização do sistema de transporte público e das estratégias de prioridade. Fornece informações sobre a forma de deteção dos autocarros, para que seja possível a atuação semafórica e as vantagens que as estratégias de prioridade podem proporcionar ao transporte público.

O terceiro capítulo descreve a metodologia e as ferramentas utilizadas para avaliar as estratégias de prioridade, além dos possíveis indicadores de desempenho a serem utilizados.

O quarto capítulo apresenta o caso de estudo e informações detalhadas de como se construiu os cenários a serem avaliados. Apresenta também quais as estratégias de prioridade semafórica e quais os indicadores de desempenho foram utilizados para a avaliação.

O quinto capítulo apresenta os resultados obtidos das simulações, bem como a análise desses resultados. Para tal, é feita uma comparação gráfica e numérica dos valores obtidos nos diferentes cenários, levando-se em consideração o desempenho dos autocarros, da via priorizada e da via não priorizada, ou seja, da intersecção como um todo.

O último capítulo discute as principais conclusões retiradas do trabalho e da análise dos resultados e apresenta uma breve indicação de possíveis melhorias a serem desenvolvidas futuramente

2

TRANSPORTE PÚBLICO RODOVIÁRIO

2.1. INTRODUÇÃO

O transporte público é fundamental na medida em que permite o acesso da população aos bens e serviços de uma forma mais igualitária. Porém, para que isso aconteça, é preciso existir uma rede bem estruturada que garanta um funcionamento adequado deste sistema.

O sistema de transporte público possui três pilares fundamentais, que se bem executados, garantem viagens mais eficientes, seguras, com menor impacto ambiental e mais atratividade ao utente. Esses pilares são o ordenamento do território, as restrições ao uso do transporte individual e o apoio ao transporte público [1].

O presente trabalho de investigação centra-se em medidas de apoio ao Transporte Público, nomeadamente na prioridade em intersecções controladas por sinais luminosos, não deixando, no entanto, de se descrever neste Capítulo questões ligadas ao ordenamento do território, designadamente os aspetos ligados à caracterização do Transporte Público e a medidas de prioridade em geral.

Genericamente, o transporte público rodoviário é caracterizado por ser um sistema de transporte que utiliza veículos rodoviários, designadamente o autocarro, para transporte de passageiros entre diferentes pontos de um território, sendo regulado por órgãos governamentais e podendo ser operado por empresas público ou privadas. Os serviços de transporte público rodoviário geralmente possuem linhas e horários pré-definidos e incluem paragens em pontos específicos ao longo do percurso.

Relativamente às medidas de prioridade em geral, estas são fundamentais para garantir a eficiência e confiabilidade do transporte, podendo-se afirmar que as mesmas incluem:

- Prioridade: dar prioridade ao transporte público no tráfego rodoviário, permitindo que se movimente mais rapidamente e com menos interrupções;
- Estações dedicadas: paragens de transporte público inclusivas para facilitar o embarque e desembarque de passageiros;
- Informação: fornecer informação clara quer nas paragens, quer nos veículos;

- Integração de sistemas: integrar os sistemas de transporte público para garantir que as informações sobre horários, rotas e preços sejam consistentes e fáceis de interpretar;
- Tecnologia: investir em tecnologia para melhorar a segurança, eficiência e comodidade do transporte público, como sistemas de bilhética e informação em tempo real;
- Intermodalidade: cooperação com outros modos de transporte, integrando outros modos de transporte, como modos suaves e veículos individuais, oferecendo soluções integradas de mobilidade;
- Investimento na infraestrutura: melhoria na infraestrutura do transporte público, como vias, veículos e paragens, para garantir sua segurança e confiabilidade a longo prazo.

Nos pontos seguintes e tendo presente o tema do trabalho de investigação apenas ir-se-á realizar uma descrição genérica da caracterização dos transportes públicos inerentes à modelação e das medidas de prioridade que poderiam ser analisadas.

2.2. CARACTERIZAÇÃO DOS TRANSPORTES PÚBLICOS

2.2.1. LINHAS

As linhas de transporte público podem ser definidas como elementos que conectam os diferentes pontos da malha urbana e que conjuntamente compõem a rede de transporte público. Para sua caracterização, é importante definir o seu traçado e pontos de paragem (Figura 1), ou seja, sua cobertura espacial e sua frequência de passagem e período de serviço (Figura 2), isto é, a sua cobertura temporal [1].

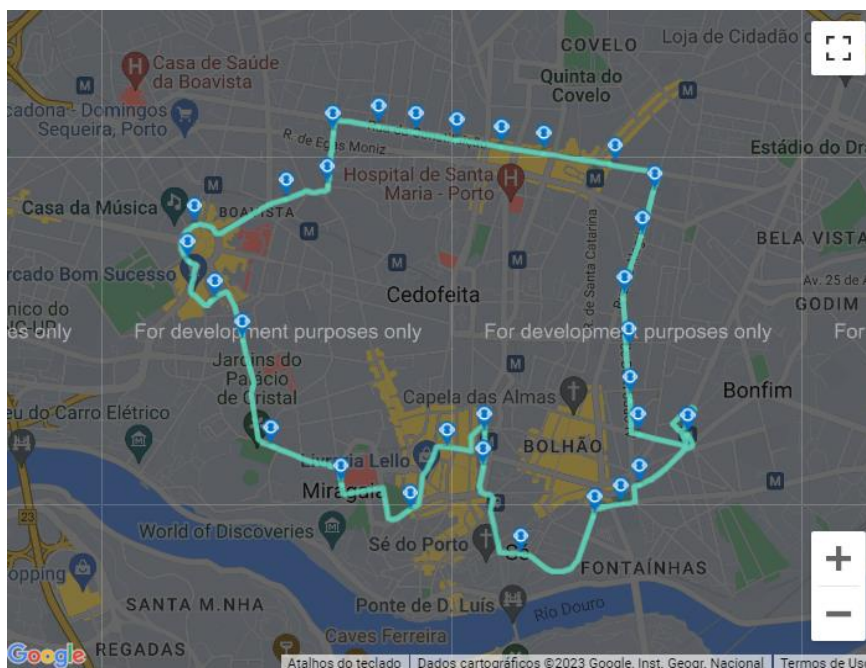


Figura 1 - Exemplo de linha - Linha 303. Fonte: *site STCP*.

	NORMAL	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	h
	A partir de 31/08/2020	21	17	13	07	14	05	12	03	10	04	11	12	12	11	06 ^b	11 ^a		minutos
		41	30	26	23	31	22	29	20	25	17	26	27	27	28	18 ^a			
		58	43	39	31 ^a	48	39	46	37	38	30	41	42	42	38 ^a	31			
			58	52	40		56		54	51	43	56	57	57	48				
					57						56								

Figura 2 - Exemplo de horário - Linha 303. Fonte: *site STCP*.

Do ponto de vista espacial, a caracterização das linhas é feita através da origem e destino das mesmas, junto com seu código, traçado e extensão total. As paragens e terminais também devem ter localizações conhecidas e a classificação das linhas é feita em função do tipo de percurso efetuado, nomeadas abaixo e ilustradas na Figura 3:

- Linhas tangenciais (4) – o percurso se desenvolve próximo ao perímetro da cidade;
- Linhas diametrais (2, 3, 6) – atravessam a zona central, mas possuem trechos significativos fora do centro;
- Linhas radiais (1) – possuem um extremo na periferia e outro na zona central;
- Linhas circulares (5) – os extremos (inicial e final) são coincidentes ou estão em locais muito próximos.

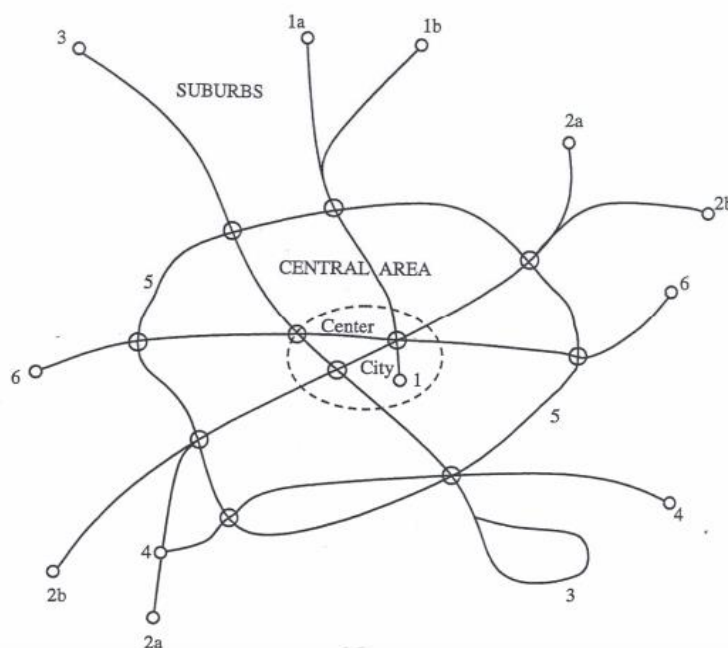


Figura 3 - Tipos de linhas. Fonte: Costa, A. 2008.

Do ponto de vista operacional, o transporte público pode compartilhar a via junto com o tráfego ou possuir um espaço de circulação exclusivo, com separação longitudinal. Ainda, a área de influência da linha, para que ela seja considerada atrativa, é definida por círculos de raio de aproximadamente 300m (ou 600m) centrados nas paragens, o que equivale a percursos pedonais de aproximadamente 5 ou 10 minutos [1].

No que se refere à cobertura temporal, a caracterização é realizada baseada na frequência das passagens dos autocarros e no período de funcionamento do serviço, tendo como um indicador a frequência média, que corresponde ao intervalo de tempo médio entre as passagens, por dia e para os diferentes períodos do dia.

2.2.2. PARAGENS

As paragens são pontos localizadas ao longo das linhas, onde ocorre o embarque e desembarque dos passageiros. Podem ser constituídas de postaletes, abrigos, ou ainda serem estações, que são locais de estrutura especial e possuem outras funcionalidades dedicadas aos passageiros e veículos, para além das áreas de embarque e desembarque, como por exemplo zonas de comércio e lazer, bilheteria e resguardo das viaturas.

Para que se tenha um serviço de qualidade, é expectável que a densidade das paragens corresponda a aproximadamente 2 a 3 paragens por quilómetro. As paragens devem ser locais adequados para que o utente aguarde a chegada do autocarro e consiga fazer o embarque e desembarque com facilidade. É ideal que estejam localizadas próximas dos pólos geradores de passageiros e afastadas de locais sensíveis aos ruídos gerados pela paragem e arranque dos autocarros. Além disso, é preciso que o utente tenha uma boa visualização dos autocarros que se aproximam e que o impacto gerado no tráfego devido ao tempo parado gasto no embarque e desembarque de passageiros seja o menor possível [1].

2.3. ESTRATÉGIAS DE PRIORIDADE

Com a crescente utilização dos transportes individuais e os efeitos negativos associados a esse panorama, cada vez mais os governos têm adotado meios para facilitar e estimular o uso do transporte público nas cidades. Dessa forma, as estratégias de prioridade têm ganhado destaque como uma forma eficaz para se atingir tal objetivo. Essas estratégias criam condições que privilegiam a circulação do autocarro, tornando o sistema mais prático, rápido, eficiente e atrativo para o cidadão. Elas podem ser classificadas como diretas, indiretas, a nível físico ou operacional.

As medidas diretas têm o objetivo de melhorar as condições de oferta do transporte público, como por exemplo, aumentando a segurança e a qualidade dos veículos. Já as medidas indiretas buscam dificultar o uso dos transportes individuais e torná-los menos atrativos ao cidadão. Em algumas

cidades, por exemplo, são aplicadas limitações à circulação de veículos em certos dias da semana, ou a determinadas zonas da cidade [2].

A nível físico, as estratégias envolvem elementos baseados na infraestrutura, como por exemplo as intervenções viárias, enquanto as medidas operacionais estão relacionadas às alterações na forma como os veículos ou os elementos da rede operam, como por exemplo a prioridade nas interseções controladas por sinalização luminosa (prioridade semafórica).

2.3.1 INTERVENÇÕES VIÁRIAS

2.3.1.1. Corredor BUS

O corredor BUS é uma via de tráfego integrada ao sistema viário urbano, dedicada à circulação dos transportes públicos, separada através de sinalização vertical e marcação horizontal no pavimento, não existindo obstáculos físicos separando a via Bus do tráfego em geral que circula nas demais vias [3].

Essa via pode ser exclusiva, onde apenas circula o autocarro ou de uso preferencial, permitindo também a passagem de motociclos, velocípedes, veículos de emergência e táxis.

Estas vias exclusivas permitem alguma flexibilidade, pois podem ser dedicadas à circulação do transporte público permanentemente ou em períodos específicos, como por exemplo períodos de ponta e durante o dia, quando o tráfego é mais intenso [4].

Além disso, podem estar localizadas à direita ou à esquerda da via, junto ao passeio ou junto ao separador central e ainda ser no “sentido” ou no “contra sentido” do tráfego em geral. Segundo Neves, J. (2006) [5], as vias BUS melhoram as condições operacionais do sistema de transporte público, sendo as vantagens mais comuns esperadas:

- Aumento na velocidade média dos veículos de TP devido a segregação da via bus com o tráfego em geral e, conseqüentemente, redução no tempo de viagem do autocarro;
- Ganho de confiabilidade, já que os tempos de viagem dependem menos do tráfego e congestionamento local, portanto possuem menor variação;
- Aumento do conforto, ao passo que são necessárias menores alterações nas acelerações e desacelerações dos autocarros;
- Melhorias ambientais e menores gastos energéticos, já que a diminuição dos tempos de viagem e das alterações na aceleração podem reduzir o tempo de operação e gasto energético dos veículos.

Em contrapartida, as desvantagens podem estar ligadas principalmente a questões operacionais, como por exemplo a redução do número de vias dedicadas ao tráfego em geral, o que pode penalizar o mesmo, além de questões de logística, como por exemplo na perda de estacionamento na via da direita

e perda de área dedicada a carga e descarga de mercadorias nos estabelecimentos comerciais adjacentes à via bus.

2.3.1.2. Faixas exclusivas

As faixas exclusivas diferem-se do corredor BUS ao possuírem separação física entre a via dedicada ao autocarro e o tráfego em geral [3], como mostra a Figura 4.



Figura 4 – Faixa Exclusiva. Fonte: Pistas e Faixas Exclusivas - Prefeitura Belo Horizonte.

Como o nível de segregação é alto, o custo associado à sua implementação é maior e, portanto, geralmente são usados em regiões onde o fluxo de autocarros é muito elevado.

As principais vantagens atribuídas a este tipo de prioridade são [3]:

- Aumento no nível de segregação e prioridade do autocarro;
- Maior velocidade operacional;
- Reduzida fiscalização da utilização da faixa;
- No caso de faixas centrais, não sofre influência das viragens à direita e por isso possibilita o estacionamento e as operações de carga e descarga.

Já as desvantagens estão relacionadas ao maior custo e tempo de implementação, à formação de uma nova barreira física na via e a questões ligadas aos movimentos de viragem para o tráfego em geral, à esquerda ou direita conforme a localização da faixa.

2.3.3. PRIORIDADE NAS PARAGENS DE AUTOCARRO

As paragens são pontos importantes no trajeto do autocarro, porque o tempo despendido no embarque e desembarque dos passageiros pode ser considerável. Muitas vezes os veículos ficam posicionados

atrás de outro veículo, à espera de poderem chegar à paragem, outras vezes ficam na fila aguardando para poderem partir. A duração do tempo nas paragens é condicionada pela sua capacidade (em termos de número de veículos e passageiros) e pela possibilidade de ultrapassagem.

Para solucionar essa questão, podem ser criadas baías ou vias adicionais para ultrapassagem, que aumentem a capacidade e o desempenho das paragens. Por exemplo, em Bogotá, com a implantação de vias de ultrapassagem junto às paragens, foi possível duplicar a capacidade das mesmas. Porém, para se alcançar tal objetivo, é necessária uma grande área disponível para as vias de ultrapassagem, o que nem sempre é possível devido a ocupação do território, podendo assim implicar em grandes custos de implantação [3].

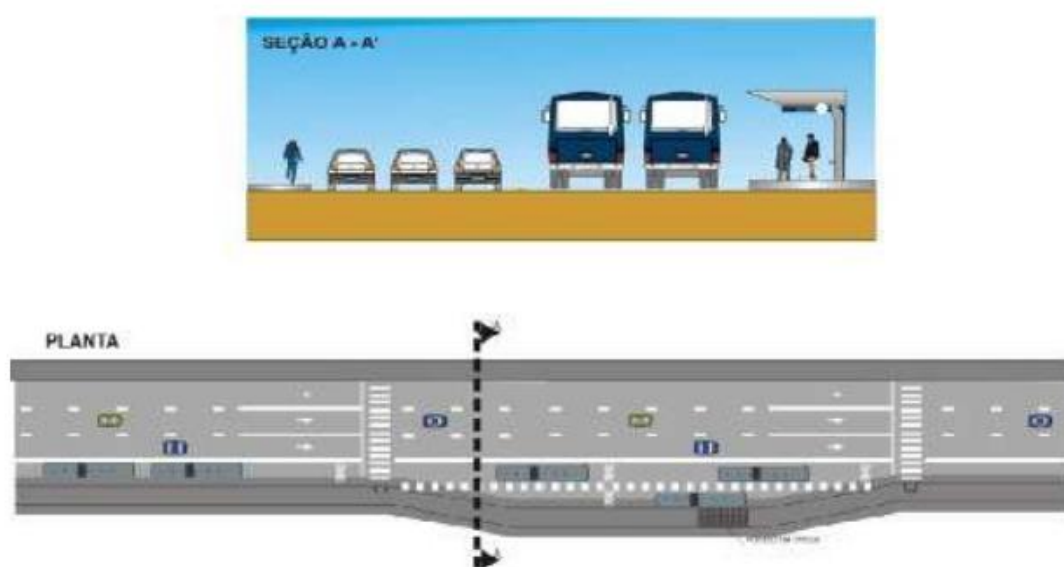


Figura 5 – Faixa exclusiva, no fluxo, sem segregação física, com baía para ultrapassagem. Fonte: Prioridade para o Transporte Coletivo, Relatório Técnico (2002).

Outra questão importante está ligada à distância entre as paragens. Quanto mais próximas estão, mais interrupções são necessárias e, portanto, maior o tempo de percurso. Dessa forma, recomenda-se uma distância de 300m a 600m entre as mesmas, de forma a facilitar o acesso das pessoas e ao mesmo tempo otimizar o desempenho do autocarro [1].

2.3.4. PRIORIDADE SEMAFÓRICA

A prioridade semafórica consiste numa estratégia operacional que altera o processo normal do sinal para facilitar a circulação do autocarro nas intersecções. Como uma parte significativa do atraso dos veículos de TP que circulam em vias mistas ocorre em decorrência do congestionamento, tal estratégia tem como objetivo criar mecanismos que favoreçam a passagem do autocarro nas intersecções, reduzindo o tempo que os veículos ficam retidos nas filas e consequentemente o tempo de viagem e o atraso dos mesmos [6].

Esta medida pode ser considerada como versátil, pois uma vez implantada, pode ser alterada facilmente consoante a procura e sem grandes investimentos estruturais. Porém, importa ressaltar que se não for bem projetada, pode causar grande impacto negativo no tráfego em geral.

As estratégias de prioridade semaforica podem ser classificadas em duas categorias principais, nomeadamente: Prioridade Passiva e Ativa (condicional ou incondicional), e que se descrevem nos pontos seguintes.

2.3.4.1. Estratégias de prioridade passiva

As estratégias de prioridade passiva baseiam-se em dados históricos, conhecimentos e padrões relativos às operações dos veículos de transporte público e atuam continuamente, sem depender da presença dos veículos. Assim, baseado em tais informações constrói-se um plano que priorize os veículos TP, não sendo necessário o uso de sistemas de deteção [7].

Esse tipo de estratégia é promissor quando as operações dos autocarros são previsíveis e existe um conhecimento “fidedigno” sobre as linhas, horários, procura de passageiros e tempo de permanência nas paragens dos veículos de TP [8]. Como não existe um sistema de deteção que identifique o tráfego em tempo real, a prioridade funciona independente da presença ou não do veículo na intersecção, portanto é preciso haver consistência nas operações dos autocarros, já que uma diferença significativa entre a procura real e a procura de dimensionamento, pode causar o efeito contrário ao esperado e aumentar o atraso dos veículos.

Ainda, como as estratégias são projetadas para as vias dedicadas ao TP sem a existência de sistema de deteção, as vias não priorizadas podem sofrer atrasos desnecessários e, consequentemente, percepções negativas por parte dos condutores. Portanto, ao se criar os planos de prioridade também é preciso ter em atenção o volume de tráfego não priorizado [8].

As principais estratégias de prioridade passiva envolvem ajustar a duração do ciclo e o tempo das fases, como descrito a seguir [9]:

- A primeira abordagem envolve reduzir a duração do ciclo para atender ao autocarro mais rapidamente, diminuindo o tempo que ele fica retido no sinal vermelho e assim o seu atraso.
- A segunda abordagem envolve a divisão das fases que atendem o veículo de TP em duas ou mais fases. Com essa estratégia, autocarros com horários de chegada diferentes conseguem encontrar tempos de vermelho menores e, portanto, menores atrasos. Porém, a capacidade da intersecção pode ser reduzida, pelo aumento do tempo total perdido ocasionado pela introdução de tempos adicionais de interverdes no fim de cada fase.

