



**Avaliação do desempenho de soluções alternativas
em interseções, por recurso a técnicas de
microsimulação de tráfego**

Mestrado em Engenharia Civil – Construção Civil

Maria Júlia de Paula Bértoli

Leiria, setembro de 2019

Avaliação do desempenho de soluções alternativas em interseções, por recurso a técnicas de microssimulação de tráfego

Mestrado em Engenharia Civil – Construção Civil

Maria Júlia de Paula Bértoli

Dissertação de Mestrado realizada sob a orientação do Professor Doutor João Pedro Cruz da Silva, professor da Escola Superior de Tecnologia e Gestão do Instituto Politécnico de Leiria e coorientação da Professora Doutora Ana Maria César Bastos Silva, professora da Universidade de Coimbra.

Leiria, setembro de 2019

Originalidade e Direitos de Autor

A presente dissertação é original, elaborada unicamente para este fim, tendo sido devidamente citados todos os autores cujos estudos e publicações contribuíram para a elaborar.

Reproduções parciais deste documento serão autorizadas na condição de que seja mencionada a Autora e feita referência ao ciclo de estudos no âmbito do qual a mesma foi realizado, a saber, Curso de Mestrado em Engenharia Civil – Construção Civil, no ano letivo 2018/2019, da Escola Superior de Tecnologia e Gestão do Instituto Politécnico de Leiria, Portugal, e, bem assim, à data das provas públicas que visaram a avaliação destes trabalhos.

Agradecimentos

Quero expressar meus agradecimentos, primeiramente a Deus pela minha vida e por sempre me dar força e saúde para confrontar todos os desafios.

Ao meu orientador, Professor Doutor João Pedro Cruz da Silva e minha coorientadora, Professora Doutora Ana Maria César Bastos Silva, por toda paciência e apoio durante o desenvolvimento da dissertação e partilha de conhecimento e ideias que foram importantes para a resolução das dificuldades encontradas durante o processo.

Ao Eng. Filipe Silva do Departamento de Infraestruturas e Manutenção do Município de Leiria, por disponibilizar a cartografia, os dados de tráfego e plano semaforico do cruzamento em estudo.

Aos meus amados pais, Alcides e Fátima, aos meus irmãos João Henrique e João Pedro que não deixaram de acreditar em mim em nenhum momento dessa caminhada e que, com muito carinho e apoio, não mediram esforços para que eu chegasse a essa fase da minha vida.

Aos meus amigos, pelos momentos de distração, muitas vezes essenciais, pela paciência e pela mão que sempre se estendia quando necessitava. Não poderia deixar um agradecimento especial a minha amiga Liana Ostetto por todo apoio.

A todos que de alguma forma doaram um pouco de si para que a conclusão desse trabalho se tornasse possível.

Resumo

Em domínio urbano, é expectável que grande parte dos problemas de congestionamento de tráfego ocorram ao nível das interseções. Neste contexto, a presente dissertação centra-se na utilização da microssimulação como ferramenta de avaliação e definição de estratégias de melhoramento do desempenho de uma interseção urbana sendo abordado o Largo da República em Leiria pela sua complexidade face aos níveis de tráfego que apresenta e também por se situar numa zona nobre da cidade. Para avaliação comparativa do desempenho das soluções estudadas, utilizou-se ao software de microsimulação *Aimsun* pela sua versatilidade e por ser considerada uma ferramenta fidedigna para este tipo de análises.

A pesquisa baseou-se na definição de diversos cenários de procura de tráfego associados a diferentes propostas de reformulação geométrica, designadamente (1) ajuste do plano de temporização; (2) sistema de controlo actuado e; (3) transformação da interseção numa rotunda alongada.

Em termos metodológicos, posteriormente à seleção do estudo de caso, procedeu-se à recolha de elementos existentes, a qual foi complementada pela recolha de dados adicionais *in loco*. Em seguida a interseção foi codificada e modelada, seguindo-se a calibração e validação. Posteriormente, foram estudadas algumas propostas de alteração semafórica ou geométrica para os diferentes cenários de demanda futura. Com os modelos construídos foi então possível desenvolver análises comparativas, evidenciando vantagens e limitações e o correspondente nível de desempenho global. Refira-se igualmente que a qualidade e precisão dos valores inseridos no modelo têm uma influência notória nos resultados pelo que a etapa de calibração e validação foi essencial para garantir a fiabilidade dos resultados.

O estudo permitiu quantificar um conjunto de indicadores de desempenho que potenciou a comparação direta e credível entre as várias soluções estudadas obtendo-se, deste modo, uma base sólida para a eventual tomada de decisões quanto a intervenções na infraestrutura. Em termos gerais a solução da implantação da rotunda alongada foi a que atingiu maior nível de desempenho em termos de fluidez e capacidade, sendo ainda expectável tratar-se da solução globalmente mais competitiva considerando a totalidade dos custos nomeadamente nas vertentes de segurança rodoviária, implementação da solução, conservação e manutenção.

Palavras-chave: Microssimulação, desempenho de interseções, Aimsun.

Abstract

In urban areas, it is expected that most traffic congestion problems will occur in intersections. In this context, the present dissertation focuses on the use of microsimulation as a tool for evaluation and definition of strategies to improve the performance of an urban intersection. The Largo da República in Leiria was used because of its complexity in terms of traffic levels and due to its location in a prime area of the city. The Aimsun microsimulation software was used for the comparative evaluation of the performance of the solutions due to its versatility and for while being considered a reliable tool.

The research was based on the definition of several traffic demand scenarios associated with different geometric reformulation proposals, namely (1) timing plan adjustment; (2) actuated control system and; (3) transformation of the intersection into an elongated roundabout.

In methodological terms, after the case study selection, existing data was gathered and supplemented by additional on-site data. The intersection was then coded and modeled, followed by calibration and validation. Subsequently, some proposals for semaphore or geometric alterations for the different future demand scenarios were studied. With these models it was then possible to carry on comparative analysis, showing advantages and limitations and the corresponding levels of overall performance. It should be emphasized that the quality and accuracy of the values entered in the model have a noticeable influence on the results so calibration and validation was essential to ensure the reliability of the results.

The study allowed the quantification of a set of performance indicators that enabled the direct and credible comparison between the solutions studied, thus providing a solid basis for the eventual decision making regarding infrastructure interventions. In general terms, the solution for the implementation of the elongated roundabout was the one that achieved the highest level of performance in terms of fluidity and capacity. It is still expected to be the globally most competitive solution considering all costs, namely in terms of road safety, implementation of the solution, conservation and maintenance.

Keywords: Microsimulation, intersection performance, Aimsun

Índice

ORIGINALIDADE E DIREITOS DE AUTOR	II
AGRADECIMENTOS	III
RESUMO	IV
ABSTRACT	V
ÍNDICE	VI
LISTA DE FIGURAS	IX
LISTA DE TABELAS	XI
LISTA DE SIGLAS E ACRÓNIMOS	XIII
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. Enquadramento	1
1.2. Objectivos	2
1.3. Estrutura da dissertação	3
2. AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DE INTERSEÇÕES	4
2.1. Sinais Luminosos	4
2.1.1. Semáforos de comando fixo	5
2.1.1.1. Método de Webster	6
2.1.2. Semáforo de comando actuado	9
2.1.3. Caracterização das correntes de tráfego	13
2.1.3.1. Procura	13
2.1.3.2. Partida dos veículos	13
2.1.3.3. Estimativa do débito de saturação	14
2.1.4. Indicadores de desempenho	17
2.2. Avaliação da Capacidades em Rotundas	18
2.2.1. Introdução	18
2.2.2. Os Modelos empíricos – Modelo do TRL	18
2.2.3. Modelos probabilísticos	20
2.3. Técnicas de Simulação de tráfego	21
2.3.1. Introdução	21
2.3.2. Tipologias de Modelos de simulação de tráfego	22
2.3.3. Aplicabilidade	24
2.3.4. Vantagens e desvantagens	25
2.3.5. Processo de Construção do modelo	26
2.3.6. O processo de Calibração e de validação do modelo	28
2.3.7. Indicadores de desempenho	31
	vi

2.3.7.1.	Demoras	32
2.3.7.2.	Fila de espera	32
2.3.7.3.	Tempo de viagem	33
2.4.	Considerações finais	34
3.	MICROSIMULADOR AIMSUN	35
3.1.	Demanda de tráfego	36
3.2.	Princípios básicos de modelos de atribuição de tráfego	36
3.3.	Modelos microscópicos comportamentais	38
3.3.1.	Lane-changing	38
3.3.2.	Gap-acceptance	40
3.3.3.	Car-following	41
3.4.	Período de carregamento da rede	43
3.5.	Considerações finais	44
4.	METODOLOGIA DE ABORDAGEM	45
4.1.	Caracterização da área em estudo	46
4.2.	Escolha do <i>Software</i>	48
4.3.	Recolha de dados e Análise de tráfego	49
4.3.1.	Características geométricas	49
4.3.2.	Contagens de tráfego	50
4.3.3.	Avaliação das filas de espera	53
4.3.4.	Evolução da procura de tráfego	55
4.3.5.	Tipologia de veículos	57
4.3.6.	Modo de Regulação – Plano de temporização	57
4.4.	Construção do modelo de simulação	60
4.4.1.	Codificação da rede	60
4.4.2.	Construção da matriz O/D	62
4.4.3.	Calibração e validação do modelo	64
4.4.3.1.	Calibração	64
4.4.3.2.	Validação	69
4.5.	Considerações Finais	71
5.	AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DE SOLUÇÕES ALTERNATIVAS	72
5.1.	Definição dos cenários de estudo	72
5.2.	Cenários de evolução da procura de tráfego	73
5.3.	Cenários relativos à tipologia de intervenção	74
5.3.1.	Cenário de referência - Situação Atual x Futuro	74
5.3.2.	Cenário 1 – Otimização do funcionamento do sistema semafórico	77
5.3.3.	Cenário 2 – Plano de regulação por comando actuado	80
5.3.4.	Cenário 3 – Implantação de uma rotunda alongada	83

5.4. Análise geral comparativa das soluções estudadas	89
6. CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS	91
BIBLIOGRAFIA	94
ANEXOS	98
ANEXO A: PROCEDIMENTO DE CONFERÊNCIA DO PLANO DE REGULAÇÃO DO CRUZAMENTO ATRAVÉS DE MÉTODO DE WEBSTER.	98