A título de exemplo, a velocidade dos veículos de transporte público no *Bus Rapid Transit* (BRT) de Guangzhou, China, obteve uma melhoria de 15 km/h para 21 km/h nos períodos de ponta devido à redução do comprimento do ciclo e do número de fases. Em Londres, Reino Unido, a prioridade passiva forneceu melhores resultados para volumes superiores a 60 veículos por hora do que outras estratégias de prioridade. Porém, em Toronto, Canadá, um estudo de campo na Queen Street não demonstrou melhorias evidentes no atraso dos autocarros, já que o volume desses veículos não era estável. Dessa forma, a eficácia das estratégias de prioridade passiva são distintas. Como o sistema não leva em consideração a aleatoriedade do horário de chegada do veículo, ele torna-se incapaz de se adaptar a essas mudanças [9].

2.3.4.2. Estratégias de prioridade ativa

As estratégias de prioridade ativa diferem-se da passiva ao fazer uso de informações em tempo real sobre a procura dos autocarros que chegam à intersecção. Para que isso aconteça, são necessárias tecnologias de deteção que enviam ao controlador do semáforo a informação necessária para que a prioridade seja executada [9].

Pelo fato da prioridade ser ativada apenas em função da procura, este tipo de estratégia ultrapassa as inconveniências da estratégia anterior. Os tipos de sensor utilizados para detetar o autocarro podem ser os chamados “*loops*” indutivos em vias dedicadas ao transporte público, câmaras de vídeo com tecnologias de reconhecimento visual, *Global Positioning System* (GPS) e sensores que detetam sinais de rádio vindos dos autocarros (*On Board Units-OBUs* para *Road Side Units-RSU*), descritos no subponto 2.3.5.

Como o impacto nas vias não priorizadas pode ser significativo, causando atraso ao tráfego que nela circula, algumas estratégias podem ser adotadas para reduzir esse efeito. A primeira envolve a compensação de verde, que fornece tempo de verde extra para as vias não priorizadas, após a passagem do autocarro priorizado. A segunda estratégia envolve restringir a prioridade a certas condições. Por exemplo, o Departamento Britânico de Transporte apenas concede a priorização através da antecipação do verde quando não houve antecipação no ciclo anterior. Essa segunda abordagem tem como objetivo evitar a interrupção do tráfego não priorizado com muita frequência, evitando assim atraso em excesso da via não priorizada [9].

É sob essa perspectiva que as estratégias de prioridade ativa se dividem em duas outras categorias, nomeadamente, estratégias incondicionais e condicionais.

Na primeira, também conhecida como prioridade absoluta, a prioridade é concedida sempre que o autocarro é detetado, sem nenhuma restrição. Apesar de ser mais simples de implementar, esse método possui algumas desvantagens. Uma delas consiste em conceder prioridade a um veículo que não precisa, pois não tem atraso em relação ao seu cronograma. Como consequência, o veículo poderá antecipar sua passagem nas paragens seguintes, gerando conflitos no cronograma de horários. Essa

alteração pode acarretar em problemas operacionais, como por exemplo redução da regularidade e confiabilidade no horário [10].

Outro risco associado é quando a prioridade é concedida a um veículo que está fora de operação, como por exemplo um veículo fora de serviço. Dessa forma, recomenda-se que o autocarro fora de funcionamento circule pela via não prioritária [10].

A figura abaixo ilustra um exemplo de prioridade incondicional.

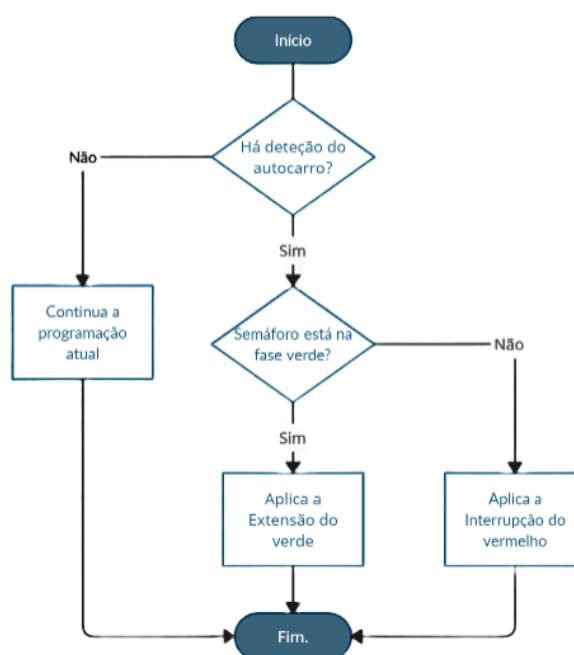


Figura 6 – Prioridade incondicional – Fluxograma. (Adaptado de Peron, L., 2015)

Por outro lado, na prioridade condicional, a prioridade ao veículo de transporte público é concedida apenas quando certas condições predefinidas são satisfeitas. Essas condições podem ser a pontualidade e aderência ao cronograma de horários, o grau de saturação e tamanho da fila nas vias não priorizadas, o número de passageiros nos autocarros e o tempo decorrido desde a última detecção [10].

Para realizar a prioridade condicional, os sistemas de detecção identificam o autocarro que se aproxima da intersecção e emitem um sinal ao controlador semafórico requisitando a prioridade. Essa requisição é direcionada ao Centro de Controlo Operacional (CCO) que analisa o posicionamento do veículo junto com o cronograma estabelecido e se este estiver atrasado, o CCO retorna ao controlador aceitando a requisição de prioridade. Se as condições predefinidas forem satisfeitas, o controlador executa a melhor estratégia de acordo com a situação corrente. Para finalizar a prioridade, o veículo é detetado novamente após sua passagem pela intersecção. A figura abaixo ilustra de forma simplificada o funcionamento deste tipo de estratégia [10].

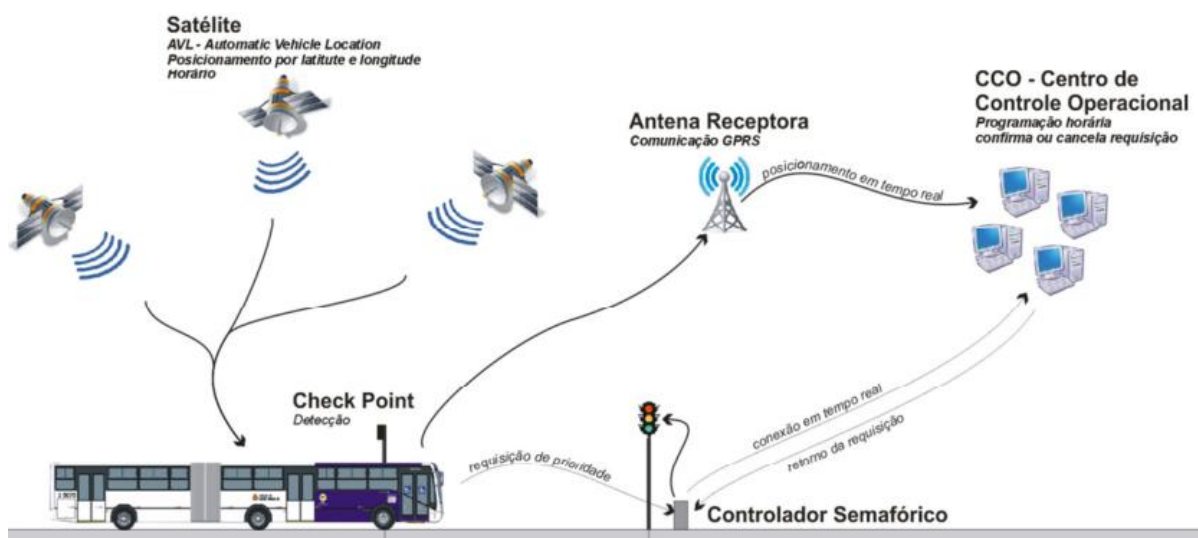


Figura 7 - Prioridade semafórica condicional. Fonte: Peron, L. (2015).

Assim, as estratégias de prioridade ativas são mais adequadas para vias com menor volume de tráfego, em comparação com as estratégias passivas, isso porque volumes maiores implicam em maiores intervenções no tráfego não priorizado, acarretando em maior atraso para esses veículos. Ainda, a prioridade incondicional é mais adequada para intersecções isoladas, caso contrário as estratégias aplicadas (extensão do verde, interrupção do vermelho, inserção de fases, etc.) podem interromper a coordenação dos semáforos. Já as estratégias condicionais podem mitigar esse problema, ao impor restrições à prioridade [9].

As estratégias de prioridade ativa mais comuns são:

- Interrupção do verde
- Extensão do tempo de verde
- Antecipação do verde (ou Interrupção do vermelho)
- Realocação de fase

Na interrupção do verde, quando o autocarro é detetado distante da intersecção o bastante para não chegar nela durante o verde, a fase é interrompida para que ele chegue à intersecção durante a próxima fase, aumentando assim a probabilidade dele passar pela intersecção sem parar [10].

Na extensão do tempo de verde, durante a fase da via priorizada, quando o autocarro é detetado, o tempo de verde é estendido para que ele consiga passar pela intersecção sem precisar parar. Dessa forma, é menor a probabilidade dele chegar na intersecção durante o tempo de vermelho, reduzindo assim o tempo de espera.

Com a antecipação do verde, também chamada por alguns autores de interrupção do vermelho, o tempo de vermelho referente a via priorizada é reduzido para que uma nova fase verde se inicie mais rapidamente, permitindo a passagem do autocarro antecipadamente.

A figura abaixo exemplifica as estratégias de extensão do verde e antecipação do verde. O diagrama tempo-espaco refere-se às trajetórias de veículos que viajam em ambas as direções e passam por duas intersecções sinalizadas consecutivas. No eixo das distâncias, estão identificadas as intersecções sinalizadas e no eixo do tempo estão as sequências das fases de cada semáforo. Em cinza, estão destacadas as trajetórias dos pelotões de automóveis e a linha em preto mostra a trajetória do autocarro [11].

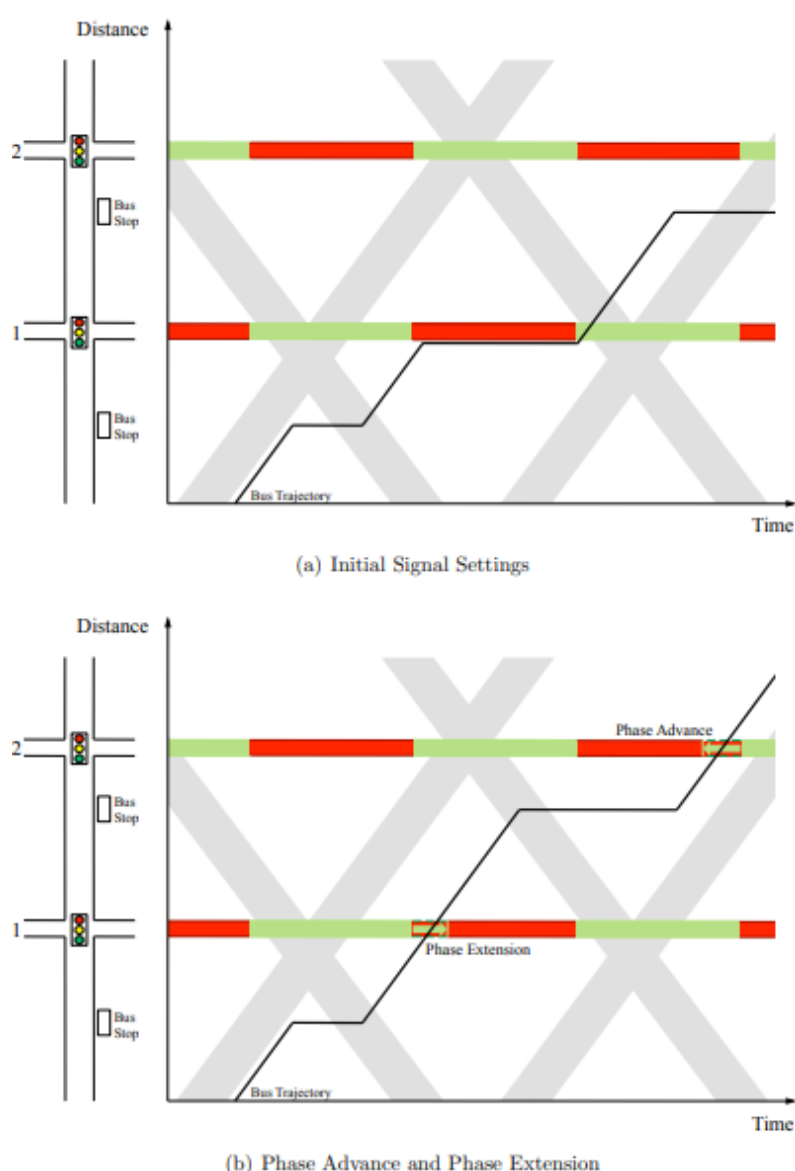


Figura 8 – Prioridade Semafórica – Extensão do verde e Antecipação do verde. Fonte: Christofa, E. (2012).

A Figura 8(a) mostra o funcionamento dos semáforos sem estratégia de prioridade. É possível ver que o autocarro chegaria na primeira intersecção durante o tempo de vermelho, precisando parar. Com as estratégias de prioridade, Figura 8(b), aplicou-se a extensão de fase, ou seja, aumentou-se o tempo de verde para que o autocarro passasse ininterruptamente. Porém, ele pararia na segunda intersecção se não fosse aplicado nenhum tipo de prioridade. Assim, para evitar isso, foi preciso antecipar o verde (ou interromper o vermelho) e avançar a próxima fase mais rapidamente. Com essas duas estratégias distintas, foi possível o autocarro passar pelas duas intersecções sem parar.

Na realocação de fase, quando o autocarro estiver atrasado, a fase verde começa e termina também atrasada, para acomodar a passagem do veículo, para isso são necessárias tecnologias *Automatic Vehicle Location* (AVL) de detecção. Os benefícios dessa estratégia são semelhantes ao da extensão do verde, porém com menor impacto na via não priorizada porque o tempo do verde por ciclo não se altera [12].



Figura 9 - Prioridade Semafórica – Realocação de fase. Fonte: NACTO.

2.4. TECNOLOGIAS DE DETECÇÃO DE VEÍCULOS

Para que seja possível aplicar as estratégias de prioridade ao TP é preciso fazer o reconhecimento do autocarro que se aproxima da intersecção. Diversas tecnologias que detetam o autocarro foram desenvolvidas para alcançar tal objetivo, proporcionando a comunicação entre o veículo e o controlador.

Existem três categorias principais de sistemas de detecção: a detecção seletiva de veículos (*Selective Vehicle Detection* - SVD), que faz uso de ferramentas que precisam ser ativadas para realizarem a detecção (como por exemplo os *loops* indutivos e as câmaras de vídeo), a detecção através de sinais de rádio emitidos pelos autocarros (*On Board Units-OBUs*) e a localização automática de veículos (AVL) que faz a transmissão automática da localização geográfica do veículo, sendo, portanto, uma detecção contínua. [13].

O tipo de detetor mais comumente utilizado é o detetor de *loop* indutivo, posicionado a montante da intersecção. Tal dispositivo é constituído por três partes principais [14]:

1. um fio isolado, colocado em uma ranhura abaixo do pavimento
2. um cabo de entrada que conecta o fio isolado ao controlador
3. uma unidade eletrónica alojada na caixa do controlador

O fio inserido no pavimento cria um campo magnético que ao interagir com o veículo, transmite o sinal para o controlador requisitando o serviço prioritário. Dessa forma, o detetor deve estar posicionado a uma distância adequada para que o autocarro consiga ser servido corretamente. Se colocado muito próximo da linha de paragem, pode acionar a prioridade tarde demais para que seja truncada a fase verde da via não priorizada. Se colocado muito afastado da intersecção, pode não haver tempo suficiente para que o autocarro alcance o cruzamento durante a extensão da fase verde. Assim, a posição ideal do detetor varia conforme as condições de cada intersecção e deve ser analisada caso a caso [11] & [15].

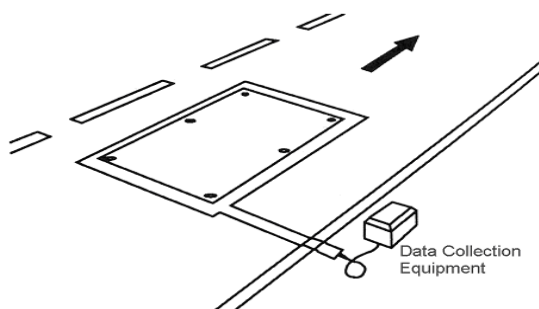


Figura 10 – Detetor de *loop* indutivo. Fonte: Johnson, J. (2016).

Tais sistemas necessitam de grande intervenção estrutural, pois é preciso bloquear o acesso aos veículos na via, fazer o corte no pavimento e instalar o sensor. Por isso, tecnologias alternativas têm sido desenvolvidas para substituírem o *loop* indutivo. São exemplos os Sensores Microeletromecânicos (*Micro Electric Mechanic Systems* - MEMS) que combinam componentes mecânicos e elétricos que proporcionam a detecção do veículo e as câmaras de vídeo, que combinam a captação de vídeo com a tecnologia de processamento de dados para identificar os veículos que passam pelo campo de visão da câmara [11].

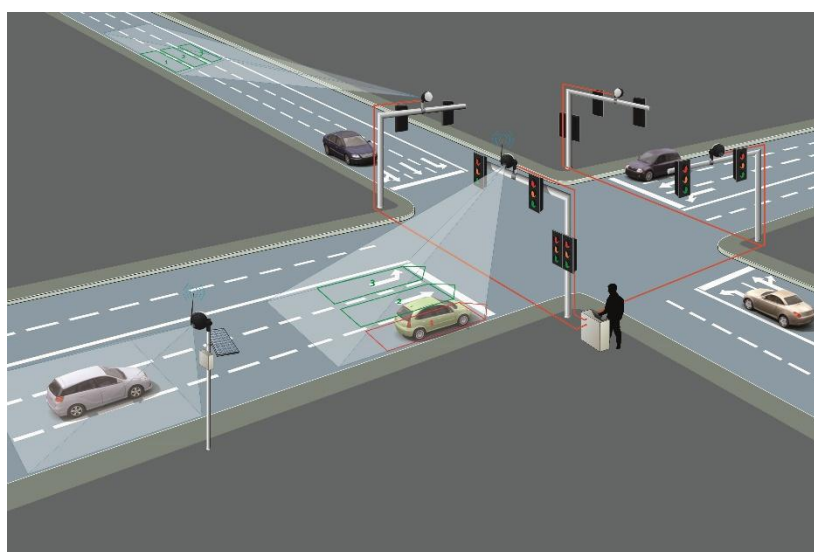


Figura 11 – Detetor de câmara de vídeo. Fonte: ATC Moving Traffic.

Já os sistemas de Localização Automatizada de Veículos (AVL) utilizam Sistemas de Posicionamento Global (GPS) para rastrear continuamente os veículos em trânsito. A informação é enviada ao controlador ou ao Centro de Controlo de Tráfego, a depender da configuração do sistema, que toma a decisão de conceder ou rejeitar a prioridade.

Assim, tal sistema permite estimar o tempo de chegada do autocarro à linha de paragem e seu atraso no cronograma. É possível também estimar o tempo de permanência nas paragens que, juntamente com dados sobre a velocidade do veículo, possibilitam estimar com precisão os tempos de viagem [11].

A combinação das diversas informações, estimativas do tempo de permanência e do tempo de viagem aliadas à posição em tempo real do veículo, possibilitam a previsão do tempo de chegada à intersecção com maior precisão.

2.5. BENEFÍCIOS DA PRIORIDADE SEMAFÓRICA

Segundo Brinckerhoff, P. *et al*, (2013), o nível de benefícios associados ao sistema de prioridade ao transporte público varia de acordo com um conjunto complexo de variáveis interdependentes. Apesar dessa variação, esperam-se que vários benefícios sejam alcançados com a implementação do sistema.

De acordo Baker, R. *et al*, (2002) os benefícios mais comuns são a confiabilidade aprimorada no cronograma, a redução nos tempos de viagem e dos atrasos gerando redução no desgaste do equipamento e na manutenção do pavimento, redução das emissões de gases poluentes, aumento no conforto do passageiro e na atratividade do serviço.

Ainda de acordo com Baker, R. *et al*, (2002), 15% do tempo de viagem do autocarro é gasto parado no semáforo à espera do sinal verde. Estima-se que, uma redução do tempo de espera de, em média, 40% reduziria o tempo de uma viagem de ida e volta de 60 minutos para 55 minutos. Considerando-se uma rota com um intervalo de 5 minutos entre autocarros sucessivos, a diminuição no tempo de espera reduziria um veículo da frota, do primeiro para o segundo cenário. Com isso, a redução dos custos associados ao veículo e ao operador poderiam contribuir para um investimento no sistema, além de contribuir positivamente para a redução das emissões de gases poluentes.

Na América do Norte, a economia do tempo de viagem documentada variou entre 2% e 18%, dependendo de fatores como as condições de tráfego, a extensão da rota, as operações dos autocarros e as estratégias adotadas. Ainda, reduções do tempo de viagem de 8% a 12% têm sido típicas, enquanto a redução no atraso do autocarro variou de 15% a 80% [6].

Com a redução no atraso e no tempo de viagem, aumenta-se a confiabilidade do cronograma, medido pela variabilidade nos tempos de viagem do autocarro e nos horários de chegada nas paragens, relativamente ao cronograma. A redução da variabilidade do tempo de viagem pode chegar a 35% e

essa redução associada a redução no tempo de viagem pode gerar economia de custos operacionais e de capital [6].

Na Europa, Zurique e Amsterdão possuem a maior parte das intersecções com prioridade semafórica, enquanto na Inglaterra e França, as instalações geraram uma redução de 6% a 42% no tempo de viagem do autocarro, com aumento no tempo de viagem do automóvel de apenas 0,3% a 2,5% [7].

Já em relação ao tráfego em geral, a prioridade semafórica pode beneficiar também os veículos que estão no mesmo sentido do autocarro ao aumentar momentaneamente o tempo de verde dos semáforos. Quanto aos peões, estudos mostraram que não existe um padrão de mudança no atraso destes, com aumentos e diminuições mínimas.

A tabela a seguir exibe a aplicação dos sistemas de prioridade em alguns locais dos Estados Unidos e os impactos gerados ao serviço de transporte público:

Tabela 1 - Impactos das Estratégias de Prioridade. (Adaptado de Brinckerhoff, P., *et al.*, - 2013).

Local	Nº de intersecções	Tipo de estratégia adotada	Benefício / Impacto
Portland (Tualatin Valley Hwy.)	10	Extensão do verde, Interrupção do vermelho	Tempo de viagem do autocarro reduzido em 1,4 – 6,4%. Atraso médio no semáforo reduzido em 20%.
Portland (Powell Blvd.)	4	Extensão do verde, Interrupção do vermelho, Salto de fila	Tempo de viagem reduzido em 5 - 8%. Atraso do passageiro reduzido.
Seattle (Rainier Ave.at Genesee)	1	Extensão do verde, Interrupção do vermelho	Redução de 50% em paradas nos semáforos pelos autocarros priorizados. Redução de 35% na variabilidade do tempo de viagem do autocarro. Redução de 13,5% no atraso médio do passageiro.
Chicago (Cermak Rd.)	15	Extensão do verde, Interrupção do vermelho	Tempo de viagem do autocarro reduzido em 7 - 20%. Confiabilidade no cronograma aprimorada. Redução de 1,5 s/veh no atraso médio do veículo. Redução da frota. Melhora na satisfação do passageiro.
Minneapolis	3	Extensão do verde,	Tempo de viagem do autocarro reduzido

		Interrupção do vermelho, Fase atuada do autocarro	em 0 – 38%. Aumento no atraso médio do veículo em 4,4 s/veh.
Los Angeles (Wilshire e Ventura Blvds.)	211	Extensão do verde, Interrupção do vermelho, Fase atuada do autocarro	Tempo de viagem do autocarro reduzido em 35%. Redução no atraso do autocarro nos semáforos.

3

METODOLOGIA

3.1. INTRODUÇÃO

O objetivo desta dissertação é a avaliação de diferentes estratégias de prioridade ao autocarro em intersecções controladas por sinais luminosos, ou seja, como as diferentes estratégias impactam o desempenho dos veículos de transporte público, tendo em atenção o tráfego em geral. A metodologia utilizada neste estudo segue o fluxograma apresentado na Figura 12, seguidamente descrita.

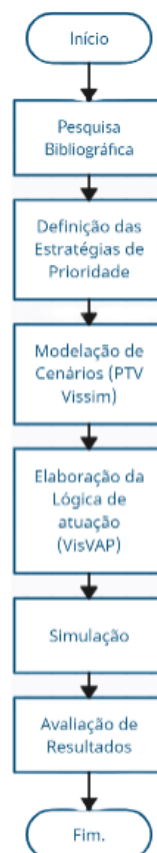


Figura 12 - Metodologia da Dissertação.

O início do trabalho centra-se na revisão da literatura, com a consulta de diferentes fontes de informação para a compreensão do conteúdo e obtenção dos conceitos importantes relacionados ao tema. Com toda a pesquisa executada e com todas as informações necessárias, criou-se uma base teórica sólida para poder prosseguir com o trabalho.

A etapa seguinte seguiu-se com a definição da área de estudo. A definição da área de estudo é um passo importante, pois é nessa área onde irão ser testadas as alterações operacionais decorrentes da aplicação das estratégias de prioridade ao Transporte Público. Assim, é importante definir uma zona que possua dados fiáveis para sua caracterização, além de uma boa influência do sistema de transporte público e onde as alterações gerarão um impacto importante ao autocarro e ao tráfego local.

De seguida, dentre as várias estratégias de prioridade, definiram-se quais seriam implementadas. Foi preciso analisar a rede e principalmente, a intersecção do caso de estudo, para avaliar qual a melhor abordagem.

Como referido anteriormente, as estratégias de prioridade passiva são utilizadas em locais onde as operações dos autocarros são previsíveis e consistentes, já que devido a falta de sistemas de deteção, uma alteração significativa na procura pode causar efeitos negativos no desempenho da intersecção.

Já as estratégias de prioridade ativa, por fazerem uso de sistemas de informação em tempo real sobre a procura dos veículos de transporte público são mais indicadas quando o serviço não é consistente, podendo sofrer maiores variações. O presente trabalho utiliza esta última abordagem, contextualizada no Capítulo 4.

Em seguida, definiu-se qual o modelo que seria utilizado para testar as diferentes estratégias de prioridade, obtendo-se a partir dele, as informações necessárias para calcular os Indicadores de Desempenho e fazer a avaliação dos resultados. A metodologia utilizada neste trabalho foca-se na comparação de dois cenários distintos – o primeiro, chamado cenário base, não possui nenhum tipo de estratégia de prioridade e o segundo, chamado cenário alternativo, corresponde ao cenário em que as estratégias de prioridade estão em funcionamento. A forma de avaliação centra-se na comparação entre os indicadores de desempenho dos dois cenários distintos.

Grande parte dos estudos sobre o tema concentra sua atenção às vias onde as estratégias são aplicadas, sem analisar o impacto gerado às vias não priorizadas. Assim, para garantir uma avaliação mais completa, o trabalho analisa a intersecção como um todo, avaliando o desempenho da via priorizada e da via não priorizada.

3.2. MODELO DE SIMULAÇÃO

Um modelo é uma representação simplificada de elementos e características de um conceito, processo ou sistema real. Na área dos transportes, o modelo representa as várias componentes da infraestrutura de transporte, designadamente a rede dos diferentes modos de transporte e o tipo de controlo e, após a afetação da procura, apresenta os fluxos na rede, reproduzindo as condições operacionais do sistema. Dessa forma, os modelos permitem a experimentação e análise de soluções sem que seja preciso a intervenção em ambiente real com todos os problemas económicos e operacionais associados a isso e, portanto, servem de base para a avaliação de alternativas de intervenção e dão suporte à tomada de decisão. De realçar que nenhum modelo representa perfeitamente a realidade e que, portanto, os erros são inerentes aos mesmos [17].

Existem diversos tipos de modelos, como por exemplo os modelos macroscópicos, mesoscópicos e microscópicos. Nos modelos macroscópicos, a simulação é feita de forma que a corrente de tráfego é tratada como um fluido contínuo e as variáveis de tráfego representam valores médios agregados ao longo do ciclo (filas de espera médias, velocidades médias, entre outros). Os modelos mesoscópicos possuem um nível de detalhe intermédio entre o macro e microscópico, não diferindo o comportamento individual de cada veículo, mas sim agregando-os em grupos de veículos, os chamados pelotões [17].

Já os modelos microscópicos possuem a característica de identificar o movimento individual de cada veículo por meio das suas características, como por exemplo o tipo de veículo, sua velocidade e destino além de descrever detalhadamente o comportamento de condução dos mesmos (*car-following*, *lane-change behaviour*), sendo assim, capazes de representar cada veículo como uma entidade e identificar a interação deste com os demais veículos da rede [17].

Dessa forma, o estudo utilizou um modelo de simulação microscópico de tráfego, pois assim seria possível fazer a representação simplificada da intersecção e uma caracterização detalhada das condições de circulação dos veículos (de transporte público e do tráfego em geral), e com isso, avaliar como as diferentes estratégias afetam a interação dos veículos entre si e como essa interação impacta à intersecção.

O modelo utilizado nesta dissertação foi o PTV Vissim 2022, junto com a ferramenta de programação que o *software* traz consigo, o VisVAP (*Vehicle Actuated Programming*), que permite executar as estratégias propostas.

3.2.1. SIMULADOR MICROSCÓPICO PTV VISSIM

O modelo utilizado permite simular a rede e o comportamento dos veículos, em diferentes cenários possíveis. Com ele, é possível desenhar a infraestrutura viária (os arcos e nós) usando como referência imagens de satélite das vias existentes, deixando assim a rede mais próxima da realidade. É possível ainda definir características tais como o número de vias e o sentido das mesmas, a largura, o declive,

tipificar (por exemplo, via de 1 sentido ou 2, via urbana, autoestrada, entre outras), que tipo de veículos são permitidos circular na via, entre outras características importantes.

O nível de detalhe do modelo é grande, permitindo definir o tipo de veículo que circulará na rede (veículos ligeiros, pesados, motas), e ainda definir a circulação de peões, bem como a proporção entre cada componente. A codificação da procura é feita através do volume de tráfego na entrada da rede aliado às tomadas de decisão das rotas a se seguir.

Nos nós não semaforizados, pode-se estipular as regras de prioridade de duas formas. Na primeira, cria-se a regra de prioridade para as vias, em que o veículo na via priorizada pode circular livremente e o veículo na via não priorizada só tem permissão de passagem quando não há veículos num troço (a ser definido pelo usuário) da via priorizada. Já na segunda alternativa, identifica-se as áreas de conflito entre os movimentos e qual terá preferência de passagem sobre os demais.

Nas intersecções semaforizadas, define-se os controladores e sua tipologia, se é atuado ou funciona a tempos fixos, e os semáforos que funcionarão de acordo com cada controlador. Define-se também a tipologia dos semáforos (tricolor, amarelo intermitente, etc.) e os tempos mínimos da sequência. Para os semáforos a tempos fixos, utiliza-se o programa Vissig (executado dentro do próprio *software*) para definir a programação e o Diagrama de Ciclo, que será o mesmo, independente da procura. Para o desenvolvimento e simulação da atuação dos semáforos, é utilizado o módulo externo VisVAP.

Assim, o VisVAP é uma ferramenta adicional do Vissim que permite a programação dos controladores, implementando ações de microregulação, sendo que a lógica utilizada é facilmente implementada através de um fluxograma. O programa possui comandos e funções próprias e permite que o programador adicione parâmetros e expressões lógicas com bastante versatilidade. Dessa forma, a ferramenta faz a ponte entre os elementos adicionados na rede e a lógica a ser seguida pelo *software* para a atuação dos semáforos.

O programa é capaz de analisar o fluxograma e identificar erros e ainda possui a funcionalidade de executar a simulação do *software* enquanto percorre a lógica passo a passo, para que seja possível verificar se a lógica está bem executada ou precisa ser melhorada.

A rede base utilizada no estudo foi fornecida pela SOLTRÁFEGO, SA. Essa rede foi utilizada como base para a construção do cenário alternativo e, por isso, foi preciso primeiramente fazer a calibração e validação da mesma. Para isso, verificou-se a existência de erros na rede, tais como se a infraestrutura viária corresponde à realidade ou se existem erros relacionados aos parâmetros dos veículos. Em seguida executou-se o modelo para identificar os erros mais facilmente, caso existissem.

Seguiu-se o processo de validação, que envolve averiguar se o modelo construído, associado aos dados obtidos com a execução da simulação se aproximam das condições reais da rede, ou seja, se as informações são fiéis à realidade. Esse processo pode ser feito através das informações e teorias que existem em relação à rede real e neste trabalho foi feita baseada em relatórios enviados pela empresa.

Com a calibração e validação da rede base, prosseguiu-se com a caracterização do transporte público, para a construção do cenário alternativo. Foi necessário primeiramente criar as paragens dos autocarros. No *software*, é possível adicionar a paragem, bem como uma área de embarque e desembarque de passageiros. Definiu-se o volume de passageiros que utilizam aquela paragem por hora e quais linhas operariam na mesma. Em seguida, foram inseridas as linhas de autocarros na rede e o percurso de cada uma foi traçado, definindo-se a frequência de partidas e o número de passageiros correspondente a cada uma.

Para fazer a avaliação, escolheu-se os locais e tipos de informação que seriam analisados e por fim, correu-se a simulação. Assim, escolheu-se o local a analisar (um arco ou um nó, por exemplo), o período de duração da análise (que pode ou não ser o mesmo da simulação), e quais os indicadores de desempenho seriam avaliados (comprimento de fila, nível de serviço, etc.).

3.3. INDICADORES DE DESEMPENHO

Os indicadores de desempenho são parâmetros que possibilitam quantificar e avaliar de uma forma quantitativa a área de estudo, utilizando variáveis ou combinação das mesmas. Com esses parâmetros é possível comparar e avaliar diferentes cenários para assim, escolher a melhor estratégia de intervenção. No presente trabalho, permitirá comparar o cenário base, no qual não existe nenhum tipo de prioridade ao transporte público, com o cenário alternativo, onde as estratégias de prioridade são aplicadas.

Dentre os indicadores possíveis de serem usados, destacam-se os descritos abaixo:

- Comprimento da fila de espera: corresponde ao número total de veículos parados em fila [19].
- Tempo total de viagem: diz respeito ao tempo total gasto pelos veículos na rede, durante o período em análise, obtido pelo somatório do produto do volume de tráfego pelo tempo de viagem, em cada via [5].
- Tempo de atraso (vehicle delay): de acordo com o Manual de usuário do PTV Vissim [20], o atraso do veículo é obtido subtraindo-se o tempo de viagem teórico do tempo de viagem real. Ainda, o tempo de viagem teórico é definido como o tempo gasto pelo veículo caso não houvesse nenhum obstáculo que o fizesse parar, como por exemplo outros veículos ou sinais luminosos.
- Tempo total de atraso: corresponde ao somatório do produto do volume de tráfego pelo atraso em todas as vias.
- Atraso parado (Stopped time delay): corresponde ao tempo de espera do veículo quando este se encontra parado.
- Nível de serviço: o HCM define nível de serviço como um parâmetro qualitativo, com escala de A a E, que descreve as condições operacionais da via e baseia-se no atraso do veículo [20].

Para além dos indicadores mais comumente utilizados, como os citados acima, há indicadores que fazem alusão aos passageiros e aos autocarros sendo, portanto, importantes na análise das estratégias de apoio ao transporte público. Os indicadores relacionados aos passageiros, fazem referência à ocupação média por veículo e por isso, é preciso haver uma diferenciação entre os tipos de veículos no modelo utilizado. Exemplos deste tipo de indicador são o Atraso Médio do Passageiro e o Tempo Total por Passageiro sendo que este último corresponde ao produto do tempo total de viagem pela ocupação média do veículo. Já os indicadores relacionados aos autocarros podem ser o tempo de viagem por autocarro, o atraso e número de paragens nas intersecções.

3.3.1. PTV VISSIM - ANÁLISE

O *software* PTV Vissim permite a obtenção de dados de maneiras variadas. É possível traçar *Nodes*, que são polígonos fechados desenhados pelo usuário, envolvendo a região a ser estudada e de onde se pretende obter informações.

Também é possível criar outros elementos que farão o processo de extração de dados, tais como o *Queue Counter*, o *Vehicle Travel Time* e os *Data Collection Points*. Os *Queue Counters* medem a fila no link em que se encontram e a partir da sua localização, já os *Vehicle Travel Time* calculam o tempo de viagem dos veículos entre dois pontos estipulados pelo usuário e os *Data Collection Points* são pontos traçados na via que obtêm informações dos veículos que por eles passam.

Dentre os possíveis indicadores de desempenho que podem ser obtidos com os elementos descritos acima, destacam-se os indicadores a seguir:

- Comprimento de fila média
- Comprimento de fila máxima
- Nível de serviço
- Número de veículos
- Número de pessoas
- Número de paragens por veículos (sem levar em conta os estacionamento e as paragens dos veículos de transporte público nas paragens)
- Atraso parado
- Atraso médio dos veículos
- Atraso médio do passageiro
- Consumo de combustíveis
- Emissões de CO
- Emissões de NOx
- Emissões de compostos orgânicos voláteis

Assim, a avaliação dos resultados será feita pela comparação dos indicadores de desempenho escolhidos entre o cenário base e o cenário alternativo, como mostra a figura a seguir:

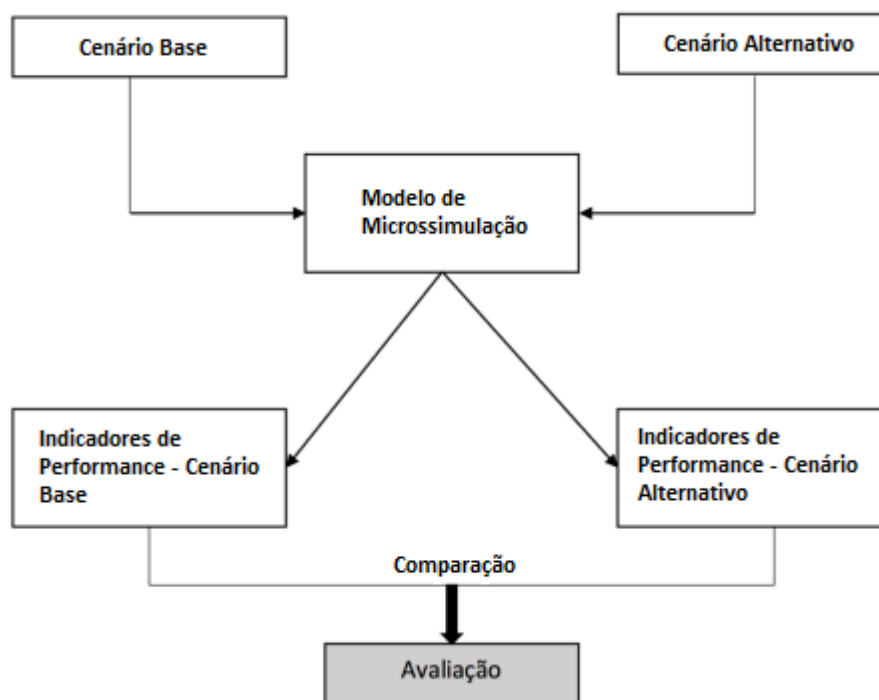


Figura 13 – Metodologia de avaliação dos resultados. (Adaptado de Neves, J., 2006).

Dessa forma, com essa metodologia e a utilização do modelo descrito, é possível testar diferentes cenários com grande flexibilidade, já que é possível alterar as condições e características da rede e da programação de forma prática. Pequenas mudanças tais como a alteração dos tempos de verde ou da posição do detetor no terreno, podem alterar significativamente os resultados. Além disso, outra grande vantagem desse tipo de abordagem é a possibilidade de processar automaticamente um grande volume de informação de forma rápida e obter uma grande gama de resultados também de forma prática.

Realce-se que o processo de avaliação dos resultados deverá ser feito não só para a via onde será implantada a estratégia de prioridade ao transporte público, mas também para a(s) via(s) secundária(s), tendo em consideração, portanto, as condições operacionais de todo o tráfego na intersecção.

4

CASO DE ESTUDO

4.1. ENQUADRAMENTO

O presente capítulo apresenta o caso de estudo e contém uma descrição detalhada sobre a área de estudo e sua caracterização, a construção e calibração dos diferentes cenários, a escolha das estratégias de prioridade ao transporte público selecionadas para análise, definição da atuação dos semáforos através da programação executada com recurso ao módulo VisVAP e seleção dos elementos de rede que permitirão extrair dados do modelo de simulação com o objetivo de avaliação. Assim, estão reunidas todas as informações necessárias para proceder com a modelação e a avaliação das estratégias de prioridade.

O cenário base foi fornecido pela empresa SOLTRÁFEGO – Soluções de Trânsito, Estacionamento e Comunicações, SA, com sede em Matosinhos, Portugal.

A SOLTRÁFEGO é uma empresa especializada em soluções integradas de trânsito, sendo referência nacional no mercado de engenharia de mobilidade urbana e gestão de tráfego / ITS (*Intelligent Transports Systems*). É responsável pelo projeto e instalação de mais de 2500 sistemas semafóricos e de controlo de velocidade, além de projetos com o Metro do Porto e as “Estradas de Portugal”.

A área de estudo localiza-se na Praça do Marquês na cidade do Porto, sendo composta pelas ruas da Constituição, de Damião de Góis, de João Pedro Ribeiro, de Latino Coelho, a própria Praça do Marquês de Pombal, e, ainda, as ruas que interseitam estas desde a Rua Prof. Bento de Jesus Caraça à Rua de Antero de Quental (a norte da Praça do Marquês) e desde a Rua de Antero de Quental à Rua de Coutinho de Azevedo (a sul da Praça do Marquês). Na Figura 14 encontra-se representada a rede em estudo.