Lista de figuras

Figura 1 - Conflitos principais de movimentos direcionais incompatíveis (Costa et al., 2008)	5
Figura 2 - Exemplos de processos de fixação dinâmica da duração das fases (Costa et al., 2008)	12
Figura 3 - Exemplos de localização de sensores de comando actuado (Costa et al., 2008)	12
Figura 4 - Padrões reais e conceptuais relacionadas as partidas de veículos (Costa et al., 2008)	14
Figura 5 - Desenvolvimento do modelo de microssimulação (Autor, 2019)	27
Figura 6 - Estratégia de três etapas para calibração (Adaptado de Dowlin et al., 2004)	29
Figura 7 - Definição de zonas para mudança da via (Adaptado de Barceló & Casas, 2005)	39
Figura 8 - Modelo de representação do gap-acceptance (Adaptado de Aimsun, 2015)	40
Figura 9 - Fluxograma da metodologia adotada para a pesquisa	46
Figura 10 - Localização da área em estudo em Leiria	48
Figura 11 – Numeração dos movimentos direcionais do cruzamento em estudo	50
Figura 12- Resultados da contagem de tráfego no PPM (uvl/15min)	52
Figura 13 - Resultados da contagem de tráfego no PPT (uvl/15min)	52
Figura 14 - Valores de volume de tráfego para HPM (uvl/h)	53
Figura 15 - Valores de volume de tráfego para HPT (uvl/h)	53
Figura 16 - Indicação dos postos de contagem para obtenção dos valores de fila média de veículos	55
Figura 17 - Estimativa de demanda futura de tráfego (uvl/h) para HPM em 2028	56
Figura 18 - Estimativa de demanda futura de tráfego (uvl/h) para HPT em 2028	57
Figura 19- Semáforos do cruzamento em estudo	58
Figura 20 - Faseamento do cruzamento em estudo	59
Figura 21 - Plano de regulação de cruzamento em estudo	60
Figura 22 - Criação do plano de controle no AIMSUN	61
Figura 23 - Configuração do plano de controlo “master” no AIMSUN	62
Figura 24 - Criação dos centróides no AIMSUN	62
Figura 25 - Matriz O/D para horário de ponta da manhã (HPM) no AIMSUN	63

Figura 26 - Posto de contagem e trajeto escolhido para levantamento do tempo de viagem	70
Figura 27 - Gráfico comparativo entre cenário atual e cenários futuros (realista, pessimista, otimista) para HPM	76
Figura 28 - Gráfico comparativo entre cenário atual e cenários futuros (realista, pessimista, otimista) para HPT	76
Figura 29 - Plano de regulação a considerar um ciclo de 120 s	78
Figura 30 - Gráfico comparativo entre cenário atual e cenários 1 futuro (realista, pessimista, otimista) para HPM	79
Figura 31 - Gráfico comparativo entre cenário atual e cenários 1 futuro (realista, pessimista, otimista) para HPT	79
Figura 32 - Configuração do plano de comando actuado para a fase 1	81
Figura 33 - Gráfico comparativo entre cenário atual e cenários 2 futuros (realista, pessimista, otimista) para HPM	82
Figura 34 - Gráfico comparativo entre cenário atual e cenários 2 futuros (realista, pessimista, otimista) para HPT	82
Figura 35 - Modelo 1 de rotunda proposta para modificação.....	84
Figura 36 - Modelo 2 de rotunda proposta para modificação.....	84
Figura 37 - Gráfico comparativo entre cenário atual e cenários 3 (modelo 1) futuros (realista, pessimista, otimista) para HPM.....	86
Figura 38 - Gráfico comparativo entre cenário atual e cenários 3 (modelo 1) futuros (realista, pessimista, otimista) para HPT.....	86
Figura 39 - Gráfico comparativo entre cenário atual e cenários 3 (modelo 2) futuros (realista, pessimista, otimista) para HPM.....	87
Figura 40 - Gráfico comparativo entre cenário atual e cenários 3 (modelo 2) futuros (realista, pessimista, otimista) para HPT.....	88

Lista de tabelas

Tabela 1 - Aplicabilidade das características de estudo baseado em diversos modelos (Adaptado de Sbayti & Roden, 2010)	25
Tabela 2 - Valores da contagem de tráfego para o PPM (uvl/h) (Adaptado de Engimind, 2018).....	51
Tabela 3 - Valores da contagem de tráfego para o PPT (uvl/h) (Adaptado de Engimind, 2018)	51
Tabela 4 - Valores da contagem em campo de fila média (uvl) em cada via que chega a intersecção para HPM.....	54
Tabela 5 - Valores da contagem em campo de fila média (uvl) em cada via que chega a intersecção para HPT.....	54
Tabela 6 - Fator de crescimento e taxa de crescimento anual média (Adaptado de Engimind, 2018).....	56
Tabela 7 - Valores defaults dos parâmetros no Aimsun.....	65
Tabela 8 - Valores de fila de espera em uvl/15min contabilizados na HPM.....	66
Tabela 9 - Calibração dos valores de aceleração máxima para HPM	66
Tabela 10 - Calibração dos valores do tempo de reação para HPM.....	67
Tabela 11 - Calibração dos valores de tempo de reação (pare) para HPM	67
Tabela 12 - Calibração dos valores de tempo de reação (semáforo) na HPM.....	68
Tabela 13 - Erro percentual entre valores medidos em campo e valores obtidos através do modelo	69
Tabela 14 - Valores de tempo de viagem para o trajeto em estudo.....	70
Tabela 15 - Resultados dos indicadores de desempenho para cenário atual e futuro da HPM	75
Tabela 16 - Resultados dos indicadores de desempenho para o cenário atual e futuro da HPT	75
Tabela 17 - Resultados dos indicadores de desempenho para cenário 1 atual e futuro da HPM	78
Tabela 18 - Resultados dos indicadores de desempenho para cenário 1 atual e futuro da HPT	79
Tabela 19 - Resultados dos indicadores de desempenho para cenário 2 atual e futuro da HPM	81

Tabela 20 - Resultados dos indicadores de desempenho para cenário 2 atual e futuro da HPT	81
Tabela 21 - Resultados dos indicadores de desempenho para cenário 3 atual e futuro da HPM para o modelo 1	85
Tabela 22 -Resultados dos indicadores de desempenho para cenário 3 atual e futuro da HPT para o modelo 1	85
Tabela 23 -Resultados dos indicadores de desempenho para cenário 3 atual e futuro da HPM para o modelo 2	87
Tabela 24 -Resultados dos indicadores de desempenho para cenário 3 atual e futuro da HPT para o modelo 2	87
Tabela 25 - Valores dos indicadores de desempenho para cada alternativa de modificação e para cada cenário futuro para HPM.....	89
Tabela 26 - Valores dos indicadores de desempenho para cada alternativa de modificação e para cada cenário futuro para HPT	89

Lista de siglas e acrónimos

ITS - *Intelligent Transport System*

TRL - *Transport Road and Research Laboratory*

AIMSUN - *Advanced Interactive Microscopic Simulator for Urban and Non-urban Networks*

UPC - *Universidade Politécnic da Catalunha*

HCM - *Highway Capacity Manual*

AASHTO - *American Association of State Highway and Transportation Officials*

CORSIM - *Corridor Simulation*

NETSIN - *Network Simulation*

TRANSIMS - *Transportation Analysis Simulation System*

VISSIM - *Verkehr In Städten SIMulationsmodell*

TSS - *Transport Simulation Systems*

LIDAR - *Light Detection And Ranging*

GPS - *Global Positioning System*

PPM - *Período de Ponta da Manhã*

PPT - *Período de Ponta da Tarde*

Uvl - *Unidades de Veículos Ligeiros*

HPM - *Horário de Ponta da Manhã*

HPT - *Horário de Ponta da Tarde*

1. Introdução

1.1. Enquadramento

Ao longo do tempo, as alterações de hábitos e dos padrões de mobilidade, têm-se traduzido no aumento das necessidades de deslocação e da procura de transportes de pessoas e cargas, consubstanciada no aumento dos fluxos de tráfego motorizado, como consequência da dispersão urbana e do tendencial afastamento das zonas residenciais das zonas centrais e de negócio.

Sabe-se que um dos maiores problemas de trânsito está relacionado com a insuficiência da capacidade das vias para atender à procura de tráfego, pelo que o planeamento do sistema viário por parte dos gestores públicos, baseado na implantação dos sistemas inteligentes de transportes (ITS), têm-se tornado uma das medidas corretivas mais eficientes para mitigar esse problema.

Entretanto, é necessário que esses investimentos na infraestrutura sejam, cada vez mais fundamentados, já que justificam um volume considerável da despesa pública. Baseado neste contexto, a modelação por microsimulação de tráfego tem-se constituído uma ferramenta computacional essencial para a avaliação do funcionamento de redes viárias complexas, apoiando a elaboração de novas estratégias e de políticas de mobilidade urbana.

Os modelos de simulação microscópica representam, em meio virtual, os movimentos individuais de cada veículo, cuja caracterização é baseada num conjunto de parâmetros como dimensão do veículo, aceleração máxima, tempo de reação, etc. (Karioti, Basbas, Mintsis, Mintsis, & Taxiltaris, 2017). Dada a grande variedade de características de movimento dos veículos e condições da via que podem ser simuladas, as técnicas de microsimulação oferecem uma descrição detalhada e possibilitam a análise das condições de funcionamento dos diversos elementos infraestruturais, para diferentes períodos temporais.

Atualmente, o mercado oferece diversos modelos de simulação, os quais disponibilizam um conjunto alargado e variado de potencialidades. Importa, contudo, ter noção que a capacidade para um determinado modelo reproduzir, com elevado nível de confiança, uma determinada realidade, depende da adequação dos parâmetros de calibração adoptados. Apesar da crescente utilização deste tipo de técnica para análise de tráfego, permanece uma carência de estudos aprofundados sobre a avaliação do impacto dos erros de calibração, da

relevância de cada parâmetro, bem como sobre a adequação dos valores a atribuir a cada parâmetro de calibração (Dowling, Skabardonis, & Alexiadis, 2004).

Como complemento à calibração, é ainda reconhecida a necessidade e importância da etapa da validação do modelo, etapa a qual objetiva ratificar os resultados e garantir que o modelo forneça dados fiáveis e próximos dos reais, de forma a salvaguardar uma gestão eficiente da rede.

1.2. Objectivos

Nesta linha de ação, esta dissertação centra-se na avaliação das condições de funcionamento de uma intersecção complexa situada na cidade de Leiria, recorrendo à aplicação de técnicas de microsimulação e tendo por base dados recolhidos in loco, a relacionar, as precisões dos resultados baseados nos *inputs* dos parâmetros com o desempenho do modelo de simulação de tráfego.

Como forma de alcançar esse objectivo geral, implica que sejam atingidos os seguintes objectivos específicos:

- Efetuar uma revisão da literatura acerca da avaliação do desempenho operacional de interseções urbanas, mediante a utilização do *software* de microsimulação Aimsun, além de esclarecer conceitos sobre métodos de cálculo para rotundas e sinais luminosos;
- Definir uma metodologia de trabalho que permita caracterizar e avaliar o desempenho da intersecção em estudo;
- Obter e compilar dados de tráfego disponibilizados por entidades oficiais, complementados pelo levantamento exaustivo dos dados de campo;
- Desenvolver e validar o modelo aplicado a uma intersecção real, sendo esta, presente na cidade de Leiria, como forma de avaliar os parâmetros e variáveis mais relevantes;
- Por fim, modelar os cenários propostos e efectuar uma análise comparativa entre os resultados obtidos para a situação atual e para outros cenários associados à evolução previsível da procura de tráfego futura.