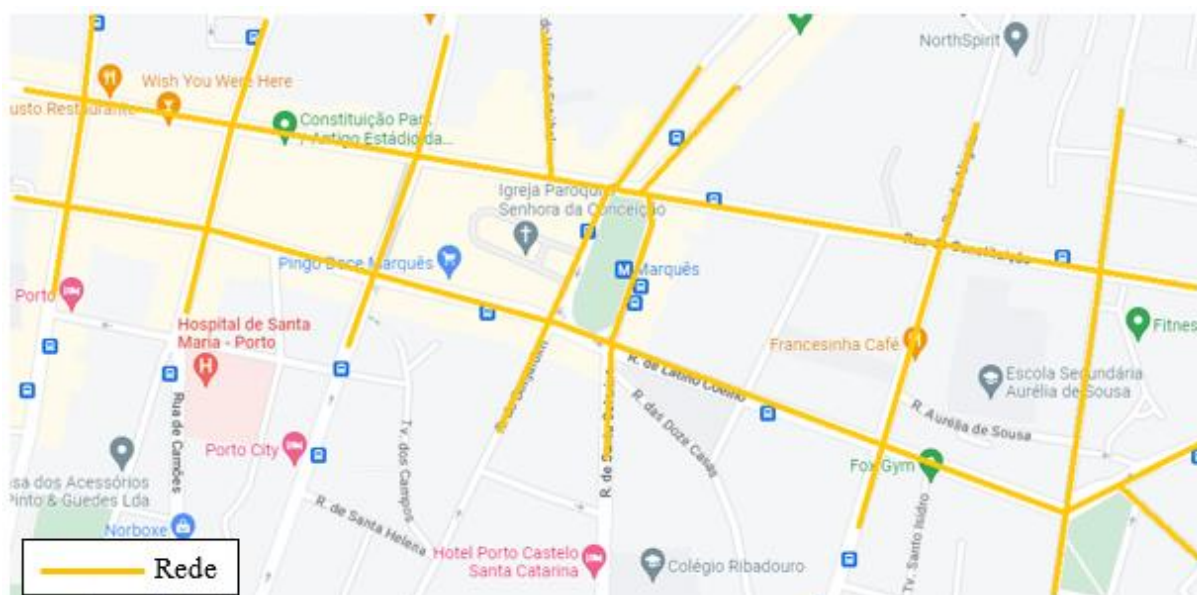


Figura 14 – Área de Estudo. Fonte: *Google Maps*, 2023.

Observe-se que esta área constitui uma zona com alguma importância na cidade do Porto, tanto pela grande atividade comercial e habitacional, quanto pela ligação entre as diversas regiões da cidade, possuindo assim, uma elevada procura de tráfego automóvel.

A Rua da Constituição é uma rua de grande extensão (aproximadamente 2,75 km), que permite a conexão entre Este e Oeste, ligando as freguesias do Bonfim ao Ramalde, com diversas vias radiais importantes ao longo do seu comprimento, dentre elas a Rua Antero de Quental, Rua de Faria Guimarães e a Rua de Santa Catarina. A Rua Antero de Quental faz a conexão de Norte a Sul, enquanto a Rua de Faria Guimarães faz a ligação entre a cidade e a Via de Cintura Interna (VCI). A Rua de Santa Catarina conecta a baixa à área Norte da cidade e é muito conhecida por ser uma rua turística, com grande atividade comercial e de lazer. Por fim, a zona ainda contém a Praça do Marquês de Pombal, também caracterizada pela relevância comercial, turística e de lazer para os moradores e visitantes da cidade.

Essa região foi escolhida por possuir dados fiáveis que permitem caracterizar a rede base, no que se refere quer à oferta quer à procura, além de ser uma região com grande procura, tanto a nível do serviço de TP, quanto do tráfego em geral, o que muitas vezes acarreta em congestionamento das vias, interferindo nas operações dos transportes públicos, tornando-se assim uma região interessante para analisar o impacto das estratégias de prioridade. Assim, as análises feitas neste trabalho servirão de base para futuros trabalhos e, também, servirão de apoio à base de dados da empresa.

Na Figura 15, apresenta-se a rede base construída no *software* PTV Vissim, fornecida pela empresa:

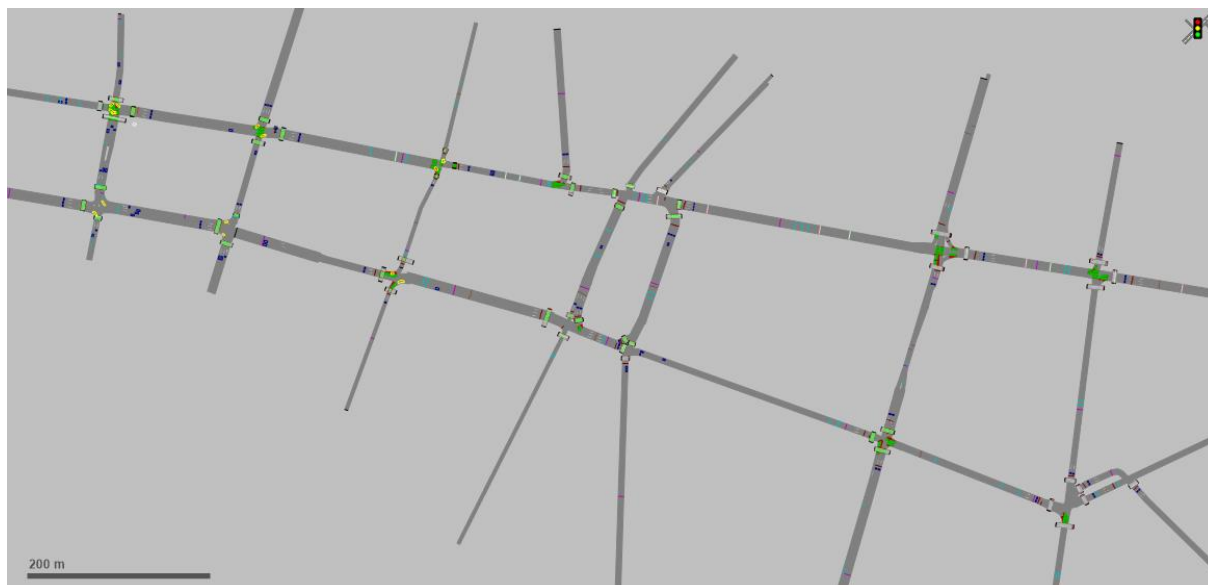


Figura 15 - Rede base construída no programa PTV Vissim. Fonte: SOLTRÁFEGO SA, 2022.

O cenário base constitui a situação existente e foi construído a partir da codificação da rede tendo a procura sido obtida a partir de uma campanha de contagens de tráfego realizadas pela SOLTRÁFEGO no dia 14 de junho de 2022 (terça-feira), nos períodos de ponta da manhã (08h00 – 10h00), fora da hora de ponta (12h30 – 15h30) e no período da tarde (17h30 – 19h30). Este trabalho desenvolveu-se a partir da análise da hora de ponta da manhã e da hora de ponta da tarde. Admite-se que o volume de tráfego no dia em que foram realizadas as contagens é muito semelhante a qualquer dia útil e, portanto, os valores obtidos são uma ótima aproximação da realidade e do tráfego expectável na região.

Tratando-se de um estudo referente a avaliação de estratégias de prioridade ao transporte público em intersecções controladas por sinais luminosos, foi preciso definir qual intersecção da zona de estudo seria analisada.

Assim, definiu-se o cruzamento das ruas Rua de João Pedro Ribeiro, Praça do Marquês de Pombal e Rua do Bonjardim (Figura 16), pois trata-se de uma intersecção que circunda a Praça do Marquês (um polo importante da região como definido anteriormente), com um número elevado de linhas de autocarros que passam por ela (10 linhas) e devido a existência de uma via BUS à montante, o que enriquece a avaliação das condições de circulação dos transportes públicos. Dessa forma, a intersecção escolhida é uma intersecção importante a ser analisada e cujo impacto dos resultados será relevante.

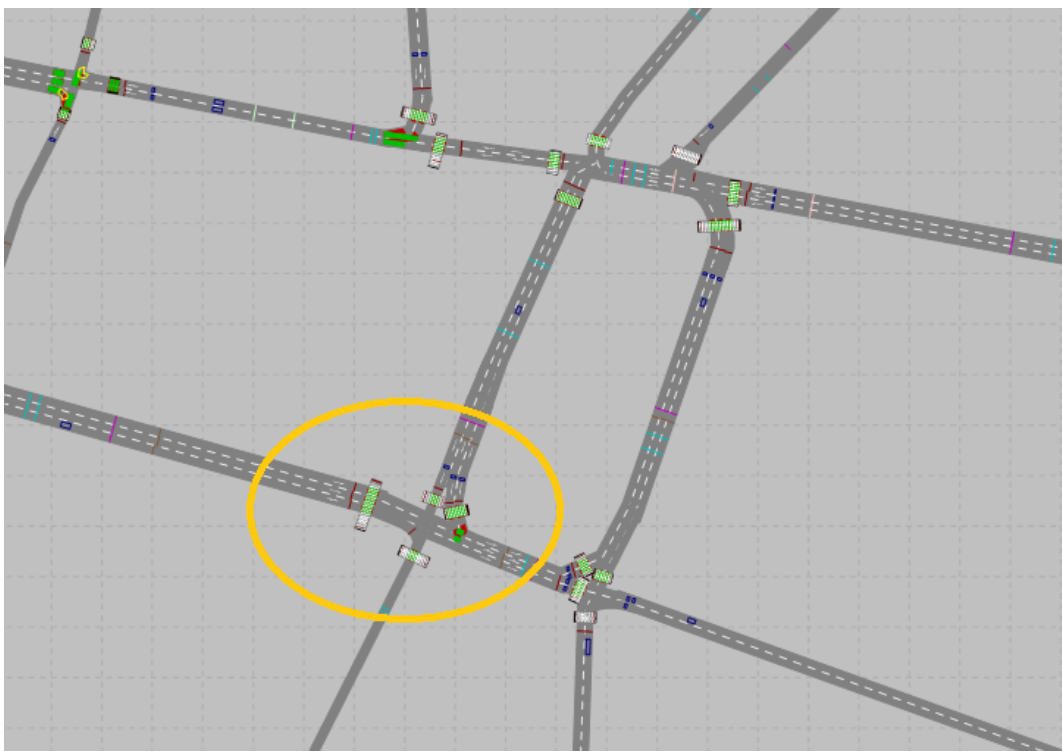


Figura 16 - Intersecção do Caso de estudo.

4.2. CARACTERIZAÇÃO DA ZONA DE ESTUDO

Quanto às características físicas da intersecção analisada, a Rua de João Pedro Ribeiro possui três vias de sentido único (Oeste – Este), tendo a via da direita uma Via BUS ao longo de quase toda sua extensão (aproximadamente 263 m). A Via BUS se inicia na intersecção com a Rua de São Brás e termina a aproximadamente 50 m antes da linha de paragem da intersecção em estudo. As vias que compõem a intersecção foram consideradas com largura de 3,5 m no modelo.

Possui estacionamento longitudinal e uma paragem de autocarros (MPL11) a aproximadamente 54 m dessa linha de paragem. É uma rua importante porque além de permitir o movimento no sentido oposto à Rua da Constituição, é interetada por ruas importantes como a Rua de Faria Guimarães.

A Praça do Marquês de Pombal possui variação do número de vias – a entrada da Praça (sentido Norte – Sul) possui uma via com estacionamento longitudinal à esquerda, a aproximadamente 30m passa a ter duas vias, contendo duas paragens de autocarro na via da direita (MPL4 e MPL9) e termina em três vias, sendo duas de viragem à esquerda e uma de movimento em frente, em direção à Rua do Bonjardim. Esta última possui uma única via, com sentido de Norte a Sul e estacionamento à esquerda.

Baseada nas contagens de tráfego realizadas, a composição de tráfego considerada foi de cerca de 85% de veículos ligeiros e de 15% de veículos pesados. Como a região analisada possui muitas linhas de

autocarros, a parcela de veículos pesados que não são autocarros é muito pequena e por isso, foi admitido que a totalidade dos veículos pesados é composta por autocarros.

Count	VehType	DesSpeedDistr	RelFlow
1	100: Car	1047: Ligeiros	0,850
2	300: Bus	1048: Pesados	0,150

Figura 17 - Composição dos veículos no PTV Vissim.

A velocidade admitida para os veículos ligeiros varia de 20km/h a 30km/h, enquanto a velocidade dos veículos pesados varia de 15km/h a 20km/h, como indicado na Figura 18. Considerou-se este último intervalo de velocidades devido ao grande número de paragens de autocarro na rede e de intersecções semaforizadas, o que faz com que esses veículos desacelerem com mais frequência.

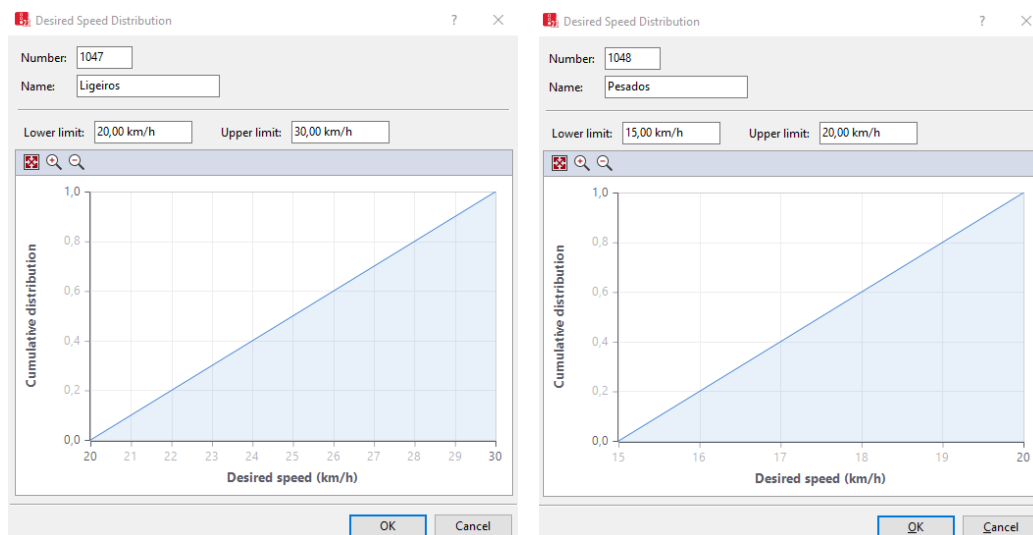


Figura 18 - Distribuição de velocidade dos veículos adotada no modelo no PTV Vissim.

A caracterização da procura foi baseada nas contagens de tráfego efetuadas pela SOLTRÁFEGO e estão indicadas no Anexo II. Para a rede base, considerou-se um período de *warm up* de 10 minutos (correspondente ao “carregamento da rede”) e em seguida a hora de ponta. Esse parâmetro serve para que quando as contagens dos indicadores de desempenho sejam iniciadas, já haja um volume de tráfego na rede similar ao estipulado pelo utilizador através dos *Vehicle Inputs*, se aproximando mais das condições reais de tráfego.

4.2.1. SINALIZAÇÃO LUMINOSA A TEMPOS FIXOS

Para a intersecção analisada, foram elaborados vários planos de tráfego pela SOLTRÁFEGO de forma a atender aos diferentes tipos de procura. Esses planos tiveram seu desempenho avaliado de acordo com o HBS2001 (Manual da Capacidade de Tráfego Alemão).

A instalação semafórica compreende a intersecção analisada e ainda a intersecção da Praça do Marquês de Pombal, Rua de Santa Catarina e Rua de Latino Coelho sendo, portanto, dividida em duas secções. Os movimentos da instalação estão representados no Diagrama de Implantação abaixo (Figura 19), sendo que a secção referente a este trabalho compreende os movimentos de 1 a 7.

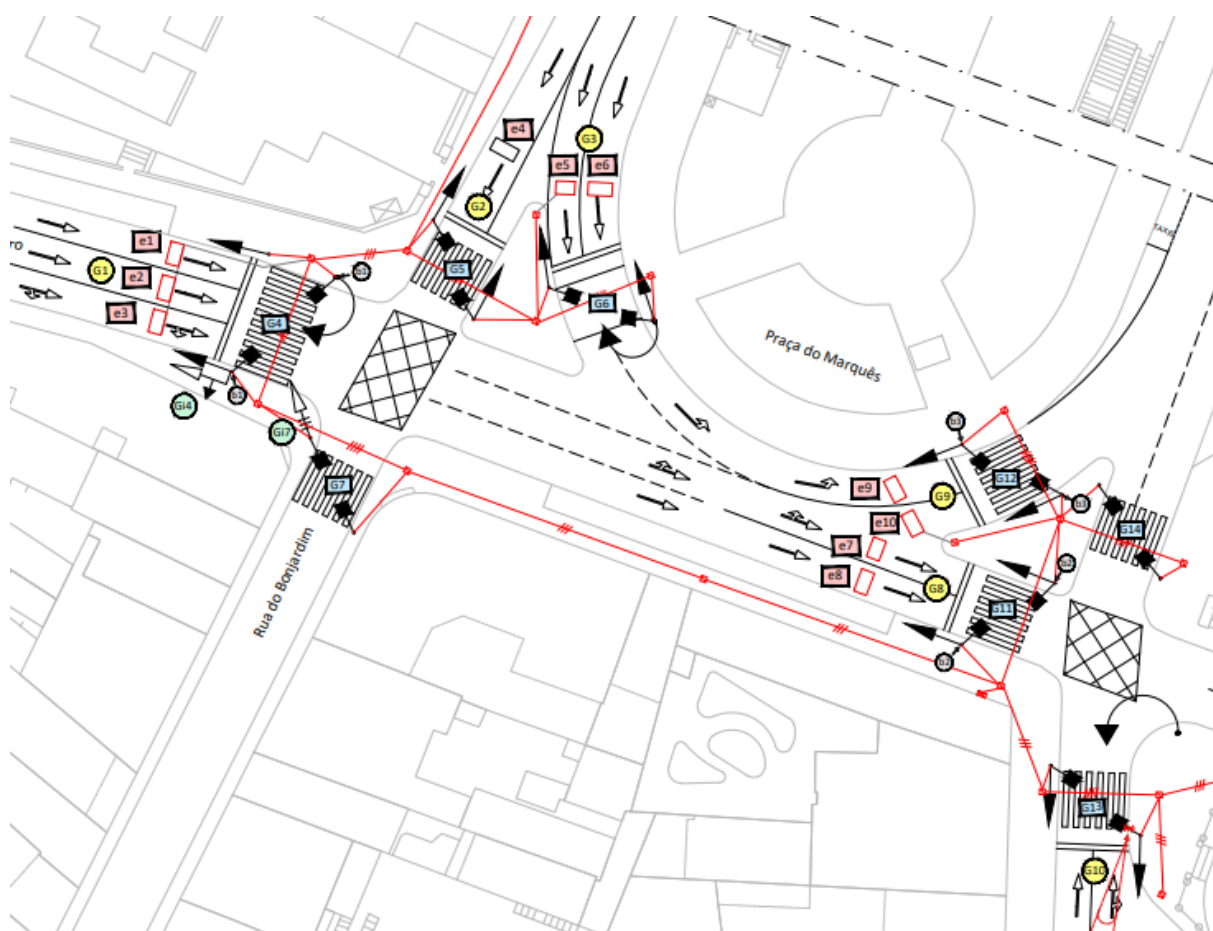


Figura 19 - Diagrama de Implantação. Fonte: SOLTRÁFEGO (2022).

O plano desenvolvido para a instalação no período de ponta da manhã e da tarde foi o Plano P1_c100, dividido em duas fases, representado na Figura 20 e Figura 21:

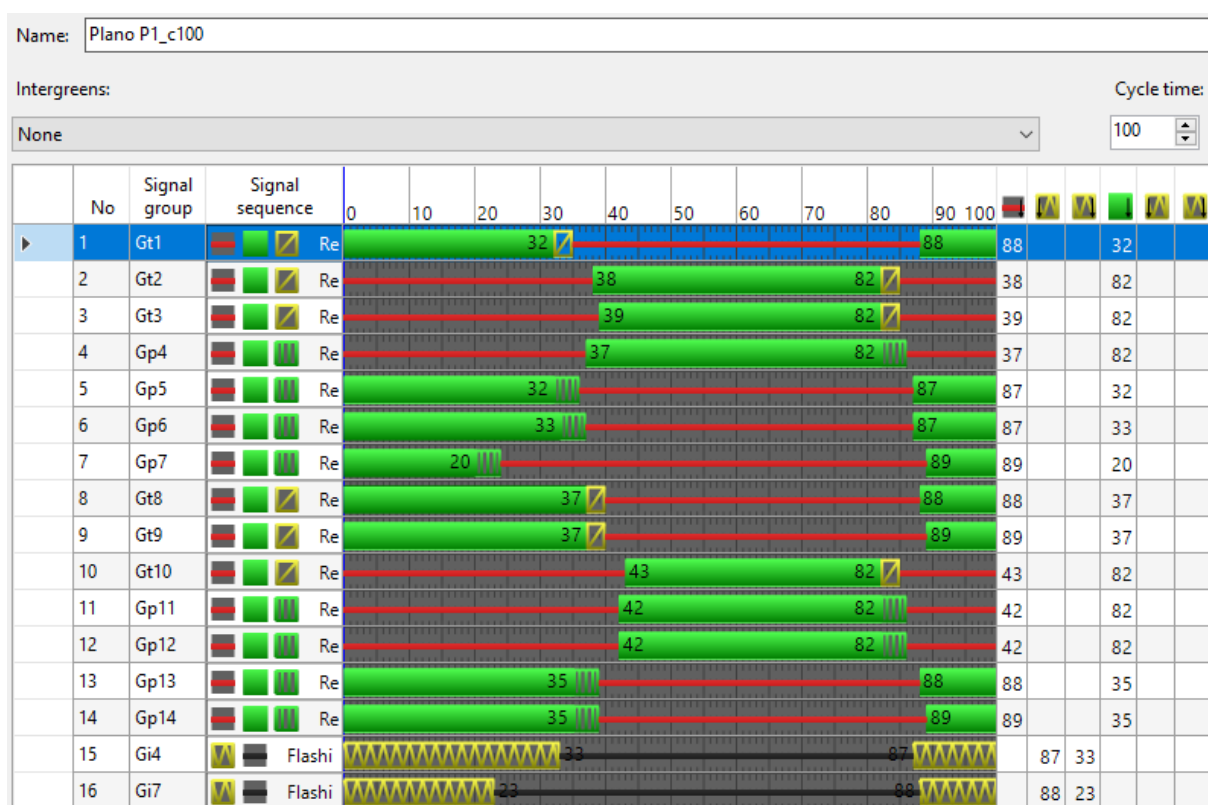


Figura 20 - Diagrama de Ciclo (HPM / HPT). SOLTRÁFEGO (2022).