1.3. Estrutura da dissertação

Para além deste primeiro capítulo que introduz a dissertação através do enquadramento do problema, os parágrafos seguintes apresentam uma breve descrição do conteúdo presente em cada capítulo.

No capítulo 2 é realizada uma breve revisão do estado da arte, apresentando-se o método de Webster para definição do plano de regulação e de temporização e o método de TRL (*Transport Road and Research Laboratory*) para cálculo e análise de desempenho de interseção e rotundas. Para além disso, apresentam-se as características da técnica de microsimulação, tais como: tipologias, aplicabilidade, vantagens e desvantagens, processo de modelação e indicadores de desempenho dando-se particular destaque às etapas de calibração e de validação.

No capítulo 3 são apresentados os princípios fundamentais do *software* de simulação AIMSUN, apresentando-se a metodologia de desenvolvimento do modelo e os modelos microscópicos comportamentais nele existente.

O desenvolvimento de um modelo de referência é o enfoque do capítulo 4. Neste capítulo descrevem-se as etapas para desenvolver o modelo para o cenário atual e futuro da interseção em estudo, com a representação de cada etapa, a fim de expor todos os esquemas das ações realizadas, bem como os parâmetros necessários para calibração e validação do estudo piloto.

No capítulo 5 apresentam-se os resultados das propostas alternativas estudadas para a interseção, tal como os resultados da análise comparativa das mesmas, citando as vantagens e limitações associadas a cada alternativa.

No sexto e último capítulo são apresentadas as conclusões acerca do trabalho desenvolvido, com recomendações de temas para futuros trabalhos relacionados com a aplicação de técnicas de simulação, aplicada ao gerenciamento de tráfego.

2. Avaliação do desempenho de interseções

Este capítulo apresenta uma revisão bibliográfica centrada nas metodologias de cálculo de capacidades aplicadas a cruzamentos regulados por sinais luminosos e a rotundas. Para além dos modelos tradicionais de Webster e do TRL, são ainda apresentadas as técnicas de simulação de tráfego as quais permitem avaliar o desempenho de interseções complexas inseridas numa área de intervenção alargada. É ainda apresentada a origem e a evolução dos microsimuladores, as suas principais vantagens e desvantagens, as suas características, domínio de aplicabilidade e as diferentes etapas para construção do modelo.

2.1. Sinais Luminosos

O crescente volume de tráfego presente nas cidades, tem inviabilizado, ou pelo menos evidenciado a inadequação da utilização de métodos simples e tradicionais para gestão de cruzamentos. Como medida de gerenciamento do volume de tráfego, a sinalização luminosa é capaz de controlar essa demanda recorrendo a alternativas de baixo custo associados à sua instalação e manutenção, quando comparado às alternativas de intervenção a nível de alteração geométrica.

A regulação dos sinais luminosos, segundo Costa *et al.* (2008), baseia-se em definir a duração de atravessamento de cada corrente de tráfego. Quanto ao procedimento adotado para configuração desse plano, é necessário que se determine a quantidade, as correntes e sequência que os utentes podem prosseguir em cada fase. Entretanto, deve-se atentar para que o número de fases seja o menor possível, a fim de reduzir os tempos perdidos entre mudança de fases, e de facilitar a compreensão do plano por parte dos utentes (Costa *et al.*, 2008).

Quanto à atribuição das correntes, conforme Costa *et al.* (2008), é recomendado que a interação entre veículos e peões seja conciliável de tal forma que a probabilidade de ocorrer um ponto de conflito entre eles se torne mínima e mantendo, em simultâneo as demoras em níveis aceitáveis.

A fim de reduzir o grau de perigosidade nas interseções, existem dois tipos de conflitos principais entre os movimentos direcionais que se deve ter atenção ao desenvolver um plano de regulação, os conflitos primários e secundários. Conforme Costa *et al.* (2008), os conflitos

primários, são considerados inaceitáveis em qualquer situação devido ao alto grau de periculosidade. Entretanto, os conflitos secundários são aceitáveis em certos graus de periculosidade associados aos níveis e carga de tráfego. A figura 1 demonstra os conflitos principais o qual um cruzamento está sujeito.

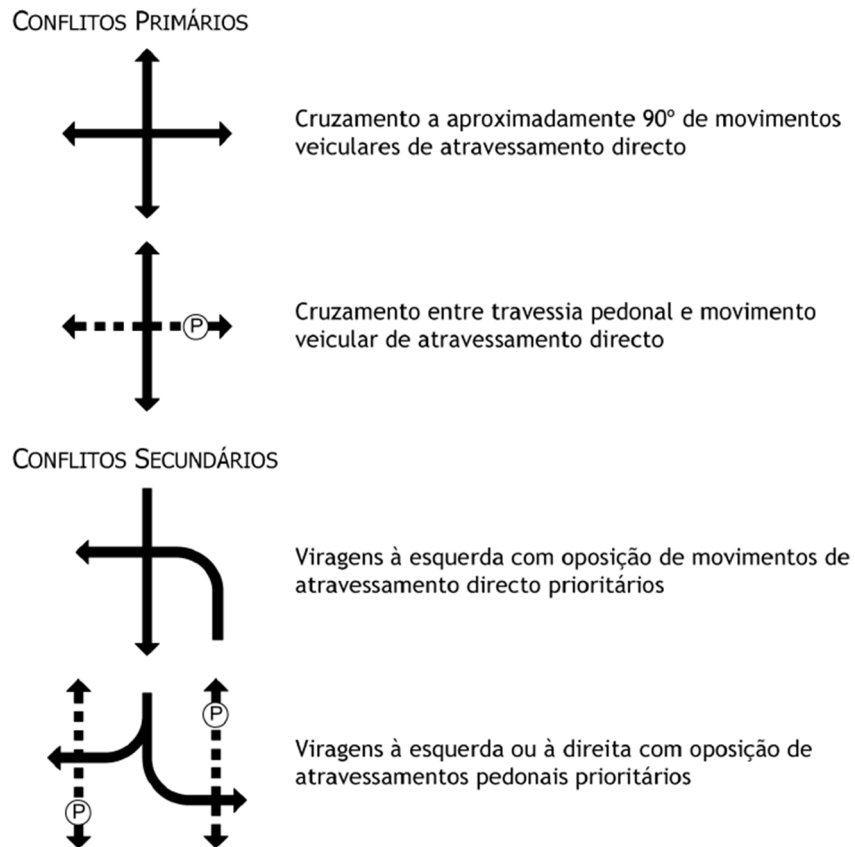


Figura 1 - Conflitos principais de movimentos direccionais incompatíveis (Costa et al., 2008)

2.1.1. Semáforos de comando fixo

A maioria dos controladores de tráfego são os de tempo fixo. Atualmente, as metrópoles recorrem cada vez mais a controladores actuados como forma de permitir ajustar a oferta à variabilidade da procura, minimizando demoras globais. Sendo ele ajustado dinamicamente às flutuações de tráfego presentes no cruzamento (Rego & Semente, 2017).

Os semáforos com comando fixo transmitem sempre o mesmo intervalo de tempo, isto é, são autônomos quanto a variações do fluxo relacionadas ao longo do tempo. Para a determinação do ciclo deste tipo de semáforo, são tidos em consideração os fluxos de tráfego registados em períodos de maior procura, o que se traduz no sobredimensionamento dos períodos fora

da hora de ponta, o que se pode traduzir em demoras adicionais e indesejáveis (Costa et al., 2008).

A determinação do plano de regulação de comando fixo dos semáforos é um processo que permite que as variadas correntes de tráfego prossigam seus movimentos em tempos diferenciados e pré-determinados. Para tal, segundo Costa *et al.* (2008) é necessário que se estabeleçam critérios de otimização para os modelos simples de cálculo, sendo o mais usual a minimização do atraso total, representado pelo comprimento médio da fila de espera.

A modo mais tradicional de se criar um plano de regulação semafórica é pelo método de *Webster*, o qual se encontra melhor explicado nos parágrafos subsequentes.

2.1.1.1. Método de Webster

Como metodologia de cálculo para um plano de semaforização, *Webster* desenvolveu um meio simples e acessível de cálculo. De acordo com Costa *et al.* (2008), o método inicia-se com a recolha de informações da corrente de tráfego em cada via de acesso e seus respectivos movimentos direcionais. A partir do levantamento dessas informações é possível que se obtenha o valor do índice de carga da corrente de tráfego, conforme se observa na expressão (1).

$$y_i = \max\left(\frac{q_{ij}}{s_{ij}}\right) = \max(y_{cj}) \quad (1)$$

Onde, y_i é o índice de carga da fase i ;

y_{cj} é o índice de carga da corrente de tráfego j ;

q_{ij} é o débito de chegadas da corrente de tráfego j que avança na fase i ;

s_{ij} é o débito de saturação da corrente de tráfego j que avança na fase i .

Quando uma mesma corrente de tráfego prosseguir em mais de uma fase, o reconhecimento das correntes torna-se mais complexa, o que em alguns casos pode interferir nos resultados do método (Costa et al., 2008).

Definido o valor do índice de carga de cada fase, pode-se obter o valor do índice de carga do cruzamento, conforme a expressão 2.

$$Y = \sum y_i \quad (2)$$

De acordo com Costa *et al.* (2008), é necessário que se verifique a relação onde o valor total da carga obtida do cruzamento deve ser inferior ao valor máximo admissível, que se obtém através da expressão 3.

$$y_{m\acute{a}x} = 0,95x \left(\frac{C_{m\acute{a}x} - T}{C_{m\acute{a}x}} \right) \quad (3)$$

Onde, $C_{m\acute{a}x}$ é a duração máxima admissível estipulada para o ciclo (s);

T é o tempo perdido (s);

Para o cálculo do valor do tempo perdido (T) deve-se utilizar a expressão 4.

$$T = nx(tp_i + ver_i) \quad (4)$$

Onde, n é o número de fases do ciclo (s);

tp_i é o tempo perdido por fase (s);

ver_i é o vermelho integral dados pelo tempo de limpeza (s);

Os tempos limpeza são designados para garantir que os movimentos sejam executados sem o risco de colisão entre os veículos que iniciam e terminam o movimento, de forma que esse tempo equivale ao tempo de vermelho comum aos dois movimentos.

Para o cálculo do tempo de limpeza é necessário achar o ponto de conflito de cada movimento presente em cada fase e aplicar a expressão seguinte:

$$t_{l(ij)} = \left(\frac{d_i + L}{v_i} - \frac{d_j}{v_j} \right) \quad (5)$$

Onde, d_i é a distância entre a linha de parada do movimento que termina e o ponto crítico;

d_j é a distância entre a linha de parada do movimento que começa e o ponto crítico;

L é o comprimento médio do veículo (usualmente utiliza-se 5m);

v_i é a velocidade média do veículo que termina o movimento (assume-se 15m/s para movimentos diretos e 10m/s para movimentos com viragens);

v_j é a velocidade média do veículo que inicia o movimento (geralmente utiliza-se 10m/s);

A etapa seguinte é calcular a capacidade e grau de saturação do cruzamento através das expressões 6 e 7.

$$Q = s \cdot \frac{g}{C} \quad (6)$$

$$x = \frac{q}{Q} \quad (7)$$

Onde, Q é a capacidade (veí/h);

s é o débito de saturação (veí/h);

g é o tempo de verde útil (s);

C é a duração do ciclo (s);

x é o grau de saturação;

q é a procura (veí/h);

De forma a reduzir as demoras sofridas pelos condutores defini-se valores de ciclo mínimo, máximo e óptimo. Segundo Costa *et al.* (2008), considera-se habitualmente um intervalo entre 30 e 120 segundos como valores limites de ciclo mínimo e máximo.

Para se obter os valores dos ciclos se utiliza as expressões 8 e 9.

$$C_{min} = \frac{T}{1-Y} \quad (8)$$

$$C_{opt} = \frac{1,5.T+5}{1-Y} \quad (9)$$

Onde, C_{min} é o ciclo mínimo (s);

T é o tempo perdido (s);

Y é o índice de carga do cruzamento;

$C_{\text{ópt}}$ é o ciclo óptimo (s);

Por fim, realiza-se a repartição do tempo de verde para cada fase do ciclo considerando que ocorre uma equivalência de tempo de verde útil e índices de carga, esse valor pode ser calculado através da expressão 10.

$$g_i = \frac{C-T}{y_i} \quad (10)$$

Onde, g_i é o tempo de verde útil da fase (s);

C é a duração do ciclo (s);

T é o tempo perdido por ciclo;

y_i é o índice de carga da fase i .

2.1.2. Semáforo de comando actuado

O sinal luminoso de comando actuado é uma alternativa de gerir o fluxo de tráfego em intersecção com respostas em tempo real, sendo suas possibilidades de gestão mais abrangentes quando comparados com o sinal luminoso de comando fixo.

Quando se verificam alterações consideráveis na demanda de tráfego num cruzamento ao longo do tempo, esta solução torna-se eficaz uma vez que permite responder em tempo real de forma a garantir uma otimização dos tempos.

Tratando-se de estratégias para o sinal luminoso, a utilização do comando actuado permite que se apliquem diversas soluções, podendo estas ser mais simples ou de complexidade elevada, conforme se expõe de seguida (Costa et al., 2008):

- Variação, em tempo real, da duração das fases dependendo do nível momentâneo da procura;
- Aplicação de estratégias anti-bloqueio no próprio cruzamento, ou cruzamentos adjacentes ou ao nível da rede, por meio do controlo de fluxos e detecção de incidentes;
- Defesa de segurança e minimização das demoras dos peões, tal qual a redução das demoras impostas por meio de uma monitorização mais justa quanto a movimentação dos peões;

- Controlo das velocidades dos veículos através da monitorização em tempo real;
- Atribuição de prioridade a veículos de emergência ou transporte colectivos a contar com a sua identificação em tempo real;
- Soluções de redução dos congestionamentos através do controlo de fluxo;
- Variação dinâmica da prioridade a cerca de cada movimento da corrente de tráfego rodoviário ou pedonal em função da preferência de cada momento.

Dependendo da quantidade de informações que o detector fornece, pode-se optar em aplicar um plano de regulação “semi-actuado” ou “actuado”.

Os controles semi-actuado, no geral, são aplicados em interseções entre vias com grande fluxo de veículos (via principal) e vias de baixo volume de tráfego (vias secundárias) (DENATRAN, 1984). Essa metodologia garante que o sinal verde seja contínuo para os veículos da via principal, até o momento em que o detector detecte a presença de veículos nas vias secundárias.

O monitoramento da demanda de tráfego pelos controles actuados são pautados no princípio da determinação do tempo de verde relacionado a cada estágio da sinalização, sendo este variado entre um valor mínimo e máximo pré-estabelecidos. Esse tipo de controlador, segundo DENATRAN (1984), possui um detector para identificar a passagem de um veículo, inserido entre 10 a 50m da linha de paragem. Dessa forma, quando o intervalo de tempo for superior a um valor pré-definido, sem que o detector indique a passagem de veículos, considera-se que não existe procura de tráfego nesse ramo e assim ocorre a mudança de estágio.

Contudo, sabe-se que em relação à capacidade global, o comando actuado não possui diferenças significativas face a soluções a tempos fixos, pois a lógica utilizada para definir os tempos actuados prevêem quase sempre os tempos máximos pré-definidos (Costa et al., 2008).

Sendo assim, a implantação dessa estratégia de variação em tempo real exige, conforme Costa et al. (2008), que sejam instalados sensores, em determinado local próximo da interseção, com a função de detectar a passagem de veículos nas diferentes correntes de tráfego. Após o levantamento dos níveis e características da procura é definido em tempo real a duração da fase. A lógica da variação de duração da fase em relação ao nível de procura considera um tempo mínimo (t_{min}), tempo máximo (t_{max}) e uma lógica e intervalo de extensão (ext).

Como primeira consideração, o tempo mínimo de verde (8 a 10 segundos), apresenta-se para reduzir o impacto negativo que situações como instabilidade no arranque das correntes de tráfego acabam por acarretar, ou ainda, pode estar dependente da localização, em relação à barra de paragem, em que está instalado o sensor. No entanto, o tempo máximo que descreve a duração máxima possível para a fase, é definido a partir dos níveis máximos esperados no cruzamento durante o período de ponta e a partir de um dimensionamento de um plano de tempos fixos. Este parâmetro garante que no decorrer dos períodos mais exigentes de procura não se verifiquem extensões sucessivas e infinitas da fase o que poderia originar demoras excessivas e congestionamentos nas fases subsequentes (Costa et al., 2008).

A duração de fase de cada ciclo é baseada na identificação dos períodos de quebra de continuidade dos pelotões das correntes de tráfego, indicadores de quebras significativas dos débitos de chegada ao cruzamento (Costa et al., 2008). Observa-se o esquema simplificado na figura 2.

Dessa forma, define-se um valor como referência, conhecido como intervalo de extensão, para os intervalos de tempos entre veículos sucessivos que depende, além da composição da corrente de tráfego, das características geométricas do cruzamento, adoptando-se frequentemente um valor entre 2 e 5 segundos (Costa et al., 2008).

Partindo do momento ($t_{min-ext}$) presente na fase, esse valor de referência é comparado com os intervalos de tempo entre veículos continuamente detetados pelo sensor, ocorrendo o fim da fase quando for verificado que o ext foi excedido. Caso não ocorra esse excesso de ext até se alcançar o ($t_{máx}$), a fase será interrompida quando atingir esse tempo (Costa et al., 2008).

Segundo Costa *et al.* (2008), em Portugal a solução mais comum tem sido a utilização de apenas um sensor para registrar a passagem dos veículos, normalmente colocados a 3m da linha de paragem. Entretanto, a sequência de dois sensores ao longo do trajecto de aproximação da linha de paragem, é uma outra tipologia muito utilizada em outros países, que torna mais eficiente a redução das demoras. A partir dessa locação se garante que o sensor D2 detecte o intervalo superior a (ext) e inicie o procedimento de fecho do semáforo, a fim de assegurar uma distância segura de parada, conforme se observa na figura 3.

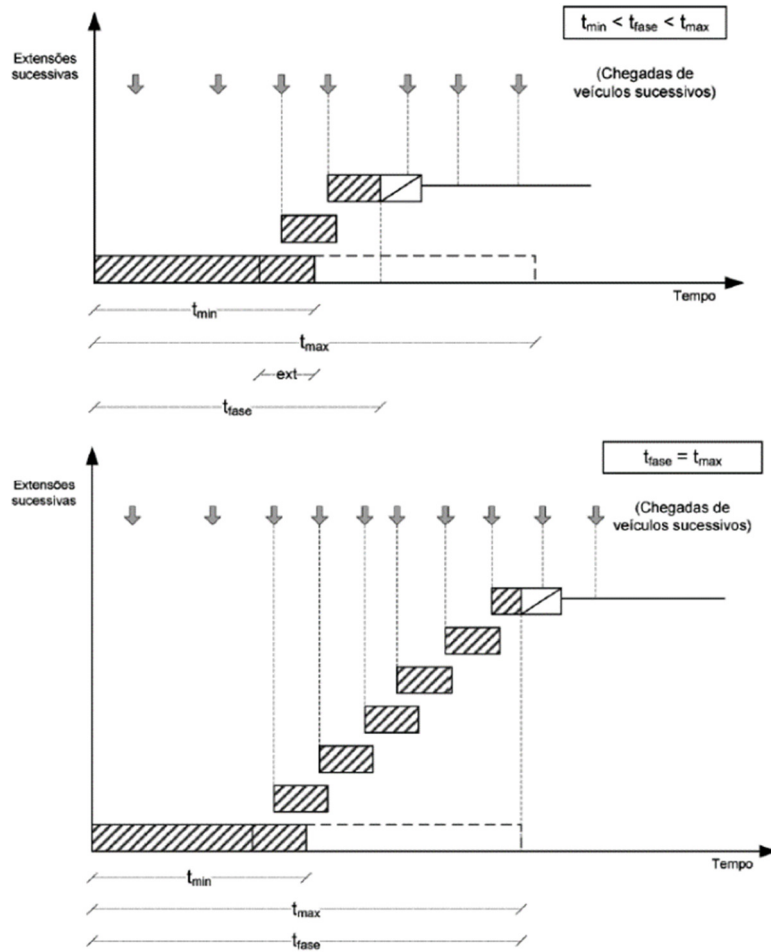


Figura 2 - Exemplos de processos de fixação dinâmica da duração das fases (Costa et al., 2008)