Assim, em relação à intersecção do caso de estudo, na primeira fase ocorre a abertura dos grupos referentes à via principal (Rua de João Pedro Ribeiro), sendo estes os movimentos 1, 5, 6 e 7 do Diagrama de Cores. De ressaltar que o movimento 1 corresponde ao movimento dos veículos e os movimentos 5, 6 e 7 correspondem ao movimento dos peões.

Na segunda fase, ocorre a abertura da via secundária (Praça do Marquês de Pombal), com o movimento 2, de veículos, e os movimentos 3 e 4, de peões.

Quanto a segunda secção, de ressaltar que não será analisada neste estudo, na fase 1 ocorre a abertura dos grupos 8, 9, 13 e 14, sendo os movimentos 8 e 9 dos veículos e os demais, dos peões. Na fase 2 abrem os movimentos 10, de veículos, 11 e 12, de peões.

Apesar dessa segunda intersecção não estar incluída na análise, é importante ter sua programação para permitir o escoamento do tráfego e evitar congestionamento na intersecção do caso de estudo.

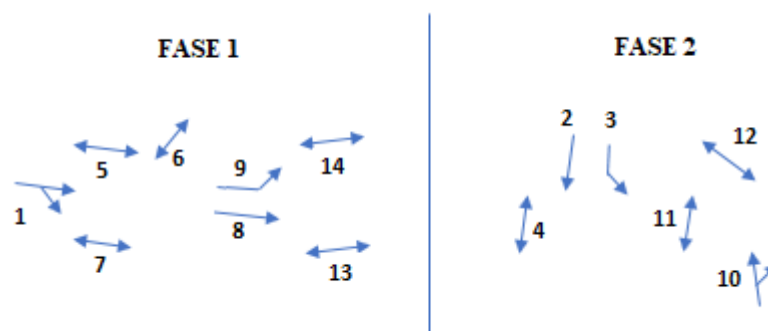


Figura 21 – Diagrama de Fases.

4.3. CARACTERIZAÇÃO DO CENÁRIO ALTERNATIVO

Para prosseguir com o trabalho, foi preciso criar os cenários alternativos, em que as estratégias de prioridade seriam executadas. A caracterização da oferta de transporte público foi realizada de acordo com informações sobre a cobertura espacial e temporal do sistema.

Como na região o serviço é executado maioritariamente pela operadora STCP (Sociedade de Transportes Coletivos do Porto, S.A.), uma empresa de grande expressão e importância a nível nacional, considerou-se para este trabalho que a frota que operaria na zona de estudo seria exclusivamente a frota pertencente a essa empresa e, portanto, os dados e as informações necessárias foram obtidos através do *website* da mesma e do *Google Maps*. De ressaltar que a frequência de passagem dos autocarros foi inserida de acordo com as horas de ponta dos cenários base.

4.3.1. TRANSPORTE PÚBLICO - LINHAS

A caracterização das linhas foi feita através do objeto *Public Transport Lines* e foram identificadas segundo o nome real das mesmas – foram nomeadas com o número da linha e o sentido de circulação. Criou-se o percurso de cada linha na zona de estudo, sendo o início e fim das linhas coincidentes com o início e fim dos *links*, respetivamente.

Ao se criar uma linha, algumas informações são necessárias. É preciso definir o tipo de veículo correspondente à linha e no caso deste trabalho, como dito anteriormente, definiu-se apenas autocarros por serem o objeto de estudo. Em seguida, definiu-se a velocidade inicial dos veículos (velocidade com que entram na rede). Considerando que a região possui muitas paragens e grande volume de tráfego, definiu-se a velocidade inicial de 15km/h, valor correspondente à velocidade mínima dessa classe de veículos (Figura 22).

Figura 22 - Dados para caracterização das linhas de autocarros no PTV Vissim.

O atributo *Time Offset* corresponde ao tempo que o veículo precisa entrar na rede antes da hora prevista de partida, para assim poder partir pontualmente no horário programado [20]. Como o intuito deste trabalho é avaliar as estratégias de prioridade e como isso afeta a intersecção e não se pretende avaliar a pontualidade e precisão do serviço, esse atributo foi considerado como 0.

O seguinte atributo, *Entry time distribution*, também está relacionado à pontualidade dos veículos e diz respeito à variação do tempo em que o veículo entra na rede. Mesmo o foco não sendo a precisão do serviço, achou-se interessante considerar uma variação de mais ou menos 5 segundos para enriquecer o modelo.

O atributo *Slack Time Fraction* é um fator de tempo de espera, usado para permitir que o veículo na paragem parta antes da hora programada ou espere por ela. Caso o valor seja igual a 1, o veículo esperará e só partirá na hora programada. Se o valor for menor que 1, o veículo poderá partir antes da hora. Portanto, para tornar o modelo mais dinâmico e novamente, como o foco não é a análise da pontualidade do serviço, considerou-se esse atributo como menor que 1.

No segundo campo, *Departure times*, foi inserida a frequência de passagem dos autocarros em cada linha de acordo com os horários definidos no *site* da STCP. O primeiro horário identificado na coluna *Departure* corresponde, em segundos, ao horário de partida daquela linha na primeira paragem (dentro da zona de estudo). Considerou-se um tempo de *warm up* de 10 minutos (600 segundos) para que a recolha de dados pudesse ser feita quando a rede já estivesse com um volume de veículos considerável (como já referido anteriormente) e, portanto, esse valor de *warm up* foi adicionado ao tempo inicial de partida dos autocarros.

O intervalo para o qual se identificou a frequência corresponde ao período de ponta da manhã, das 08h às 09h e ao período de ponta da tarde, das 18h às 19h. No Anexo I se encontra a tabela com todas as linhas que atuam na zona de estudo e a frequência de cada uma, na hora de ponta da manhã e da tarde.

Dessa forma, a inserção da frequência das linhas procedeu-se como no exemplo a seguir: a linha 402 (Boa Vista – São Roque), segundo o *site* da STCP (Figura 23), possui partida às 08h04 na paragem FG2, logo com o valor de *warm up* equivalente a 600 segundos, foi inserido no primeiro valor de *Departure* o correspondente a 840 segundos.

Horário na Paragem FARIA GUIMARÃES		FG2																		
NORMAL	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	h
	16	03	04	08	11	05	17	11	02	02	02	11	11	09	13	09	09	09	09	
	41	18	14	23	29	23	35	29	17	17	18	23	23	24	38	39	39	39	39	
	33	24	36	47	41	53	47	32	32	33	35	35	39	48	37	54	52			

Figura 23 - Cronograma da linha 402 (Boavista – S. Roque) na paragem FG2. Fonte: Site STCP, 2023.

Figura 24 - Frequência de partida da linha 402 (Boa Vista – S. Roque) no PTV Vissim.

Por fim, a ocupação dos veículos foi considerada de 100 passageiros. O campo *PT telegrams*, não foi considerado por não ser o objeto de estudo deste trabalho.

4.3.2. TRANSPORTE PÚBLICO - PARAGENS

O passo seguinte foi a inserção das Paragens ao longo da zona de estudo, utilizando o objeto *Public Transport Stops* do modelo. A Figura 25 mostra a localização das paragens utilizadas para a

caracterização da zona de estudo. De ressaltar que algumas paragens não foram consideradas por estarem no fim do arco e, portanto, não afetarem a intersecção em estudo.

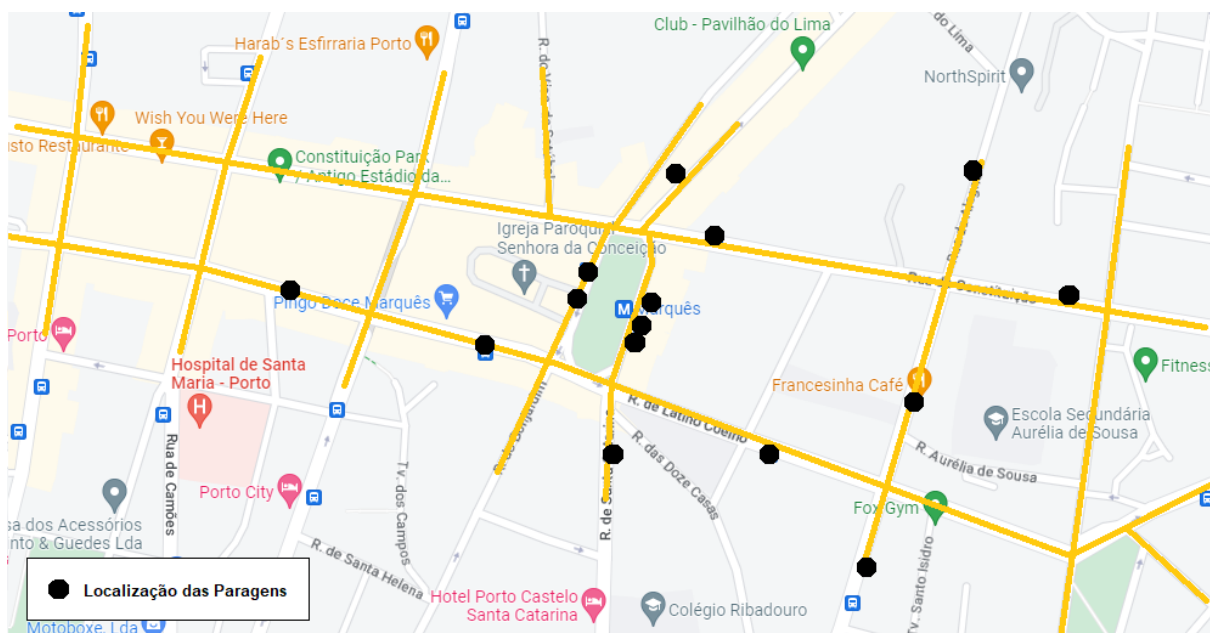


Figura 25 – Localização das Paragens na área de estudo. Fonte: *Google Maps*, 2023.

Os nomes das paragens foram dados de acordo com o nome real de cada uma. O comprimento padrão dos autocarros utilizados na simulação é de 12m, por isso, foi definido um comprimento de 10m para as paragens, pois esse valor já seria suficiente para que o autocarro pudesse permitir a entrada e saída de passageiros.

PT Stop

No.: 2 Name: MPL3

Base data Boarding Passengers

Link - lane: 43 - 1

Length: 10,000 m

At: 33,835 m

☒ Show label

OK Cancel

Figura 26 - Dados para caracterização das paragens no PTV Vissim – *Base data*.

No campo *Boarding Passengers* foi preciso definir valores para o volume de passageiros, o intervalo de tempo de simulação para o qual esse volume é válido e quais as linhas são atendidas por aquela paragem. O volume considerado foi de 100 passageiros/hora, desde o início da simulação (*TimeFrom* igual a 0), até 4200 segundos de simulação, o que equivale a um embarque de aproximadamente 5 passageiros por horário e por linha.

PT Stop

No.: 1 Name: MPL11

Base data Boarding Passengers

Count	Volume	TimeFrom	TimeTo	AllPTLines	PTLines
1	100	0	4200	☐	1,2,3,4,15

OK Cancel

Figura 27 - Dados para caracterização das paragens no PTV Vissim – Boarding Passengers.

As linhas servidas por cada paragem variam e estão representadas na Tabela 2. Há de ressaltar que a tabela mostra todas as linhas que operam em cada paragem (inclusive a 5M, que opera na madrugada), porém neste trabalho só foram consideradas as linhas referentes ao período de ponta da manhã e da tarde.

Tabela 2 – Paragens e Linhas inseridas na rede.

Paragem	Tipologia	Linha
MPL1	Postalete	603
MPL2	Abrigo	701, 702, 703, 5M
MPL3	Abrigo	203
MPL4	Abrigo	603, 701, 702, 5M
MPL7	Postalete	206, 303, 402, 805, 806
MPL9	Abrigo	805, 806
MPL11	Postalete	203, 206, 302, 402, 703
AUS	Postalete	206, 303, 806
FG2	Postalete	203, 206, 302, 402, 703
RALG	Postalete	206, 302, 402, 805, 806
PSOC2	Postalete	603, 701, 702, 703, 5M
SI2	Postalete	206, 303
DCAS1	Postalete	701, 702, 5M
TXP1	Postalete	402, 805
LIMA2	Postalete	806

4.4. DEFINIÇÃO DAS ESTRATÉGIAS DE PRIORIDADE

Após a análise crítica da intersecção e das condições de circulação da mesma, entendeu-se que as estratégias de prioridade ativa seriam mais adequadas do que as estratégias de prioridade passiva. Isso porque o volume de tráfego na zona de estudo é elevado e, consequentemente, pode haver tanto congestionamento na própria intersecção, quanto em intersecções à montante, causando um efeito de propagação das filas de espera (*blocking back*).

Com a circulação congestionada, pode haver atrasos e inconsistências no horário previsto para os autocarros na intersecção em estudo. Como as alterações de circulação dos autocarros não são consistentes, dependem de fatores diversos e as estratégias de prioridade passiva não fazem uso de sistemas de deteção, entendeu-se que essa abordagem poderia acarretar em prejuízos à intersecção, ao invés de ser uma mais-valia.

Em acréscimo, apesar das estratégias de prioridade ativa não serem indicadas para intersecções com grande volume de veículos de TP, porque a priorização excessiva desses veículos pode acarretar em atraso na via não priorizada, essa consideração pôde ser descartada porque no caso da intersecção analisada, o volume de tráfego que circula na via não priorizada é muito menor do que o tráfego que circula na via priorizada.

Dentre as opções de estratégias ativa, considerou-se relevante avaliar as seguintes estratégias:

1. Antecipação do verde na via principal, quando detetado um veículo de TP na via principal e a respetiva fase esteja em vermelho;
2. Extensão do tempo de verde, na via principal, quando detetado um veículo de TP na via principal e a respetiva fase esteja no final de verde.

4.4.1. ANTECIPAÇÃO DO VERDE

A intersecção analisada possui 2 vias que confluem, nomeadamente a via principal (Rua de João Pedro Ribeiro) e a via secundária (Praça do Marquês de Pombal).

A Praça do Marquês possui uma procura de veículos consideravelmente menor do que a procura da Rua de João Pedro Ribeiro. De acordo com as contagens realizadas no dia 14 de junho de 2022, o volume de tráfego que circula na via secundária corresponde a 23% do volume na intersecção.

Dessa forma, considerou-se que a estratégia de interrupção do vermelho na via principal, quando os veículos de autocarro fossem detetados nessa mesma via, promovendo assim a fase verde antes da hora programada, não traria tanto impacto negativo à via secundária (como por exemplo congestionamento, aumento do tempo de viagem e atraso dos veículos) e beneficiaria muito a via principal, permitindo a passagem dos autocarros mais vezes do que em condições normais de circulação.

Tendo escolhido a estratégia de prioridade, passou-se à execução da lógica de programação no VisVAP. Com essa programação, os semáforos passam a ser atuados, com a lógica definida na figura seguinte:

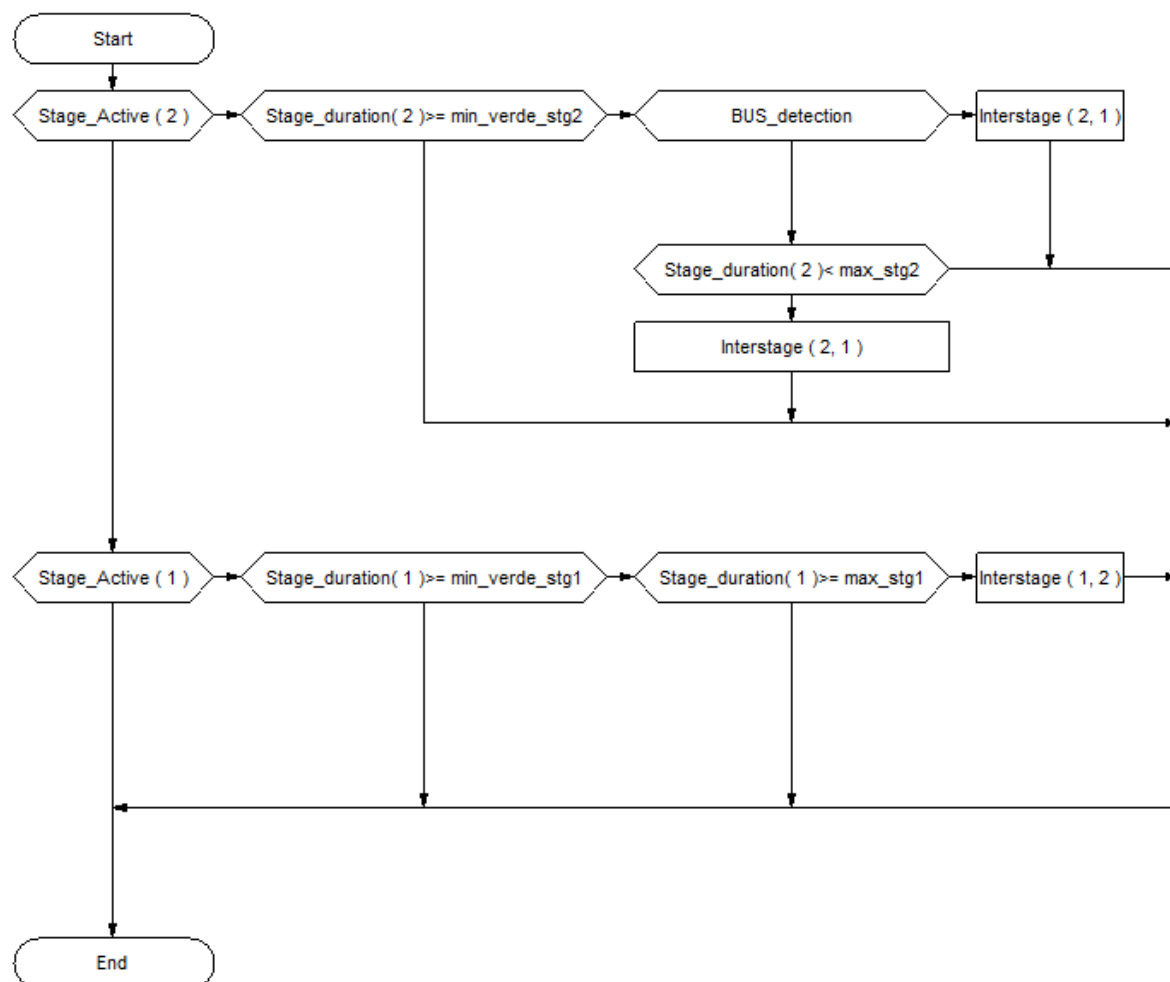


Figura 28 - Lógica de atuação – Antecipação do Verde.

A lógica de atuação é feita da seguinte forma: durante a abertura da fase secundária, é verificado se já foi atingido o tempo mínimo de verde. Caso tenha sido atingido e houver detecção de autocarro na via principal, a fase da via secundária é interrompida e ocorre a abertura da fase na via principal. As condições impostas para verificar se já foi atingido o tempo mínimo de verde e se há detecção do autocarro são importantes para reduzir os impactos negativos à via secundária.

Caso não tenha sido atingido o tempo mínimo de verde, a programação continua a funcionar normalmente até que este seja atingido. Caso não haja detecção de autocarro, mas já tenha sido atingido o tempo máximo da fase, esta é interrompida e ocorre a abertura da fase na via principal.

Durante a abertura da fase na via principal o processo ocorre normalmente sem atuação, ou seja, após o fim do tempo máximo de verde, a fase principal fecha e abre a fase da via secundária.

4.4.2. EXTENSÃO DO TEMPO DE VERDE

Como apresentado anteriormente, na via principal o volume de tráfego é consideravelmente maior do que na secundária. Dessa forma, existe um grande risco de congestionamento na mesma, nas horas de ponta, fazendo com que os autocarros fiquem retidos nas filas e assim, atrasem o cronograma previsto.

Assim, para limpar a intersecção e permitir a passagem do autocarro mais rapidamente, concluiu-se que seria preciso estender o tempo de verde na via principal. Com isso, quando o autocarro é detetado nessa via, o tempo de verde aumenta para que todos os veículos localizados entre ele e a intersecção possam passar sem precisar parar, permitindo que o autocarro faça o mesmo.