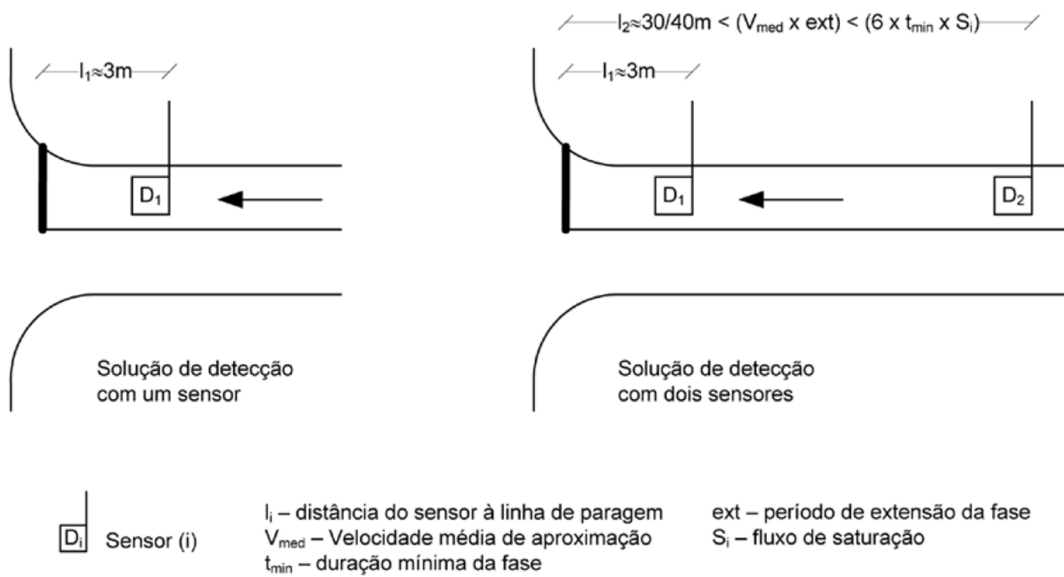


Figura 3 - Exemplos de localização de sensores de comando actuado (Costa et al., 2008)

2.1.3. Caracterização das correntes de tráfego

Sabe-se que os planos de temporização semafórica assumem uma grande influência no controlo e gestão de tráfego de uma interseção, pelo que a sua definição se torna essencial para atingir o melhor desempenho do cruzamento.

2.1.3.1. Procura

Baseando-se nas contagens de campo foi possível obter o volume dos veículos referentes a cada corrente de tráfego que atravessa o cruzamento. Para efeitos de dimensionamento, é habitual considerar os fluxos relativos ao período de ponta (15 minutos) mais exigente do cruzamento, pelo que se revela necessário realizar contagens por um período mais alargado (mínimo de 90 minutos), preferencialmente 120 minutos, e se necessário agregar registos a cada 15 minutos (Costa et al., 2008).

2.1.3.2. Partida dos veículos

As partidas dos veículos são consideradas constantes durante o tempo de verde e amarelo, exceto no período inicial e final, conforme figura 4. Na fase inicial o ritmo de partida é lento, devido ao tempo de reação ao arranque, mas à medida que o tempo verde decorre o intervalo entre veículos é reduzido até estabilizar em um valor mínimo. Este fluxo máximo de passagem veicular identifica-se como débito de saturação. O aparecimento do sinal amarelo acarreta a diminuição do fluxo de partidas até este se anular (Costa et al., 2008).

A quantidade máxima de veículos que podem partir durante um ciclo é dada pela área representada na figura 4, a qual possui seu valor resultante do produto de $g \times s$, onde s é o débito de partidas.

No geral o débito de saturação é obtido por via e seus valores podem ser adquiridos por medições em campo ou por modelos de estimação.

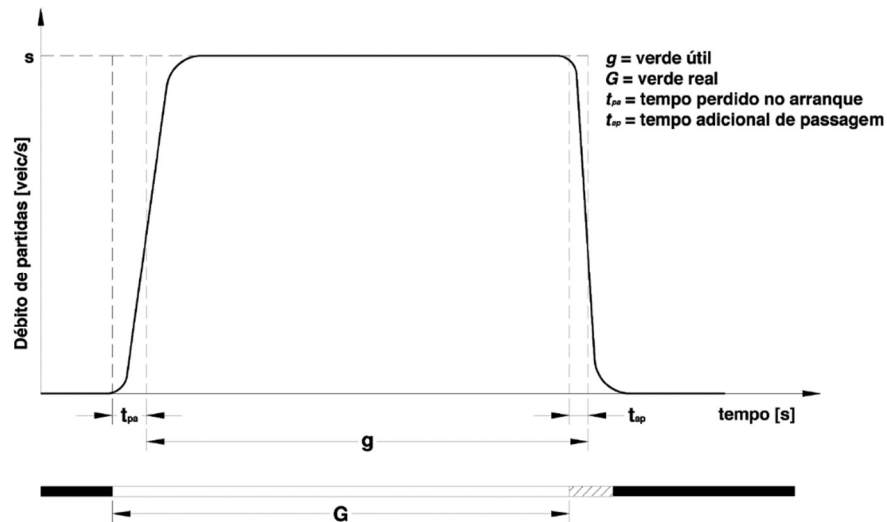


Figura 4 - Padrões reais e conceptuais relacionadas as partidas de veículos (Costa et al., 2008)

2.1.3.3. Estimativa do débito de saturação

No que se refere a estimação do débito de saturação, os modelos devem reproduzir tanto quanto possível as partidas de veículos, as quais são relacionadas a diversos conjuntos de características geométricas e condições de circulação que torna inviável a medição de todas elas. Sendo assim necessário selecionar os fatores mais relevantes referentes às partidas dos veículos (Costa et al., 2008).

A estimativa é realizada para cada via em questão, caso mais de uma via seja ocupada pela corrente de tráfego, deve-se efetuar a soma de saturação das duas vias. O modelo em questão considera um valor possível para determinada configuração geométrica e de circulação, as quais caso não sejam satisfeitas, serão corrigidas com fatores de ajustes (Costa et al., 2008).

Conforme Costa et al.(2008), o valor de débito de saturação é baseado em 1900 unidades de veículos ligeiros por hora (uvl/h), caso sejam asseguradas as condições seguintes:

- Via exclusiva para movimentos em frente sem oposição;
- Corrente de tráfego constituída apenas por veículos ligeiros;
- Largura da via igual a 3,3 m numa extensão que garanta uma permanente partida de veículos;
- Perfil longitudinal da via em patamar;
- Localização do cruzamento em zona de características médias e via afastada do passeio.

Nos casos de correntes de tráfego sem oposição em via exclusiva, o processo para obter o débito de saturação é apresentado através da sequência de cálculo abaixo (Costa et al., 2008):

$$s = 1900 \times f_w \times f_i \times f_z \times f_p \times f_t \times f_d \quad (11)$$

Onde, f_w é o fator de ajustamento devido à largura da via;

f_i é o fator de ajustamento devido ao declive da via;

f_z é o fator de ajustamento devido à localização do cruzamento;

f_p é o fator de ajustamento devido à localização da via;

f_t é o fator de ajustamento devido à composição da corrente de tráfego;

f_d é o fator de ajustamento devido à mudança de direção.

A largura da via (w) é umas das características geométricas que mais influenciam na partida dos veículos. Caso as vias possuam menos de 3,3 m ocorre uma diminuição do débito, enquanto para vias com mais de 3,3 m de largura se verifica um aumento no débito, logo esse fator pode ser obtido pelas expressões:

$$f_w = \begin{cases} 0,105w + 0,653 \\ 0,053w + 0,826 \end{cases} \quad (12)$$

O perfil longitudinal possui influência positiva ou negativa, conforme a via esteja subindo ou descendo, calculada através da expressão:

$$f_w = 1 - 2i \quad (13)$$

Onde, i é o declive da via, negativo na descida e positivo na subida (em decimal)

A localização do cruzamento é um fator que influencia diretamente o débito de saturação, já que alguns fatores podem dificultar a partida dos veículos, entre outros, a interferência dos peões, manobras de estacionamento, visibilidade, entrada e saídas de passageiros dos autocarros ou táxis, etc. Sabe-se da dificuldade em isolar esse factores, dessa forma se determina o seu efeito em conjunto se baseando na classificação seguinte para se encontrar o valor de f_z .

- Classe A/ $f_z=1,1$ – Representa uma zona residencial ou suburbana, onde se têm uma boa visibilidade, sendo nulas ou reduzidas as restrições à realização de manobras dos

condutores provocadas pela presença de peões, rotatividade de estacionamento ou paragens de autocarros;

- Classe B/ $f_z=1,0$ – Corresponde a um zoneamento com características médias, onde as perturbações à partida de veículos são moderadas;
- Classe C/ $f_z=0,9$ – Representam as zonas centrais em que possui um elevado volume de peões, além das múltiplas manobras de estacionamento, paragens para entrada e saída de passageiros, bem como para as operações de carga e descarga, as quais possuem um efeito sensível no escoamento do tráfego.

Com relação ao ajuste devido a localização da via, o fator ($f_p=0,95$) é utilizado em vias junto ao lancil, para as demais se considera ($f_p=1,0$).

A composição do tráfego deve ser ajustada conforme sua equivalência de classe de veículos, com isso, o factor de ajuste f_t é dado pela seguinte expressão:

$$f_t = \frac{1}{\sum p_i + \sum p_i x E_i} \quad (14)$$

Onde, p_i é a proporção de veículos da classe i (excepto veículos ligeiros);

E_i é o coeficiente de equivalência dos veículos de classe i (excepto ligeiros).

Segundo Costa *et al.* (2008), os coeficientes a adotar são:

Veículo comercial médio 1,5
Veículo comercial pesado 2,3
Autocarro 2,0
Veículo de duas rodas com motor 0,4
Bicicleta 0,2

Quanto ao fator relacionado a mudança de direção, os veículos executam a mudança de direção com velocidades reduzidas, sendo esta redução representada pelo factor de ajuste f_d , o qual é obtido pela expressão:

$$f_t = \frac{1}{1 + \frac{1,5}{r}} \quad (15)$$

Onde, r é o raio da curva descrita pelo veículo na manobra de viragem (m).

Para casos em que a corrente de tráfego é sem oposição em via partilhada, sendo elas partilhadas por dois ou mais movimentos, os débitos de saturação são obtidos a partir do

intervalo médio entre veículos sucessivos da corrente de tráfego, sendo estes dados pela média ponderada pelas respectivas proporções, dos valores médios dos intervalos entre veículos sucessivos dos movimentos que ocupam essa via, esse valor é obtido através da expressão 16.

$$s = \frac{\sum p_i}{\sum s_i} \quad (16)$$

Onde, s_i é o débito de saturação i ;

p_i é a proporção de movimento i .

Portanto, deve-se encontrar os valores de débito de saturação para cada movimento da corrente de tráfego, e posteriormente se obter o débito de saturação do conjunto de movimentos.

2.1.4. Indicadores de desempenho

A avaliação do desempenho de cruzamentos semaforizados revela-se extremamente relevante, face ao carácter dinâmico estocástico do trânsito urbano.

Conta-se com diversos indicadores de desempenho que podem ser utilizados para avaliar a operacionalidade e a segurança da solução em análise, de entre as quais as mais comuns são número de paragens, demoras, tempos de percurso, fila máxima, velocidade média, consumo de combustíveis, emissão de poluentes e custos (CONTRAN, 2014). Algumas dessas medidas só podem ser estimadas apenas por recurso a modelos de simulação, enquanto outras medidas como número de paragens e fila máxima podem ser igualmente estimadas recorrendo a modelos tradicionais.

O indicador de fila máxima é uma das medidas mais utilizadas, designadamente para apoiar os trabalhos de calibração e de validação, dada a facilidade de ser medido no campo, e define-se como o número total de veículos que chegam durante o tempo que não pode haver partidas (Costa et al., 2008).

O número de paragens é outro indicador de qualidade de desempenho da rede, o qual é caracterizado pelo número total de paragens, ou percentagem de veículos que param devido à sinalização semafórica (CONTRAN, 2014).

2.2. Avaliação da Capacidades em Rotundas

2.2.1. Introdução

A capacidade é uma medida definida como o “*máximo fluxo horário com que pessoas ou veículos conseguem atravessar uma secção de uma via ou estrada durante um determinado período de tempo sob as condições geométricas, de tráfego e de operação prevalentes*” (FHWA, 2000). No contexto de uma rotunda, a capacidade pode ser calculada ao nível do ramo de entrada ou desagregada ao nível da via. A previsão da capacidade de uma rotunda, à semelhança de qualquer outro tipo de intersecção, pode ser efetuada recorrendo a modelos que se enquadram em três grandes grupos: empíricos, probabilísticos e de simulação. Os dois primeiros tipos são os mais utilizados pela comunidade técnica e são o objeto deste artigo. Por sua vez, os modelos de simulação têm vindo a ganhar nos últimos anos uma progressiva aceitação por parte da comunidade técnica e científica. Impõem, contudo, um processo não trivial de calibração e de validação pelo que o seu domínio de aplicação se cinge essencialmente a redes, a interseções complexas ou a problemas que envolvam a presença de diversos utilizadores ou modos de transporte.

2.2.2. Os Modelos empíricos – Modelo do TRL

Os modelos empíricos baseiam-se na reconstituição da curva fluxo - capacidade por recurso a observações efetuadas em períodos de saturação de ramos de rotundas com características geométricas diferenciadas. A abordagem estatística consiste na medição de um conjunto de variáveis eventualmente explicativas e na análise das inter-relações entre elas e com a variável a explicar. Desde a década de 70 têm sido desenvolvidos vários modelos deste tipo, principalmente na Europa e na Austrália, apresentando genericamente a capacidade de uma entrada como função do tráfego conflituante e das principais características geométricas da rotunda.

Nesta categoria, destaca-se o modelo linear do Transportation Research Laboratory (TRL) (Kimber, 1980). Foi desenvolvido no Reino Unido, no fim dos anos 70, na sequência da identificação de um conjunto de limitações dos modelos alternativos, baseados na teoria de gap-acceptance (apresentados na próxima secção). Especificamente, criticava-se a falta de interação entre os parâmetros geométricos da rotunda e o comportamento do condutor. Nesse sentido foi solicitado ao Transport and Road Research Laboratory (TRRL, agora TRL) o

desenvolvimento de um modelo estatístico baseado na geometria da rotunda e no tráfego conflituante. Para o efeito foi obtida uma base de dados com observações de campo (86 rotundas reais e 35 geometrias em circuito de testes, correspondendo a 11000 minutos de observações) a partir da qual foi possível identificar seis variáveis, relacionadas com a geometria, independentes e estatisticamente significativas: largura da entrada (e), largura da via na aproximação à rotunda (v), comprimento efetivo do leque (l), raio da entrada (r), ângulo de entrada (ϕ) e diâmetro do círculo inscrito (D).

A formulação para a previsão da capacidade é uma função linear dependente do fluxo total que atravessa a entrada e dos coeficientes K , F e f_c . A capacidade obtida para um fluxo conflituante nulo é designada por capacidade geométrica (por omissão são utilizadas as unidades fundamentais SI):

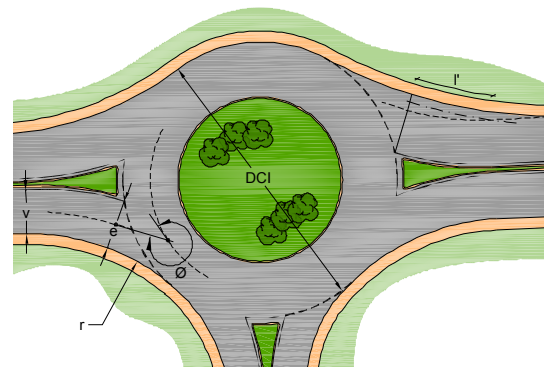
$$f_w C = \max[K(F - f_c \cdot q_c); 0] \quad (17)$$

Onde, C é a capacidade da entrada (UVE/h);

q_c é o fluxo conflituante (UVE/h).

Tanto a capacidade C como o fluxo conflituante q_c são expressos em unidades de veículos equivalentes por hora (UVE/h). Os parâmetros K , F e f_c dependem da geometria da rotunda e são dados pelo seguinte conjunto de expressões:

$$\begin{aligned} S &= 1.6(e-v)/l \\ K &= 1 - 0.00347(\phi - 30) - 0.978(1/r - 0.05) \\ X_2 &= v + (e-v)/(1+2S) \\ F &= 303X_2 \\ t_p &= 1 + 0.5/(1+M) \\ M &= \exp[(D-60)/10] \\ f_c &= 0.21t_p(1+0.2X_2) \end{aligned}$$



Onde, e é a largura efetiva da entrada;

v é a largura da via de aproximação;

l é o comprimento efetivo do leque;

r é o raio de entrada no ponto de menor curvatura;

ϕ é o ângulo da entrada (°);

D é o diâmetro do círculo inscrito.

Os parâmetros com mais relevância na explicação da capacidade são a largura da via de aproximação, a largura da entrada e o comprimento efetivo do leque, pelo facto de indicarem, de forma indireta, o número de veículos que podem parar junto à linha de cedência de prioridade e entrar no anel de circulação quando surgir um intervalo aceitável na corrente prioritária. Os restantes parâmetros - raio de entrada, ângulo de entrada e diâmetro do círculo inscrito - têm uma contribuição relativamente modesta: o acréscimo no raio de entrada facilita essencialmente as viragens à direita; a diminuição no ângulo de entrada diminui a severidade de um eventual acidente devido à harmonização das velocidades (em grandeza e direção) entre os veículos que entram e os conflituantes; finalmente, o aumento no diâmetro da rotunda tem dois efeitos que resultam num saldo ligeiramente positivo: por um lado, as entradas são facilitadas já que aumenta o espaçamento entre veículos conflituantes; por outro lado, a velocidade destes aumenta diminuindo o intervalo de tempo entre veículos.

Este modelo é utilizado, entre outros países, no Reino Unido e em Portugal. Outros modelos de regressão – lineares ou exponenciais – são utilizados em França, Suíça e em Itália.

2.2.3. Modelos probabilísticos

O princípio de base de análise probabilística baseia-se num modelo de interação de veículos designado por modelo discreto de aceitação de intervalos entre veículos (*gap-acceptance*). Na sua forma mais elementar, são consideradas duas correntes de tráfego onde a secundária deve ceder prioridade à corrente principal. A modelação das interações entre estas correntes de tráfego assenta em dois blocos principais. O primeiro destes blocos descreve os intervalos entre veículos prioritários, o que passa pela parametrização de uma distribuição estatística. O segundo bloco descreve a forma como cada um dos intervalos entre veículos prioritários é utilizado pela corrente secundária. A conjugação dos dois blocos resulta numa expressão que relaciona a capacidade de uma entrada explicitamente com o correspondente tráfego conflituante e implicitamente com fatores comportamentais e operacionais.

Atendendo a que este tipo de modelo não será objecto de utilização/referenciação no âmbito da presente tese, optou-se por não detalhar a sua apresentação, sugerindo a leitura de literatura da especialidade (Luttinen, 2004; Siegloch, 1973; TRB, 2010).

2.3. Técnicas de Simulação de tráfego

2.3.1. Introdução

O estudo de capacidade viária é uma das mais importantes tarefas a que a engenharia de tráfego deve dar resposta. As preocupações relativas à compreensão do funcionamento da rede viária, da mesma forma que o surgimento da engenharia de tráfego, iniciaram-se depois da aparição do automóvel, ressaltando-se os anos 1930 como um marco para o início das pesquisas (Greenshields, 1935).

A simulação de fluxos de tráfego passou por um grande desenvolvimento desde o surgimento dos primeiros modelos, na década de 1950 (Hollander & Liu, 2008). No final dos anos de 1960 e 1970 surgiram os primeiros modelos de simulação para análise de operações de tráfego em vias rápidas (Gomes, 2004).

Como uma das suas principais características a simulação potencia um mecanismo para o armazenamento de dados, e permite a avaliação comparativa de projetos viários alternativos, com a possibilidade de utilizar sistemas computacionais em face ao sistema físico (Aimsun, 2015). Dessa forma, contribuem para uma análise mais detalhada e precisa.

Atualmente, os *softwares* de microssimulação de tráfego têm-se desenvolvido cada vez mais para a verificação da rede viária e contribuído para as tomadas de decisões em menores espaços de tempos. O progresso no uso dos simuladores vem sendo possível devido, não só aos avanços na engenharia de tráfego, e necessidade de análises mais detalhadas e precisas por parte da sociedade, bem como devido ao desenvolvimento na ciência da computação, tanto em relação aos *softwares* como aos *hardwares* (Lacalle, 2003).

Segundo Figueiredo *et al.* (2014), estes modelos possuem a capacidade de representar a realidade com maior número de detalhes no que se refere a escolha de rota, comportamento dos motoristas, a infraestrutura, dinâmica dos veículos e demanda de tráfego. Entretanto, exigem uma elevada quantidade de informações que são coletadas em campo, os quais estão sujeitos a erros potenciais de estimativa e podem afetar notavelmente o resultado do modelo.

Segundo Alexiadis, Krista & Chandra (2004), diversas metodologias e ferramentas de análise de tráfego foram desenvolvidas pelas organizações de pesquisa, consultores e órgãos públicos, entre estas, pode-se citar: modelos de macro, meso e microssimulação, esses modelos serão melhor detalhados no próximo subcapítulo 2.3.2.

2.3.2. Tipologias de Modelos de simulação de tráfego

O modelo estocástico integra distribuições aleatórias que se traduz na geração de condições de circulação distintas e, por inerência, resultados diferenciados em cada replicação do modelo. Ainda, as flutuações do modelo estocástico permitem integrar diversas características associadas ao comportamento dos condutores, bem como avaliar o seu impacto em termos de indicadores de desempenho, tais como o atraso no trânsito, aceleração ou desaceleração do veículo (Kerner, 2009).