Da mesma forma que na estratégia anterior, seguiu-se com a definição da lógica de programação no VisVAP, mas desta vez com a Extensão do Tempo de Verde, apresentada na figura abaixo:

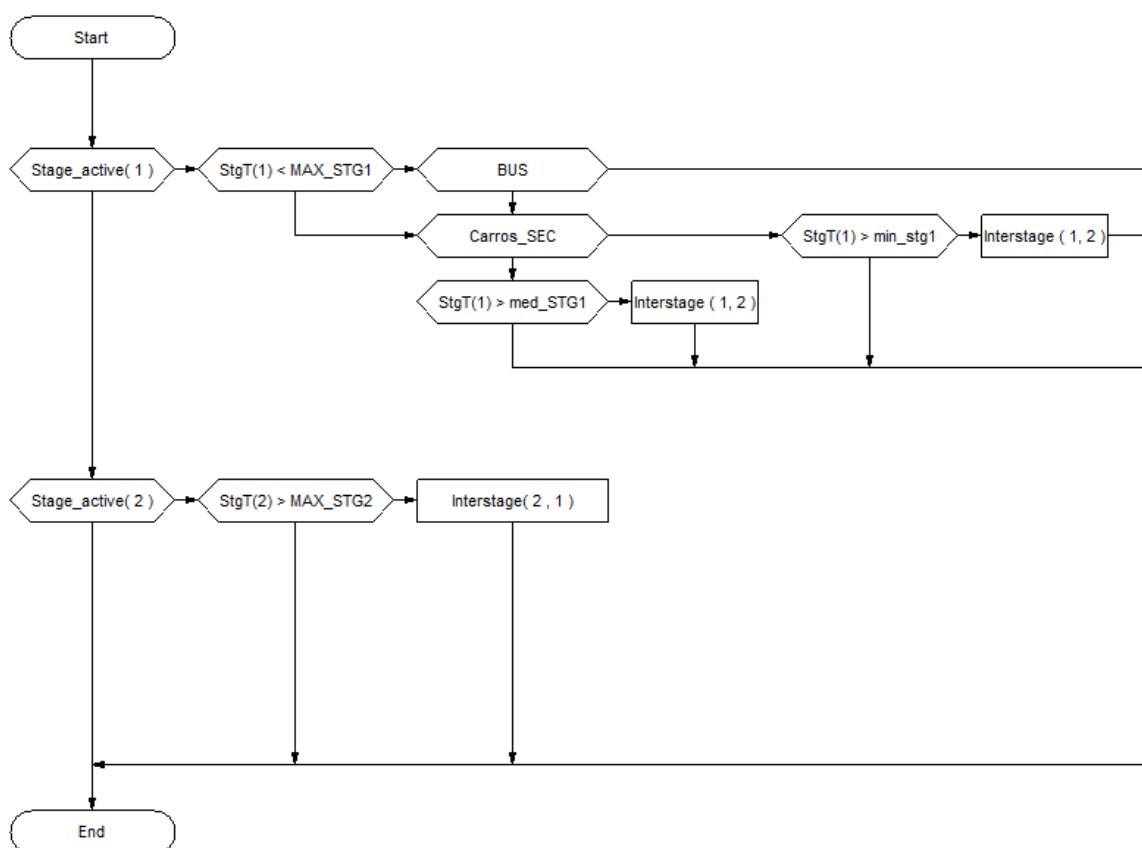


Figura 29 - Lógica de atuação – Extensão do Verde.

A lógica de atuação é feita da seguinte forma: caso haja detecção do autocarro e ainda não foi atingido o tempo de extensão do verde, a programação continua a funcionar até que esse tempo seja atingido.

Caso não haja detecção de autocarros e houver detecção de veículos na via secundária, abre a fase da via secundária, caso já tenha sido atingido o tempo mínimo de verde da fase principal. Caso não haja

deteção de autocarros na via principal ou de veículos em geral na via secundária e já tiver sido atingido o tempo regular da fase na via principal, ocorre a abertura de fase para a via secundária.

4.5. DEFINIÇÃO DOS ELEMENTOS DE AVALIAÇÃO

Com toda a caracterização da rede, definição dos cenários, escolha das estratégias de prioridade e definição das programações, a última etapa foi definir os elementos que permitiriam obter resultados provenientes da simulação. Dentre as opções fornecidas pelo *software*, escolheu-se os seguintes objetos:

- *Nodes*
- *Data Collection Points*
- *Vehicle Travel Times*
- *Queue Counters*

Os *Nodes* são polígonos criados pelo utilizador e devem conter a seção da via a ser estudada sendo, portanto, definidos por uma área. Eles fornecem uma série de informações a respeito da via/intersecção estudada e medem a fila a partir de um *Signal head* (semáforo) ou de uma linha de paragem [22].

Assim, o *Node* foi definido de forma a conter a intersecção em estudo, em todos os cenários propostos, englobando tanto os semáforos relativos à via principal, quanto os localizados na via secundária, conforme mostra a Figura 30.

Os *Data Collection Points* (pontos de recolha de dados) são elementos inseridos ao longo dos arcos, em cada via em que se deseja obter informações. Funcionam de forma similar aos detetores de *loop* de indução, ou seja, são fixados ao pavimento e fazem o registo do tráfego que por eles passam.

Na via principal, foram inseridos 3 objetos, um ao lado do outro, localizados a aproximadamente 108 metros da linha de paragem. Na via secundária repetiu-se o processo, localizando 1 ponto a 20 metros da linha de paragem (na via de movimento em frente em direção a Rua do Bonjardim) e 2 pontos de coleta à 23 metros da linha de paragem localizada na via de viragem à esquerda.

Na via principal, escolheu-se essa localização por ser o local imediatamente antes dos detetores, permitindo assim avaliar os veículos que passam por eles e conseguem se beneficiar da estratégia de prioridade. Na via secundária, os pontos foram localizados próximos aos *Signal heads*, pois a fila de espera nessa via é pequena, portanto, mesmo que os veículos sejam penalizados pela prioridade na via principal, ainda será possível recolher os dados nessa via.

Os *Vehicle Travel Times* são elementos também fixados sobre a via, que calculam o tempo de viagem dos veículos, entre duas secções da via. Para defini-los é preciso fixar dois objetos, um de início e um

de fim, que identificarão o número de veículos que passam naquele troço, a distância percorrida, e o tempo de viagem médio desses veículos.

Na via principal, foram posicionados entre o ponto antes dos detetores, até o ponto em frente aos *Signal heads*, para fornecer as informações dos veículos beneficiados com as estratégias de prioridade. Na via secundária, foram localizados entre aproximadamente 35 metros antes dos *Signal heads* e o ponto imediatamente depois deles, conforme mostra a Figura 30.

Por fim, os *Queue Counters* medem o comprimento de fila médio e máximo e o número de paragens na fila, a partir da sua localização e apenas no arco onde está inserido. Por isso, é importante ter em atenção a sua localização, sendo colocado preferencialmente junto à linha de paragem ou semáforo. Foram inseridos três objetos na intersecção em análise, um junto ao semáforo da via priorizada e outros dois juntos ao semáforo da via não priorizada - um na via que faz o movimento em frente, em direção à Rua do Bonjardim e outro junto ao semáforo de viragem à esquerda na Praça do Marquês.

A figura a seguir mostra os elementos de avaliação. Em preto está destacado o *Node*, em laranja os *Data Collection Points*, em verde os *Vehicle Travel Times* e em lilás os *Queue Counters*.

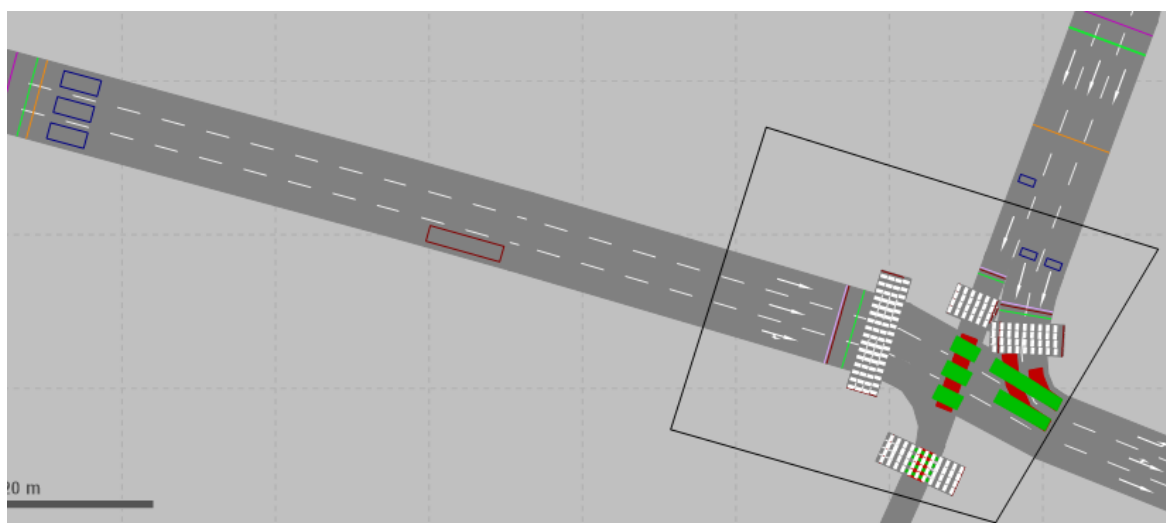


Figura 30 - Elementos de Avaliação do modelo (PTV Vissim).

Após todas as configurações feitas, em todos os cenários, a última etapa foi configurar os Parâmetros da Simulação. Definiu-se um período de simulação de 1h10 ou 4200 segundos, sendo os 10 primeiros minutos correspondentes ao período de *warm up* e o tempo restante, correspondente ao período de ponta analisado.

Foram feitas 10 simulações para cada cenário, sendo que a cada simulação, estipulou-se diferentes “sementes de entrada”. Isso significa que a cada simulação, as definições base se mantiveram as mesmas, porém foram geradas distribuições diferentes para simular o tráfego real, que nunca possui o mesmo comportamento. Com todas as simulações realizadas, passou-se à etapa de análise dos resultados.

5

ANÁLISE DE RESULTADOS

5.1. ENQUADRAMENTO

A avaliação dos resultados foi realizada comparando-se o Cenário Base, cenário atual em que não há nenhuma medida de prioridade ao transporte público e o semáforo funciona a tempos fixos, com o Cenário Alternativo, no qual as estratégias são aplicadas para priorizar os autocarros que circulam na via principal. Ainda, o Cenário Alternativo é composto por duas estratégias distintas, a Antecipação do Verde e a Extensão do Verde.

Os resultados foram obtidos a cada 15 minutos, totalizando 1h de simulação para cada hora de ponta. Foram executadas 10 simulações para cada cenário e estratégia, sendo o resultado final a média dos valores obtidos nas 10 simulações. Os indicadores de desempenho utilizados foram o Atraso Médio do Passageiro, indicador do desempenho do transporte público, o Atraso Médio do Veículo, Comprimento de Fila Médio e Nível de Serviço, sendo estes últimos indicadores do desempenho das vias e da intersecção como um todo, sem distinguir entre a tipologia dos veículos.

5.2. ANÁLISE DO DESEMPENHO DOS TRANSPORTES PÚBLICOS

A análise do desempenho dos transportes públicos é baseada no indicador Atraso Médio do Passageiro. O *software* identifica a passagem de veículos e passageiros e, portanto, consegue identificar quando houve passagem do transporte público.

As figuras a seguir mostram o atraso médio do passageiro na via principal e na via secundária, na hora de ponta da manhã e da tarde. Em todos os cenários e em todos os intervalos houve passagem de autocarros, como era de se esperar, já que se trata de uma intersecção servida por muitas linhas.

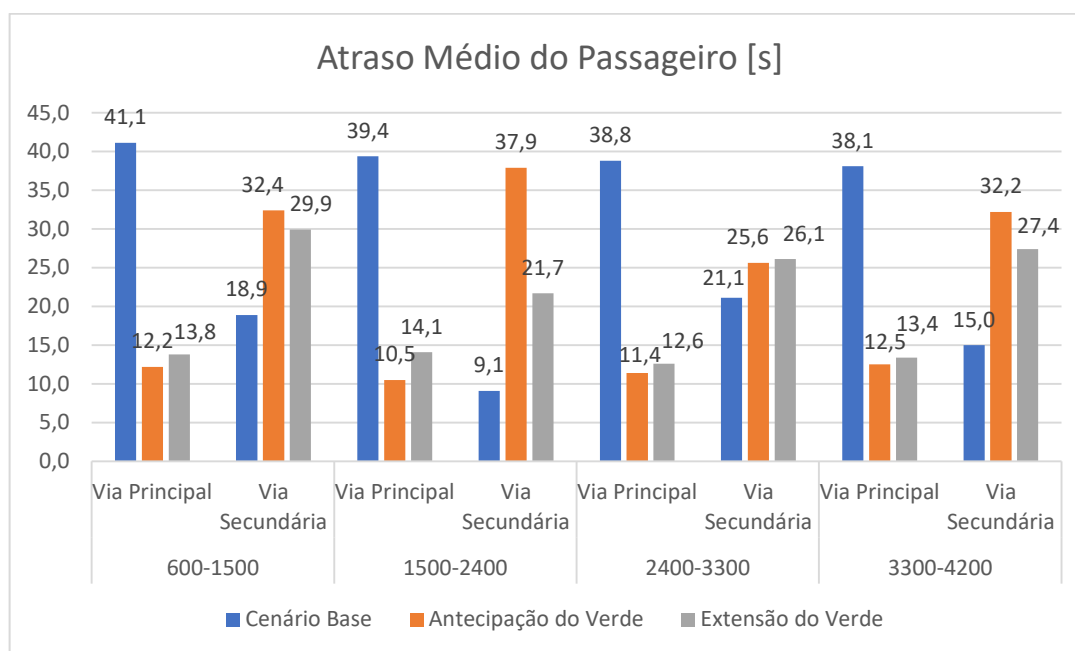


Figura 31 – Gráfico representativo do Atraso Médio do Passageiro (HPM).

Na HPM, na via principal do Cenário Base, é possível verificar valores elevados para o atraso médio do passageiro, sendo estes próximos dos 40s. Já na via secundária esses valores são consideravelmente mais baixos, sendo o menor valor igual a 9,1s e o maior 21,1s, correspondendo a quase metade dos valores da via principal.

Isso ocorre porque a via principal possui grande volume de tráfego, implicando em uma maior probabilidade de haver paragens e congestionamento. Já na via secundária, como o volume de tráfego é menor (aproximadamente 23% do volume de tráfego que passa na intersecção), é menor a probabilidade de congestionamento e paragens durante a abertura da fase da via principal.

Com a aplicação das estratégias de prioridade, é possível observar uma mudança significativa nos indicadores. Na via principal, com a estratégia de Antecipação do verde, nota-se uma grande redução do atraso e melhores resultados. Com a Extensão do tempo de verde, também há melhora significativa nos resultados, porém como essa estratégia apenas fornece um tempo adicional de verde e não corresponde à abertura de uma fase inteira, os resultados apesar de também serem favoráveis, não são tão promissores quanto os resultados obtidos com a estratégia de Antecipação do verde.

Já na via secundária a situação inverte-se. O atraso médio, que era menor, passa a ter valores mais elevados com a implantação das estratégias de prioridade. Isso também era de se esperar, já que as estratégias beneficiam a via principal em detrimento da secundária. É possível observar que os valores mais elevados do atraso médio do passageiro na via secundária correspondem ao cenário alternativo com a estratégia de Antecipação do verde, já que se introduz a fase verde na via principal antes do tempo estipulado para o funcionamento a tempos fixos, interrompendo a passagem dos veículos na via secundária antes da hora.

A tabela a seguir mostra a comparação entre os valores obtidos do cenário base com o cenário alternativo, para as diferentes estratégias. Os valores negativos representam uma redução do atraso médio e, portanto, melhora do desempenho do transporte público na via, enquanto os valores positivos indicam um aumento do atraso e piora dos indicadores:

Tabela 3 – Comparação do atraso médio do passageiro entre o Cenário Base e as diferentes estratégias de prioridade ao Transporte Público (HPM)

Intervalo	Via	C.B. – A.V.	C.B. – E.V.
600 - 1500	Principal	- 70,3 %	- 66,4 %
	Secundária	71,4 %	58,2 %
1500 - 2400	Principal	- 73,3 %	- 64,2 %
	Secundária	316,5 %	138,5 %
2400 - 3300	Principal	- 70,6 %	- 67,5 %
	Secundária	21,3 %	23,7 %
3300 - 4200	Principal	- 67,2 %	- 64,8 %
	Secundária	114,7 %	82,7 %

Dessa forma, é possível ver que as estratégias de prioridade se mostraram eficazes ao desempenho do transporte público na via principal. Se no primeiro cenário, sem as estratégias, havia valores altos para o atraso do passageiro, com o sistema de prioridade, esses valores foram reduzidos em média 70% com a estratégia de Antecipação do Verde e 66% com a Extensão do Verde.

Já na via secundária, houve um aumento médio de 130% com a AV e 76% com a EV. Isso mostra que, para o caso do atraso médio do passageiro, a melhor estratégia a se adotar seria a Extensão do tempo de verde, já que o efeito positivo à via principal é quase igual ao efeito gerado pela Antecipação do verde e o prejuízo causado à via secundária é significativamente menor.

NA HPT é possível observar que o comportamento da intersecção face às estratégias de prioridade é semelhante à HPM.

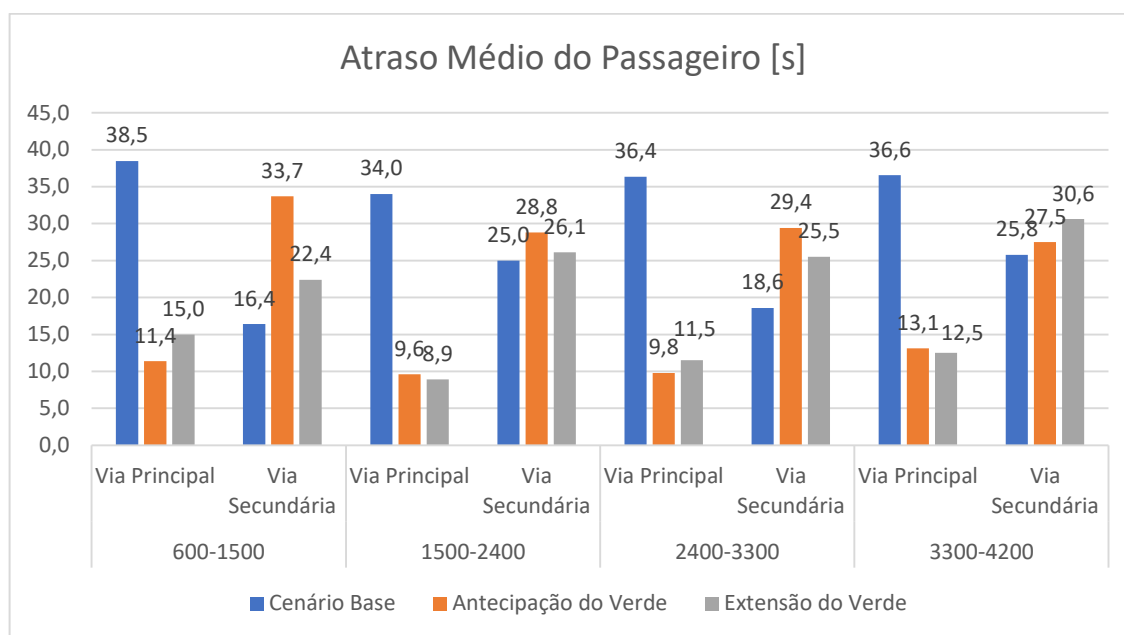


Figura 32 - Gráfico representativo do Atraso Médio do Passageiro (HPT).

Tabela 4 - Comparação do atraso médio do passageiro entre o Cenário Base e as diferentes estratégias de prioridade ao Transporte Público (HPT)

Intervalo	Via	C.B. – A.V.	C.B. – E.V.
600 - 1500	Principal	- 70,4 %	- 61,0 %
	Secundária	105,5 %	36,6 %
1500 - 2400	Principal	- 71,8 %	- 73,8 %
	Secundária	15,2 %	4,4 %
2400 - 3300	Principal	- 73,1 %	- 68,4 %
	Secundária	58,1 %	37,1 %
3300 - 4200	Principal	- 64,2 %	- 65,8 %
	Secundária	6,6 %	18,6 %

De acordo com a Figura 32 e a Tabela 4 é possível perceber que as estratégias de prioridade foram mais bem-sucedidas na HPT, pois proporcionaram reduções ao atraso da via principal semelhantes à HPM, porém minimizaram os impactos negativos à via secundária.

Isso ocorreu porque na HPT há um valor ligeiramente maior de veículos e pessoas circulando na via principal em comparação à HPM, enquanto na via secundária a situação é oposta, há menos veículos e autocarros. Dessa forma, as estratégias de prioridade ao transporte público acabam por beneficiar mais a via principal e prejudicar menos a via secundária.

Como no caso anterior, a estratégia de Antecipação do Verde se mostrou mais eficiente ao desempenho dos autocarros da via principal, fornecendo uma redução média de aproximadamente 70% no Atraso do Passageiro, enquanto a estratégia de Extensão do Verde forneceu uma redução de 67%. Por outro lado, a primeira estratégia aumentou o atraso em 46%, enquanto a segunda em 24%.

5.3. ANÁLISE DO DESEMPENHO DA INTERSECÇÃO

5.3.1. ATRASO MÉDIO DO VEÍCULO

Os gráficos a seguir mostram o Atraso Médio do Veículo em cada cenário. O atraso do veículo é obtido subtraindo-se o tempo de viagem teórico (tempo de viagem caso não houvesse nenhum tipo de obstáculo na via) do tempo de viagem real e não leva em conta o atendimento de passageiros nas paragens.

Na HPM, é possível perceber resultados similares aos resultados anteriores, ou seja, melhora dos indicadores da via principal nos cenários com as estratégias de prioridade e piora dos indicadores da via secundária.

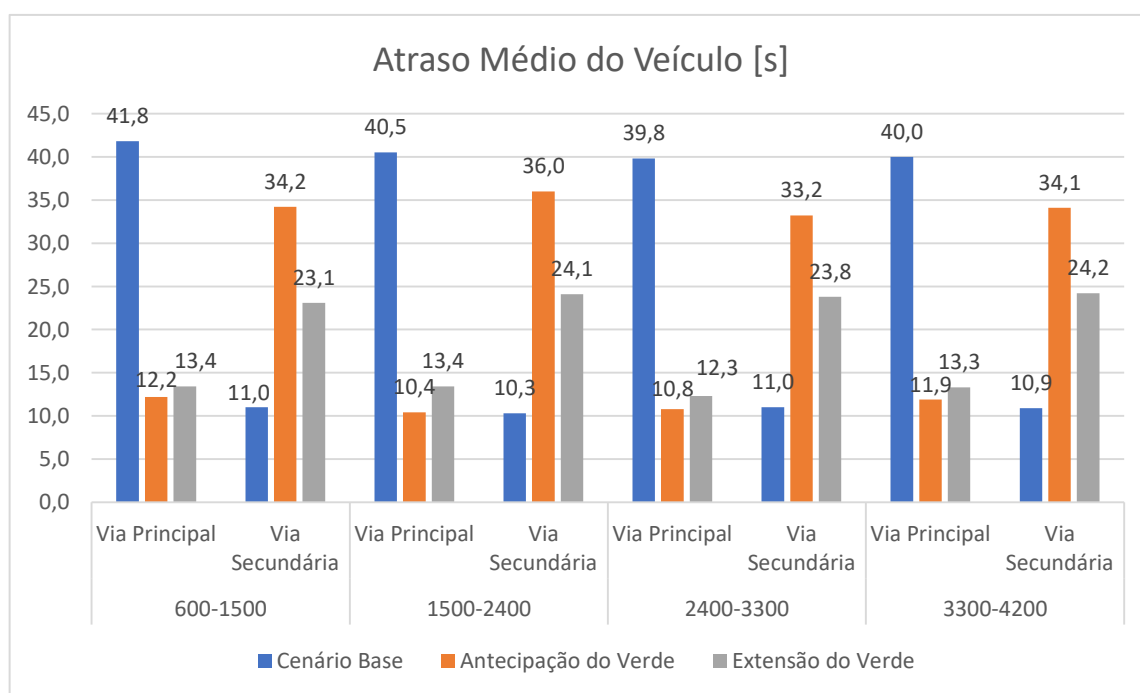


Figura 33 - Gráfico representativo do Atraso Médio do Veículo (HPM).

Isso ocorre porque a priorização do autocarro permite também a passagem do tráfego em geral que circula na via principal. Com esse tráfego escoando mais facilmente, o atraso dos veículos diminui. Da mesma forma que no caso anterior, a priorização da via principal diminui os níveis de circulação da via secundária, gerando piores resultados para o atraso médio na via não priorizada.

A tabela a seguir mostra a comparação do Atraso Médio do Veículo entre o Cenário Base e as diferentes estratégias de prioridade, na hora de ponta da manhã:

Tabela 5 - Comparação do atraso médio do veículo entre o Cenário Base e as diferentes estratégias de prioridade ao Transporte Público (HPM)

Intervalo	Via	C.B. – A.V.	C.B. – E.V.
600 - 1500	Principal	- 70,8 %	- 67,9 %
	Secundária	210,9 %	110,0 %
1500 - 2400	Principal	- 74,3 %	- 66,9 %
	Secundária	249,5 %	134,0 %
2400 - 3300	Principal	- 72,9 %	- 69,1 %
	Secundária	201,8 %	116,4 %
3300 - 4200	Principal	- 70,3 %	- 66,7 %
	Secundária	212,8 %	122,0 %

Novamente, a estratégia de Antecipação do verde se mostra mais promissora para a via principal, mas também penaliza mais a via secundária. A média dos valores para essa estratégia corresponde a 72% de redução do atraso na via principal e 219% de aumento na via secundária. Já para a segunda estratégia, esses valores correspondem a 68% e 121%, respetivamente. Ao contrário do caso anterior, as duas estratégias apresentam valores muito elevados para o atraso da via secundária, sendo que em todos os intervalos os valores são no mínimo o dobro dos valores obtidos com o Cenário Base.

Como no caso anterior, na HPT a intersecção se comporta de forma semelhante à HPM.

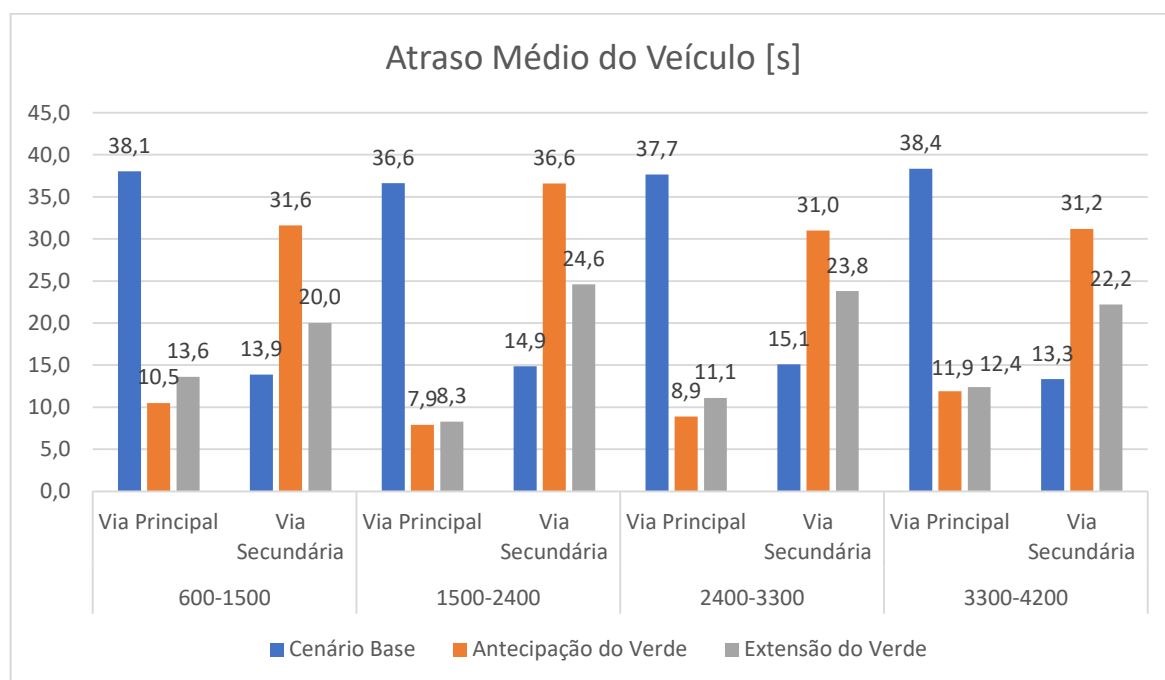


Figura 34 - Gráfico representativo do Atraso Médio do Veículo (HPT).

Tabela 6 - Comparação do atraso médio do veículo entre o Cenário Base e as diferentes estratégias de prioridade ao Transporte Público (HPT)

Intervalo	Via	C.B. – A.V.	C.B. – E.V.
600 - 1500	Principal	- 72,4 %	- 65,2 %
	Secundária	127,3 %	43,9 %
1500 - 2400	Principal	- 78,4 %	- 77,3 %
	Secundária	145,6 %	65,1 %
2400 - 3300	Principal	- 76,4 %	- 70,6 %
	Secundária	105,3 %	57,6 %
3300 - 4200	Principal	- 69,0 %	- 67,7 %
	Secundária	134,6 %	66,9 %

No caso do Atraso Médio do Veículo também é possível perceber que as estratégias de prioridade foram mais bem-sucedidas na HPT, pois como no caso anterior como há maior volume de tráfego na via principal, mais veículos foram beneficiados com as estratégias de prioridade, ao mesmo tempo que o menor volume de tráfego na via secundária acarretou em menor aumento do atraso médio do veículo nessa via.

5.3.2. COMPRIMENTO DE FILA MÉDIO

No Vissim, o comprimento de fila corresponde à distância máxima entre o contador (localizado próximo ao *Signal head*) e o veículo que cumpre a condição de fila e inclui os valores zero quando não há veículos a cumprir a condição de fila. Os valores são obtidos por intervalo de tempo e a média é calculada, fornecendo o comprimento de fila médio, apresentado nos gráficos a seguir.

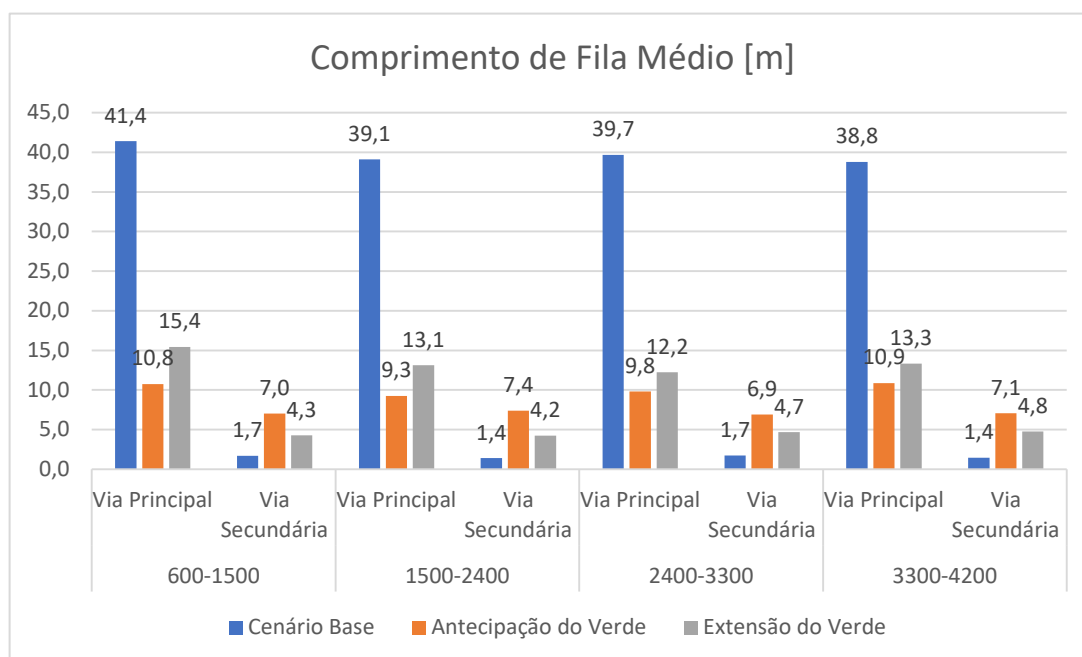


Figura 35 - Gráfico representativo do Comprimento de Fila Médio (HPM).

Como a via principal possui maior volume de tráfego, o comprimento de fila médio é maior. No Cenário Base, os valores ficam em torno dos 40m o que corresponde a aproximadamente 8 veículos ligeiros de 5m de comprimento. Considerando-se que o trecho da via principal entre a intersecção analisada e a intersecção anterior possui aproximadamente 180m, o comprimento de fila médio nessa via corresponde a quase 25% desse valor. Assim, esse indicador se mostra bastante elevado para as condições da via.

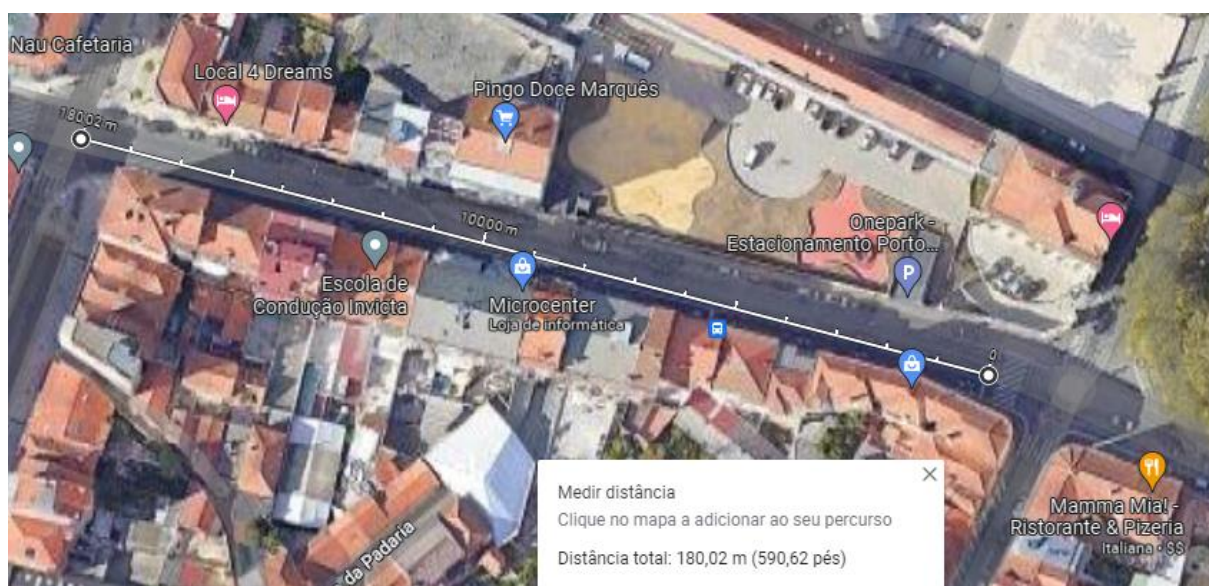


Figura 36 - Distância entre a intersecção em análise e a intersecção anterior. Fonte: Google Maps, 2023

Por outro lado, o valor médio desse indicador na via secundária equivale a 1,55m, correspondendo a um comprimento menor do que um veículo ligeiro. Isso ocorre devido ao volume de tráfego menor e a menor probabilidade dos veículos ficarem retidos no sinal vermelho.

Com as medidas de prioridade, os resultados mostram-se promissores, para as duas estratégias e para as duas vias. Com a Antecipação do verde, novamente tem-se melhores resultados para a via principal e piores resultados para a via secundária, quando comparados com a estratégia de Extensão do tempo de verde. Porém, nesses dois cenários, o impacto negativo na via secundária não é significativo. O maior valor obtido com a Antecipação do verde é 9,3m, correspondendo a menos de 2 veículos ligeiros. Com a Extensão do verde, o maior valor é reduzido para 4,8m, ou seja, menos de 1 veículo ligeiro.

Na HPT o comportamento da intersecção é semelhante à HPM. As estratégias de prioridade beneficiam a via principal e prejudicam ligeiramente a via secundária, porém sem causar grandes impactos negativos a essa via.

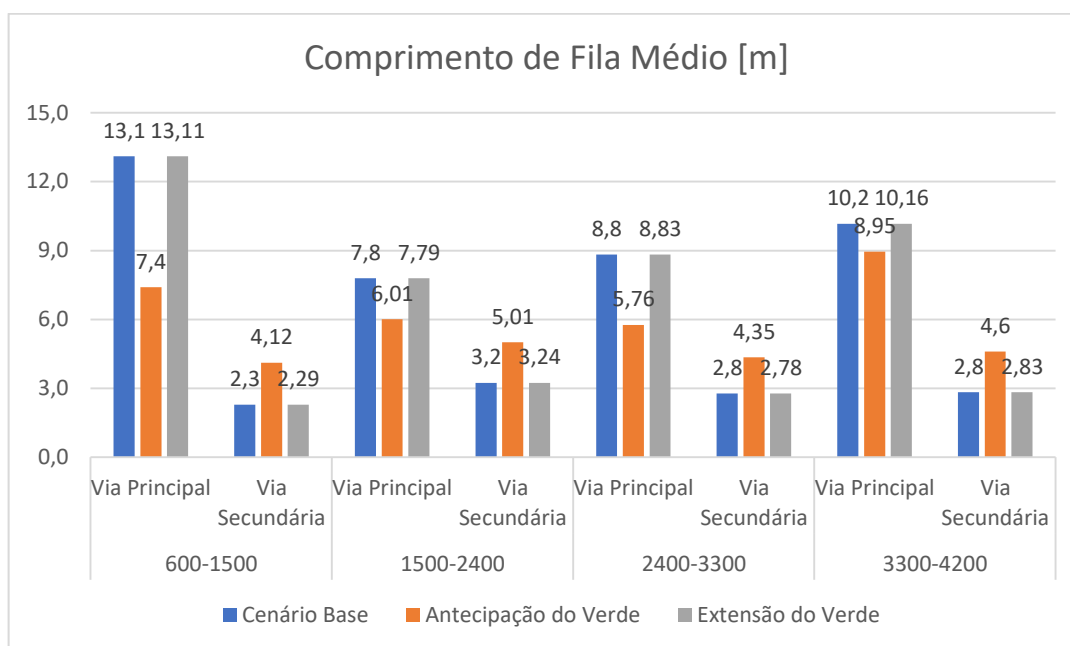


Figura 37 - Gráfico representativo do Comprimento de Fila Médio (HPT).

5.3.3. NÍVEL DE SERVIÇO

O nível de serviço é um indicador qualitativo que reflete as condições operacionais da via. Os resultados obtidos através do PTV Vissim, podem ser comparados ao nível de serviço do *Highway Capacity Manual de 2010*. As tabelas a seguir apresentam os valores para o Cenário Base e para cada estratégia do Cenário Alternativo, na hora de ponta da manhã e da tarde.

Tabela 7 - Nível de Serviço da Intersecção (HPM)

Intervalo [s]	Cenário Base	Antecipação do Verde	Extensão do Verde
600 – 1500	D	B	B
1500 – 2400	C	B	B
2400 - 3300	C	B	B
3300 - 4200	C	B	B

Tabela 8 - Nível de Serviço da Intersecção (HPT)

Intervalo [s]	Cenário Base	Antecipação do Verde	Extensão do Verde
600 – 1500	C	B	B
1500 – 2400	C	B	B
2400 - 3300	C	B	B
3300 - 4200	C	B	B

Assim, no Cenário Base da HPM, durante os primeiros 15 minutos o nível de serviço identificado na intersecção foi o pior entre todos os períodos. Na HPT o nível de serviço manteve-se constante, equivalendo a um atraso do veículo de 20s a 35s. Com a aplicação das estratégias de prioridade, o nível de serviço da intersecção melhorou, nos dois períodos do dia, se estabelecendo no nível B (atraso do veículo de 10s a 20s), o que indica que de facto as medidas foram eficazes para melhorar as condições de circulação da intersecção.

6

CONCLUSÃO

O uso intensivo e crescente dos automóveis modificou o padrão de mobilidade urbana e trouxe consequências negativas para o meio ambiente e para a população. Problemas como poluição sonora e atmosférica, congestionamento e longos tempos de percurso têm assolado as áreas urbanas por todo o globo, prejudicando a saúde física e emocional das pessoas.

É sob essa perspectiva que as Autoridades Locais têm investido cada vez mais em medidas que incentivem o uso do transporte público. Essas soluções criam condições que privilegiam o autocarro tornando-o mais eficientes e atrativo para o cidadão. A prioridade semaforica aplicada aos transportes públicos é uma solução que tem sido cada vez mais desenvolvida e explorada nas áreas urbanas.

Assim, o objetivo deste trabalho foi a avaliação de medidas de prioridade ao transporte público em intersecções controladas por sinais luminosos. Para tal foi utilizada a intersecção da Praça do Marques de Pombal com a Rua de João Ribeiro como caso de estudo, uma intersecção importante para a cidade do Porto, servida por várias linhas de autocarro.

A metodologia de avaliação utilizada foi baseada na comparação do Cenário Base, situação atual em que os semáforos funcionam a tempos fixos e não há nenhuma medida de prioridade implantada, com o Cenário Alternativo, no qual as medidas são executadas dando prioridade aos autocarros que circulam na via principal.

O Cenário Base foi fornecido pela empresa SOLTRÁFEGO SA e o Cenário Alternativo foi construído a partir desse cenário e da base teórica adquirida por meio da pesquisa bibliográfica. Duas estratégias foram criadas para compor o Cenário Alternativo, a Antecipação do Verde e a Extensão do Tempo de Verde. Os cenários foram desenvolvidos para a hora de ponta da manhã, das 08h às 09h e para a hora de ponta da tarde, das 18h às 19h.

A Antecipação do Verde foi desenvolvida de forma que quando a fase da via secundária estivesse aberta e houvesse uma chamada do autocarro pelo detetor na via principal, a via secundária fecharia

automaticamente e uma nova fase seria inserida na via principal para permitir a passagem do autocarro, sem que este precisasse parar.

A Extensão do tempo de verde foi desenvolvida para fornecer um tempo adicional de verde à fase da via principal, quando houvesse deteção do autocarro nessa via. Algumas condições foram criadas para que a lógica de atuação pudesse ser executada de maneira mais eficiente, como por exemplo caso não houvesse chamada do autocarro e houvesse chamada de veículos na via secundária, a extensão não seria executada.

Assim, para se obter os resultados dos diferentes cenários e estratégias, utilizou-se o *software* de microsimulação PTV Vissim 2022 e o módulo PTV VisVAP para executar a lógica de atuação. A avaliação levou em conta não só o efeito das estratégias nos transportes públicos e na via priorizada, mas também analisou o impacto gerado à via não priorizada e à intersecção como um todo.

Com os resultados obtidos pode-se perceber que as estratégias de prioridade melhoraram as condições de circulação na via principal e melhoraram o desempenho dos autocarros. O Atraso Médio do Passageiro na via principal foi reduzido com aplicação das duas estratégias, sendo a Antecipação do Verde mais promissora quando comparada à Extensão do Verde. Isso porque quando há um pedido de passagem do autocarro pelo detetor, uma nova fase é inserida à via principal para permitir a passagem desse veículo, enquanto com a Extensão do Verde é fornecido apenas um tempo extra de verde, menor do que o tempo da fase normal.