Os modelos de simulação podem ser classificados em três tipologias: macroscópicos, mesoscópicos ou microscópicos.

- **Modelos macroscópicos:** Os modelos de simulação macro são adequados para resolver problemas, numa perspectiva macro. Estes, são modelos clássicos de atribuição e simulam o fluxo de tráfego, levando em consideração as características agregadas do fluxo de tráfego (velocidade, fluxo e densidade) e as relações entre si. A simulação em modelos macroscópicos ocorre em secção por secção, em vez de rastrear veículos individuais. Os modelos de simulação macroscópica foram originalmente desenvolvidos para modelar o tráfego em sub-redes de transporte distintas, como estradas, corredores e rodovias rurais. O atraso é concentrado nos arcos, e cada nó é associado a um fator de impedência. São modelos adequados para apoiar estudos a grande escala como aplicações a rede nacionais ou regionais, ou para apoiar decisões ao nível de planeamento estratégico. Esse tipo de aplicação não permite representar, com precisão, muitos dos problemas da estrada típicos do planeamento de transporte ou do gerenciamento de tráfego, principalmente quando temos alguns problemas associados a pontos críticos (Krista, Chandra, Alexiadis, & Skabardonis, 2004);
- **Modelos mesoscópicos:** Combinam as propriedades de ambos modelos de simulação, microscópica e macroscópica. Modelos mesoscópicos são um pouco menos consistentes do que ferramentas de microssimulação, mas são superiores a

algumas das outras técnicas de análise de tráfego. Esses modelos simulam veículos individuais, mas descrevem suas atividades e interações com base em relações agregadas (macroscópicas). Eles podem simular rotas de veículos individuais equipados com sistemas de informações de viagem em tempo real no veículo. Os tempos de viagem são determinados a partir das velocidades médias simuladas nos arcos da rede, que, por sua vez, são calculados a partir de uma relação fluxo-velocidade. Aplicações típicas deste modelo são avaliações de sistemas de informação de viajantes. Algumas aplicações simulam o fluxo veicular usando relações de velocidade-densidade e modelo de escolha de rota. Outros usam submodelos simplificados (Krista et al., 2004);

- **Modelos microscópicos:** Nestes modelos, cada usuário, como veículo, caminhão, ônibus, pedestre, ciclista, etc, pode ser modelado como uma entidade individual com objetivos, características e propriedades próprias. A microssimulação é a modelagem dinâmica e estocástica de movimentos de veículos individuais dentro de um sistema de transporte. Cada veículo é movido através da rede em cada incremento temporal, de acordo com as características físicas de veículo, as regras fundamentais do movimento e regras de comportamento do motorista. Essas entidades interagem umas com as outras, possuindo a capacidade de interagir com outras entidades no modelo, nomeadamente com os diferentes elementos de infraestrutura. Essas interações são modeladas com base em algoritmos complexos que descrevem algumas manobras e comportamentos, como quando um veículo segue um outro (car-following), a mudança de via para negociar uma interseção (lane-changing), etc. A aplicabilidade é alargada e centra-se na necessidade de reproduzir um elevado nível de detalhe, tais como, avaliação do impacto associado a alteração semafórica, análises operacionais e definição de rotas dos veículos (Krista et al., 2004).

Os modelos macroscópicos apesar de não possuírem a mesma capacidade em reproduzir resultados detalhados, devido à falta de capacidade de simular interação entre veículos; são muitas vezes os escolhidos para a análise, pois são de fácil utilização e exigem um menor esforço de recolha de dados e modelação, tornando-se mais econômicos.

Numa fase inicial, o principal obstáculo à utilização dos modelos microscópicos era a inexistência de computadores com suficiente capacidade de cálculo. Esta restrição foi sendo ultrapassada ao longo do tempo e atualmente é recorrente a sua utilização para estudo de redes congestionadas. Os métodos convencionais de atribuição continuam a ser utilizados

no domínio do planeamento e gestão em larga escala, enquanto os modelos microscópicos se aplicam, entre outras, em análises de índole operacional nomeadamente no estudo do desempenho de medidas ITS e na gestão/otimização de redes viárias urbanas complexas.

2.3.3. Aplicabilidade

Conforme Poyares (2000), a construção de um modelo de microssimulação envolve um esforço relativamente grande, porém depois de concebido permite simular diferentes situações alternativas. Assim sendo, torna-se possível a partir de uma determinada situação, analisar variados cenários e antecipar os resultados.

De acordo com o guia de boas práticas de Sbayti & Roden (2010), a ferramenta da microssimulação foi de grande utilidade em análises como: fornecimento de dados confiáveis para dimensionamento e planeamento, viabilizar a formulação de políticas estratégicas, avaliação do impacto de medidas corretivas, etc.

Importa avaliar alguns fatores antes de selecionar o modelo de simulação mais apropriado ao objecto e objectivo de estudo. De acordo com Maia (2007), a capacidade de representar cenários complexos e situações alternativas, a dimensão da rede, a facilidade de manuseamento e os resultados obtidos, são alguns desses fatores que devem ser considerados antes da escolha do modelo.

Quanto à seleção da escala de simulação a adotar no estudo, na sua maioria, é definida por fatores tais como experiência do projetista, tempo de execução e recursos disponíveis. Contudo, a credibilidade dos resultados está diretamente relacionada com a escala que se propõe adoptar. Sendo assim, baseado em uma pesquisa, com a utilização de diferentes programas e estudos de caso, Sbayti & Roden (2010) apresentam um resumo de características do estudo relevantes à escolha do modelo, conforme se pode observar na tabela 1.

Tabela 1 - Aplicabilidade das características de estudo baseado em diversos modelos (Adaptado de Sbayti & Roden, 2010)

Característica	Critério	Macroscópico	Mesoscópico	Microscópico
Dimensão da Rede	Grande (>10.000 ligações, >3.000 nós, >1.000 zonas)	sim	talvez	raramente
	Médio	sim	sim	talvez
	Pequena (<1.000 ligações, <400 nós, <100 zonas)	sim	sim	sim
Período	24 Horas	sim	talvez	raramente
	6 horas	sim	sim	talvez
	Período de ponta	sim	sim	sim
	Hora de ponta	talvez	sim	sim
Demanda	Grande (>1 milhão de veí.)	sim	talvez	raramente
	Médio	sim	sim	talvez
	Pequena (< 200 mil veí.)	sim	sim	sim
Âmbito	Regional	sim	talvez	raramente
	Corredor	sim	sim	talvez
	Área pequena	talvez	sim	sim

2.3.4. Vantagens e desvantagens

Segundo Mclean (1989), as principais vantagens que a microsimulação proporciona são: uma observação direta das correntes de tráfego e o controle das variáveis das mesmas; simulação de uma ampla variedade de condições operacionais com facilidade; possibilidade de simular condições de extrema dificuldade a serem detectadas na prática e obtenção de dados impossíveis de serem observados na prática, por exemplo, distribuição de velocidades desejadas em um determinado ponto; possibilidade de testar soluções inovadoras ou diferenciadoras, ainda antes das mesmas terem sido construídas. Dessa forma, segundo Alexiadis *et al.* (2004), a microsimulação permite avaliar a evolução, dissipação e duração de congestionamentos do sistema.

Apesar das variadas vantagens, nem sempre é a melhor metodologia para apoiar a tomada de decisões em relação as possíveis intervenções no sistema. Geralmente, a simulação requer um maior conhecimento do sistema como um todo, além do elevado custo quando comparado as demais alternativas de análises, embora potencie análises amplas e integradas.

Quanto as desvantagens, de acordo com Mclean (1989), a observação direta do fluxo de veículos pode ocasionar a incredibilidade sobre os resultados obtidos, evidenciando o desajuste do modelo e a sua incapacidade para replicar um sistema real. Dessa forma, os

processos de verificação, calibração dos parâmetros e validação do modelo têm como finalidade minimizar esses possíveis erros, e aproximar os resultados simulados aos observados na realidade, sendo que qualquer uma destas tarefas poderá exigir um esforço bastante acentuado em termos de recolhas adicionais de campo. Uma grande limitação destes modelos reside no facto de não ser possível integrar no modelo os processos de interação entre veículos que circulam no mesmo arco, em sentidos opostos. Outra desvantagem que os simuladores possuem, conforme Alexiadis *et al.* (2004), é o facto de não serem elaborados para modelar os impactos do acesso à entrada de veículos, impactos de estacionamento e interferências entre pedestres, bicicletas e veículos.

São diversos os fatores que tornam difícil a recolha com exatidão desses parâmetros, por exemplo, dificuldade e imprecisão dos processos de recolha; a exigência de equipamentos específicos e dispendiosos; erros por estimativa produzidas por outros modelos devido a indisponibilidade de obtenção de dados em campo, etc. (Figueiredo *et al.*, 2014).

De acordo com inquéritos conduzidos pela AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials) acerca da microsimulação, Sbayti & Roden (2010) relatam que cerca de 65% dos entrevistados notaram que a precisão no comportamento do condutor e a realização da calibração, foram as principais dificuldades encontradas no decorrer do desenvolvimento do modelo. Além do mais, a capacidade em modelar redes extensas em áreas urbanas foi outro fator referido de grande dificuldade para 48 % dos entrevistados.

2.3.5. Processo de Construção do modelo

A construção do modelo de microsimulação deverá justificar o desenvolvimento das seguintes etapas de trabalho (Elefteriadou, 2014):

1. Âmbito do estudo: Definir o âmbito do projeto, com identificação do problema e objetivo de estudo; Análise das características do simulador para resolução dos problemas identificados;
2. Recolha de dados de campo: Identificação da necessidade de dados, com a posterior recolha, compilação e inserção destes no simulador. Assume aqui particular relevância a construção da matriz O/D;
3. Codificação da rede;

4. Calibração e Validação do modelo: Após a modelação, verificar possíveis erros nos dados de entrada e saída de maneira qualitativa. Após a verificação, é feita a calibração, que consiste nos ajustes incrementais necessários de forma a forçar o modelo a representar de forma fidedigna a realidade. Posteriormente importa desenvolver os trabalhos de validação, recorrendo a uma base de dados independentes da usada para construção e calibração do modelo.

Para um melhor entendimento, a figura 5 apresenta os passos para o desenvolvimento e aplicação de um modelo de microssimulação.