Foi possível concluir também que as medidas foram mais eficientes na hora de ponta da tarde, porque houve maior passagem de veículos e pessoas na via principal, quando comparada com a hora de ponta da manhã e menor passagem de veículos e pessoas na via secundária. Ou seja, mais autocarros foram beneficiados na via principal, enquanto menos veículos foram prejudicados na via secundária.

As medidas de prioridade acabaram por beneficiar também o tráfego em geral que circula na via principal, já que a abertura de uma nova fase ou o tempo adicional de verde permitiram que os veículos ecoassem mais facilmente. Dessa forma, as estratégias de prioridade se mostraram benéficas para a via principal como um todo.

Porém, o mesmo não ocorreu à via secundária. Foi possível observar através dos resultados que o benefício gerado à via priorizada ocorreu em detrimento da via não priorizada. A interrupção da fase e o menor tempo de verde dessa via aumentaram significativamente o atraso do passageiro e do veículo.

Porém, mesmo com o aumento dos atrasos e do comprimento de fila médio da via secundária, como o volume de tráfego nessa via é significativamente menor do que na via principal, ainda assim os resultados se mostraram promissores para a intersecção como um todo, aumentando o Nível de Serviço da mesma.

Assim, o presente trabalho pode servir de base para pesquisas futuras, que venham a otimizar as estratégias adotadas. Uma abordagem possível é a alteração dos tempos de verde fornecidos à fase principal, aliada à otimização da lógica de atuação, impondo-se melhores condições para assim reduzir os impactos negativos gerados à via secundária e melhorar a eficiência da intersecção como um todo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Costa, A. Transportes públicos. In *Manual de Planeamento das Acessibilidades e da Gestão Viária*, 7 -16, Comissão de Coordenação e Desenvolvimento Regional do Norte, 2008.
- [2] Pereira, B. *Avaliação dos Impactos Decorrentes da Introdução de uma Via BUS em Ambiente Urbano*. Dissertação de Mestrado, Universidade do Porto, 2017.
- [3] *Prioridade para o Transporte Coletivo Urbano – Relatório Técnico*. Secretaria Especial de Desenvolvimento Urbano da Presidência da República. Associação Nacional das Empresas de Transportes Urbanos, 2022.
- [4] NACTO – National Association of City Transportation Officials <https://nacto.org/publication/transit-street-design-guide/transit-lanes-transitways/transit-lanes/> . Acessado em 06/12/2022.
- [5] Neves, J. *The Impacts of Bus Lanes on Urban Traffic Environment*. Dissertação de Mestrado, Universidade do Porto, 2006.
- [6] Brinckerhoff, P. *et al. Transit Capacity and Quality of Service Manual* National Academy of Sciences. Washington, D.C. 2013.
- [7] Baker, R. *et al. An Overview of Transit Signal Priority*. ITS America, 2002.
- [8] Smith, H., Hemily B., Ivanovic M., Fleming G., Inc. *Transit Signal Priority (TSP): A Planning and Implementation Handbook*. ITS America, 2005.
- [9] Chung, E., *et al.* Traffic management transport modeling and data management. In *International Encyclopedia of Transportation*. 308, Elsevier Ltd, 2021.
- [10] Peron, L. *Contribuição Metodológica para Aplicação de Prioridade Semafórica Condicional em Corredores de Ônibus*. Dissertação de Mestrado, Escola politécnica da Universidade de São Paulo, 2015.
- [11] Christofa, E. *Traffic Signal Optimization with Transit Priority: A Person-based Approach*. Dissertação de Doutorado, University of California, 2012.
- [12] NACTO – National Association of City Transportation Officials <https://nacto.org/publication/transit-street-design-guide/intersections/signals-operations/active-transit-signal-priority/> . Acessado em 15/12/2022.
- [13] Liu, H., Skabardonis, A., Zhang, W., Li, M. *Optimal Detector Location for Bus Signal Priority*. Transportation Research Board, 23/09/2004.
- [14] Chapter 2. Sensor technology. In *Traffic Detector Handbook: Third Edition – Volume 1*. 2006. (<https://www.fhwa.dot.gov/publications/research/operations/its/06108/02.cfm>). Acessado em 22/12/2022.

- [15] Johnson, J. Traffic Detection by Inductive Loops. 11/04/2016. (<https://pennyroyalresearch.files.wordpress.com/2017/01/traffic-light-coils.pdf>). Acessado em 22/12/2022.
- [16] ATC Moving Traffic - Video Detector as Loop Replacement. (<https://www.aldriggetrafficcontrollers.com.au/products/video-detection>). Acessado em 22/12/2022.
- [17] Tavares, J.P. *Aplicabilidade e Robustez de Modelos de Afecção de Tráfego em Redes Urbanas*. Dissertação de Doutoramento, Universidade do Porto, 2003.
- [18] Marinho, T., Andrade, V. *Modernização de sistemas semaforicos. Estudo de Tráfego, Instalações SLAT: #086 e #087 (Rua Constituição / Praça do Marquês)*. SOLTRÁFEGO, SA, julho 2022, Matosinhos.
- [19] Sivastava, H.M., *Encyclopedia of Physical Science and Technology (Third Edition)*, 2003. (<https://www.sciencedirect.com/topics/mathematics/queue-length>). Acessado em 10/01/2023.
- [20] *PTV Vissim 2020 User Manual*, PTV AG, Karlsruhe, 2019.
- [21] Wachs, M., Samuels, J.M., Skinner Jr, R.E., *et al. Highway Capacity Manual*. Transportation Research Board. National Research Council. 2000.
- [22] Mora, P., Vianna, F. *Guia PTV Vissim*. Universidade Presbiteriana Mackenzie. (Sem data).

ANEXOS

ANEXO I

FREQUÊNCIA DAS LINHAS - STCP

Linha	Sentido	HPM		HPT	
		Nº veículos	Frequência (s)	Nº veículos	Frequência (s)
203	Castelo do Queijo – Marquês – Castelo do Queijo	3	660	4	1020
			2040		2040
			3300		3060
					4080
206	Viso - Campanhã	3	1260	4	600
			2520		1500
			3780		3420
					4080
	Campanhã - Viso	3	1020	3	1080
			2220		2820
			3420		3600
302	Circular Aliados – Damião de Gois	6	780	3	
			1320		1260
			1860		2280
			2580		3240
			3300		
			4020		
303	Circular Praça da Liberdade - Constituição	4	1200	4	1140
			1980		2040
			2760		2940
			3540		3840
402	Boavista – São Roque	5	840	5	1260
			1440		1980
			2040		2700
			2820		3420
	São Roque - Boavista	6	3720	4	4080
			840		1080
			1620		1800
			2220		2640
			2820		3540

			3420		
			4020		
603	Maia – Marquês - Maia	2	1920	2	2100
			3540		3780
			960		1140
			1740		1800
	Codiceira - Bolhão	5	2580	5	2520
			3180		3180
			3840		3840
701					660
			840		1320
			1740		2040
	Bolhão - Codiceira	4	2640	6	2700
			3540		3360
					4020
			600		780
			1320		1500
			2100		2160
	Travagem - Bolhão	6	2880	5	2880
			3540		3540
702			4140		
					1020
			1260		1680
			2220		2340
	Bolhão - Travagem	4	3060	5	3000
			3960		3720
			1260		1860
	Cordoaria - Sonhos	2	3360	2	3660
703			1560		1740
	Sonhos - Cordoaria	2	3480	2	3720
	Rio Tinto (estação) –		2220		1620
805	Marquês - Rio Tinto	2	3720	2	3600
	(estação)				

806	Fânzeres (metro) –	2	1920	3	900
	Marquês - Fânzeres		3180		2100
	(metro)				3300

ANEXO II

VOLUME DE TRÁFEGO – MATRIZ O/D

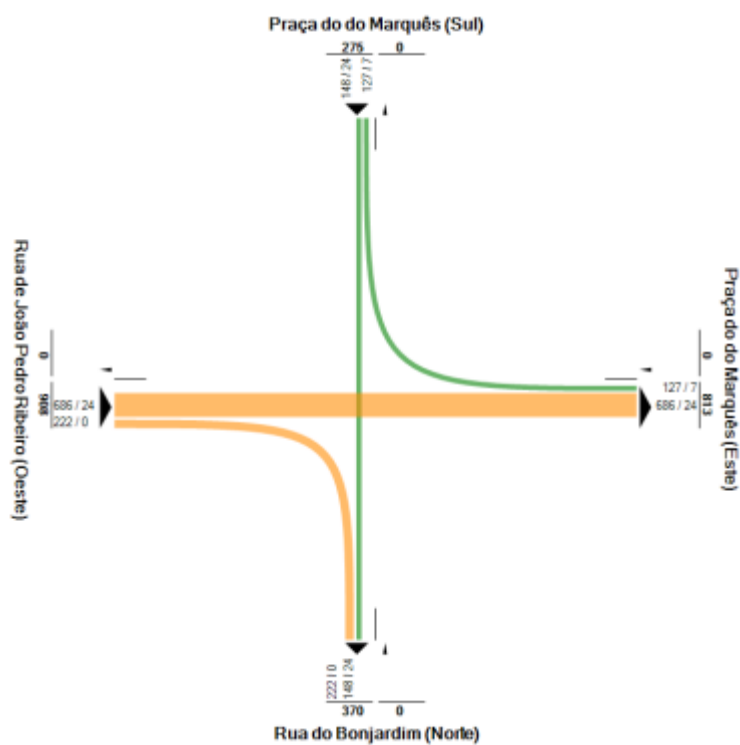


Figura 38 – Matriz O/D local HPM | SLAT 087 (Seção 1)

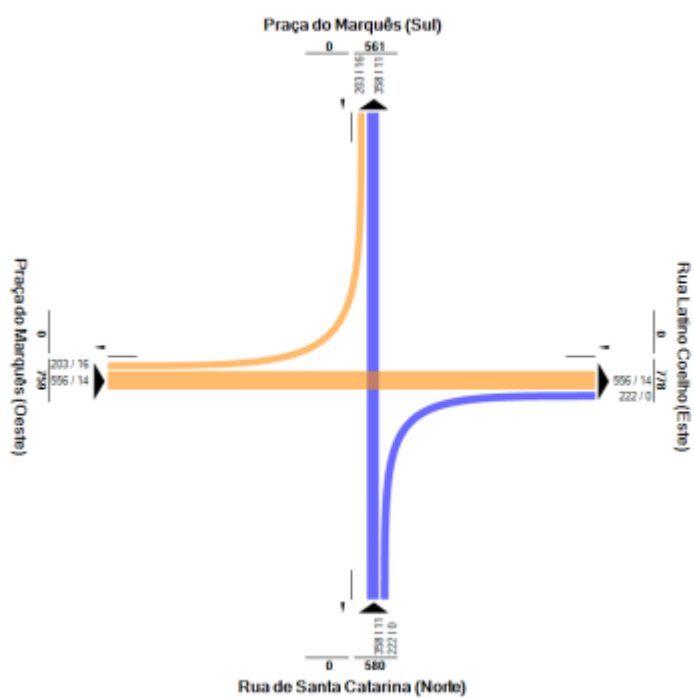


Figura 39 – Matriz O/D local HPM | SLAT 087 (Seção 2)

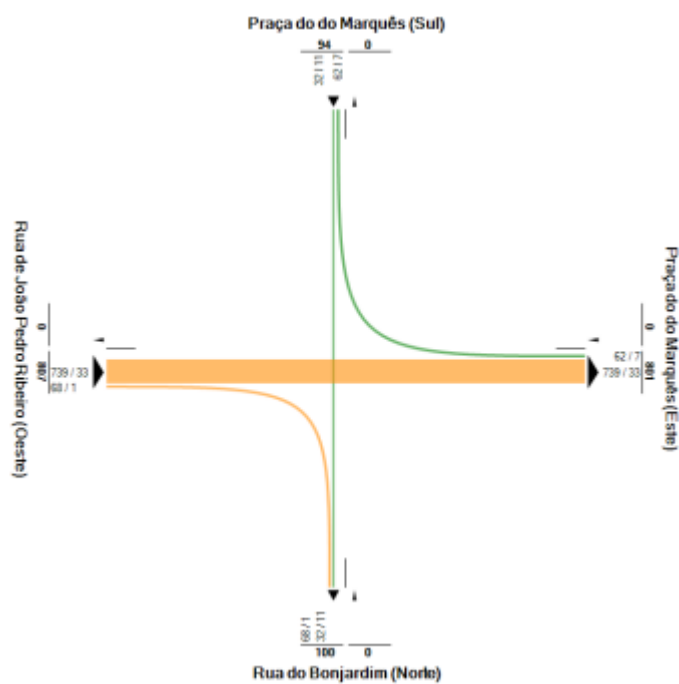


Figura 40 – Matriz O/D local HPT | SLAT 087 (Seção 1)

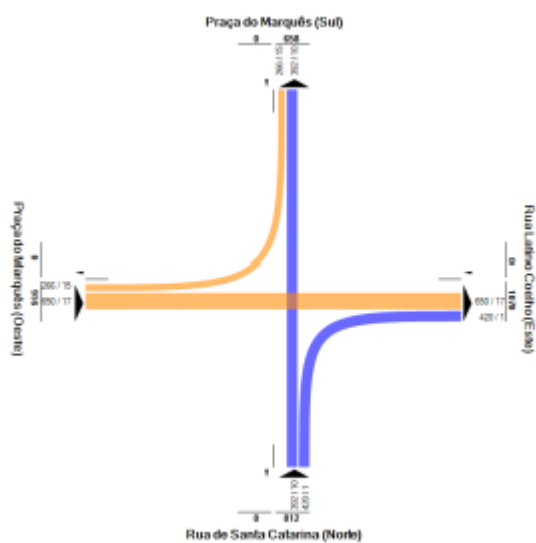


Figura 41 – Matriz O/D local HPT | SLAT 087 (Seção 2)

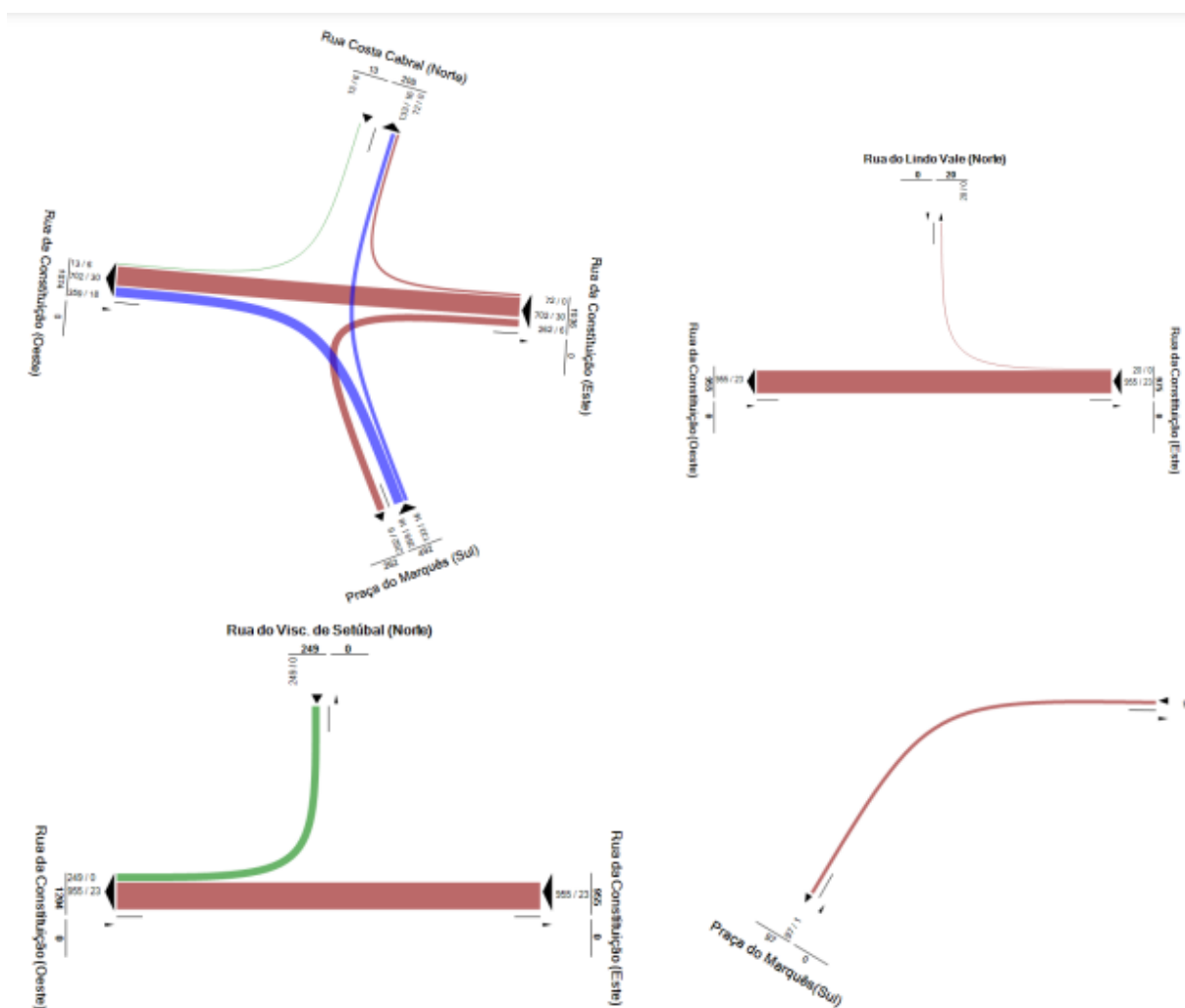


Figura 42 - Matriz O/D local HPM | SLAT 086

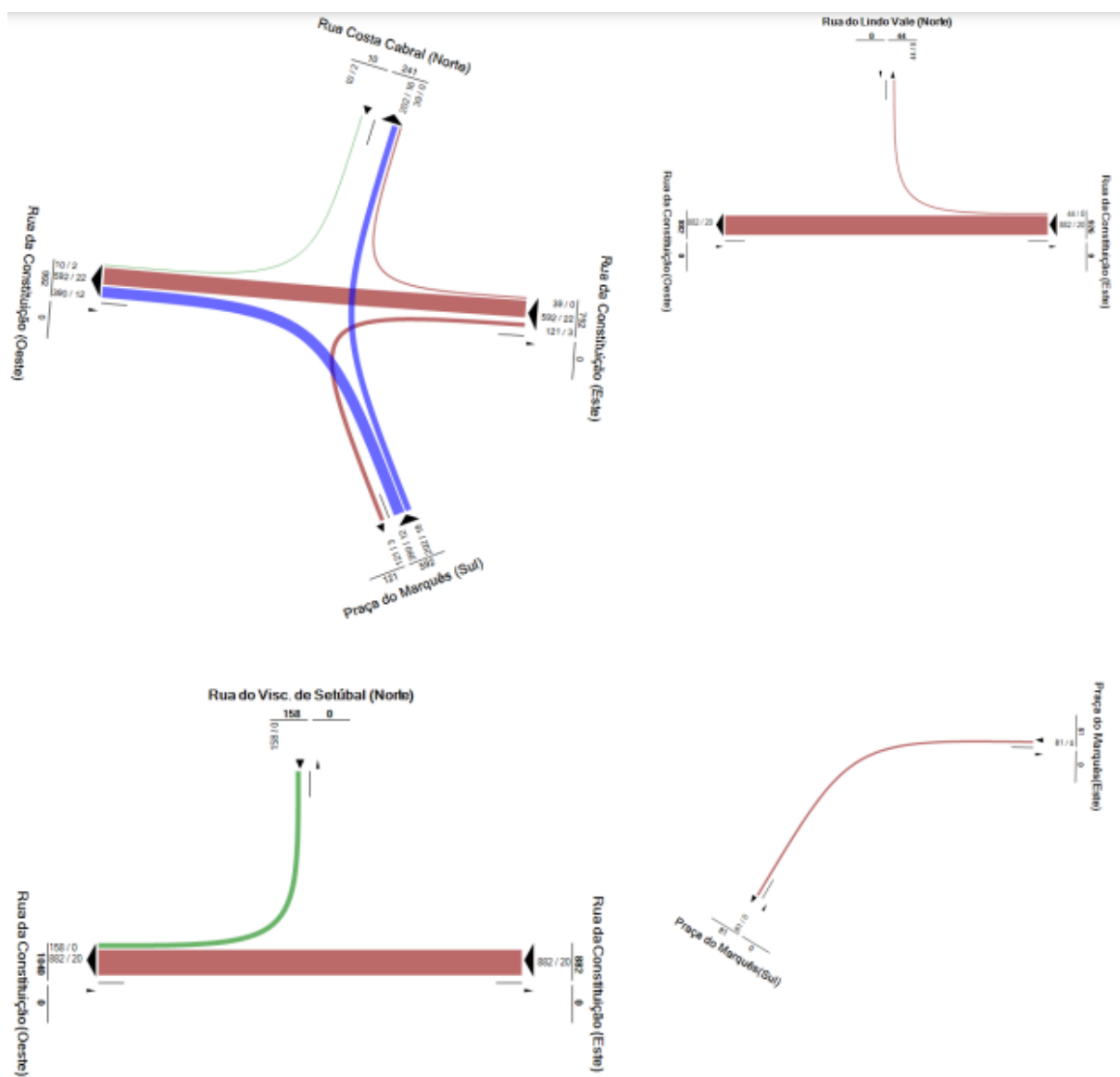


Figura 43 - Matriz O/D local HPT | SLAT 086