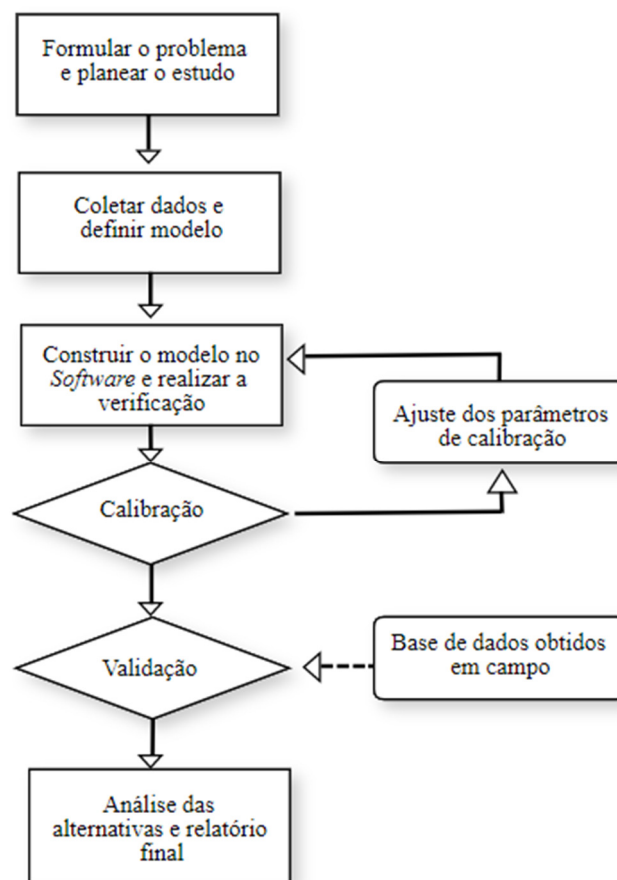


Figura 5 - Desenvolvimento do modelo de microssimulação (Autor, 2019)

Comparando aos modelos tradicionais, a consistência e qualidade dos dados de entrada são muito relevantes para que se tenha um modelo legítimo. Assim, é estritamente necessário que o utilizador conheça os dados a inserir e admita que podem sempre existir erros (Sbayti & Roden, 2010).

A etapa da codificação da rede, é exaustiva e obriga a um grande dispêndio de tempo, obrigando à recolha de elevada quantidade de variáveis e parâmetros, como características

do modo de controle (tipo de controle, faseamento e planos de tempo) e da geometria da rede (comprimento, largura, movimentos direcionais e partilha de vias) (Sbayti & Roden, 2010).

A etapa que antecede a calibração, a verificação, necessita de atenção tal como as demais etapas do processo de desenvolvimento do modelo. Essa particular fase tem como objetivo garantir que o modelo foi codificado de forma mais precisa possível, e para isso se deve realizar a conferência da sua geometria, sistemas de controle de tráfego, sinalização, atribuição da procura de tráfego e movimentos permitidos.

Atualmente, existe uma diversidade de *softwares* disponíveis no mercado e que permitem simular redes de tráfego, e por inerência, avaliar eventuais intervenções no sistema. Como exemplos pode-se citar: AIMSUN (Espanha), CORSIM (Estados Unidos da América), INTEGRATION, NETSIN, PARAMICS (Grã-Bretanha), TRANSIMS e VISSIM (Alemanha). Cada um dispõe de especificações próprias, sendo que a seleção do *software* a adotar em cada estudo, deve depender dos objetivos subjacentes ao trabalho.

2.3.6. O processo de Calibração e de validação do modelo

Após a definição do objectivo do projeto, a construção do modelo base, e a verificação dos erros, considera-se que o modelo é capaz de representar a realidade entretanto simulada. Para salvaguardar a indispensável credibilidade e assertividade de resultados e garantir que o modelo esteja mais próximo do real possível, é essencial que se execute a etapa da calibração e validação do modelo.

Segundo Sbayti & Roden (2010), essa etapa de calibração e validação são as mais importantes quando se trata de modelação microscópica. Desse modo, requerem um raciocínio lógico na execução de cada ajuste.

Segundo Dowling et al. (2004), a calibração pode ser definida como a alteração incremental dos valores dos parâmetros de calibração até que os resultados simulados se aproximem dos resultados observados, dentro de uma gama de erro considerada aceitável, face aos objectivos pré-definidos.

Os modelos de simulação possuem variados parâmetros que devem ser calibrados antes que o modelo possa ser usado para o desenvolvimento de análises. De acordo com Hollander & Liu (2008), o modelo de microsimulação de tráfego, integra um conjunto de submodelos microscópicos, onde cada um reflete uma tomada de decisão por parte do veículo, como por

exemplo, a negociação associada à inserção na corrente de tráfego prioritária, ou a mudança de via. Dessa forma, cada submodelo possui múltiplos parâmetros, os quais se tornam complexos de estimar, devido a dificuldade de se isolar as características impercetíveis ou a necessidade de ampla recolha de dados.

Identificar o local a simular é uma medida relevante na etapa de calibração, já que as características físicas do ambiente e o comportamento dos motoristas, como distância segura entre automóveis, tempo de reação e atravessamento de peões, devem ser ajustados ao ambiente rodoviário. No caso específico das autoestradas, outros aspectos assumem igualmente importância como a presença de veículos nas rampas de acesso, distâncias entre veículos e as velocidades praticadas (Ayala, 2013).

Para Dowling et al. (2004) e a forma de se realizar a calibração do modelo deve seguir etapas bem definidas, conforme representa a figura 6.

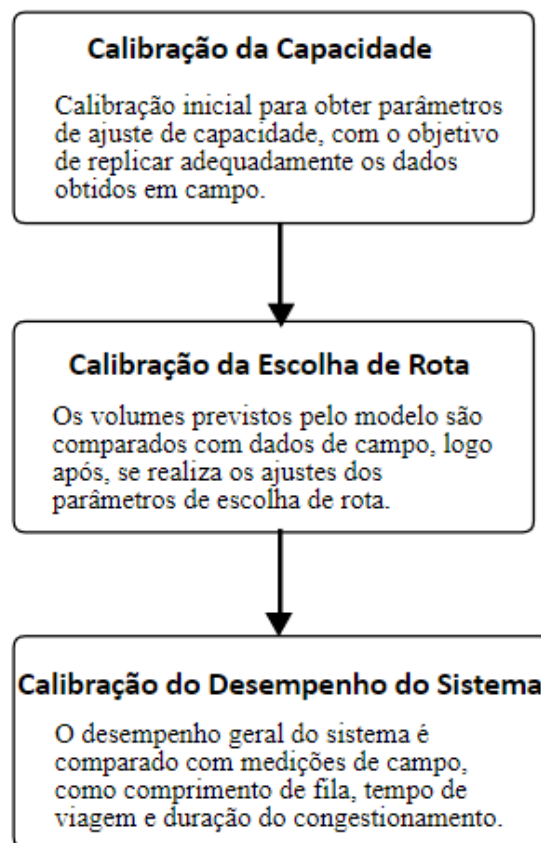


Figura 6 - Estratégia de três etapas para calibração (Adaptado de Dowlin et al., 2004)

Sendo conhecida a complexidade que a calibração envolve, Dowling et al. (2004) recomenda o desmembramento do procedimento em fases sequenciais e lógicas assente em duas categorias fundamentais:

- Parâmetros sobre os quais se tem a segurança de estarem corretos e não há necessidade de ajustes;
- Parâmetros que não se consideram fiáveis e carecem de ajuste.

De acordo com Aimsun (2015), para facilitar o processo, os parâmetros mais relevantes a etapa de calibração podem ser divididos em três grupos diferenciados: parâmetros globais, parâmetros da secção e parâmetros por tipo de veículo.

- i) Parâmetros Globais: Estes parâmetros influenciam todos os tipos de veículos inseridos no sistema, independentemente da sua tipologia;
 - Tempo de reação (capacidade de reação do condutor quando circula em secção e rampa);
 - Tempo de reação parado (capacidade de reação do condutor quando inserido em fila);
 - Velocidade de saída e filas (comportamento nas paradas e estatísticas de fila);
 - Two Lane Car-following;
 - Lane-changing (modelo de rampa, distribuição entre vias e situações interurbanas).
- ii) Parâmetros da secção: Influencia todos os tipos de veículos que circulam por uma determinada secção.
 - Limite de velocidade (velocidade média e tempo de viagem);
 - Velocidade de viragem (capacidade de viragem, tempo de viragem e velocidade média);
 - Distância de visibilidade (comportamento semafórico);
 - Distância da zona de influência da via (proporção de viragem).
- iii) Parâmetros por tipo de veículo: Estes parâmetros influenciam todos os veículos de uma determinada tipologia específica ao circular por qualquer lugar do sistema.
 - Velocidade máxima desejada, aceleração máxima, desaceleração normal e máxima e aceitação da velocidade (velocidade, tempo de viagem, mudança de faixa, etc);
 - Distância mínima entre veículos (capacidade e comprimento de fila).

Sabe-se que o uso de intervalos curtos “*Simulation step*” permite reproduzir com maior exatidão o comportamento do tráfego em tempo real, pelo que este parâmetro assume grande

relevância nos resultados. Os modelos mais antigos utilizam intervalos alargados (1s) enquanto que os modelos mais recentes já fazem uso de um intervalo reduzido de 0,1 s ou até 0,01s (Dion, Karthik, & Ban, 2012).

Contudo, apesar de possibilitar executar simulações mais refinadas, a redução do intervalo requer uma elevada capacidade de processamento do software e um maior tempo de execução do modelo.

Após a finalização da etapa de calibração é realizada a validação do modelo, etapa na qual se avalia se o modelo simulado representa o sistema real e se constitui um modelo adequado à realização de estudos de tráfego.

A validação consiste na comparação entre os valores simulados, resultantes da aplicação do modelo calibrado e os valores reais diretamente observados, dentro de uma gama de erro considerada aceitável, face a pré-definições de custo-benefício.

Para isso o modelo deverá ser validado em relação a uma amostra independente da utilizada na construção e calibração do modelo, recorrendo a parâmetros como: velocidade, comprimentos de fila, contagens de tráfego, entre outras medidas de desempenho da rede, analisado por hora ou de preferência a cada 15 minutos (Sbayti & Roden, 2010).

Entretanto, Aimsun (2015) salienta que durante a etapa da validação, um modelo simulado nunca representará com exatidão o sistema real, independente do número de processos de calibração, sendo por isso relevante pré-definir a margem de erro considerada aceitável face aos objectivos pré-estabelecidos. Recomenda-se que se valide o sistema quanto a medidas de desempenho que são relevantes a tomada de decisões.

2.3.7. Indicadores de desempenho

Uma das vantagens dos simuladores de tráfego é que potenciam o uso de uma gama extremamente alargada de indicadores de desempenho, permitindo apresentar resultados adequados para avaliar o desempenho do elemento infraestrutural diretamente relacionado ao objectivo do estudo. No caso concreto das interseções, como objecto de análise deste trabalho, os indicadores de desempenho escolhidos foram fila de espera, demora e tempo de percurso, optou-se por indicadores associados à fluidez do tráfego.

Tratando-se de rotundas, o nível de desempenho é analisado a partir de cada uma de suas entradas, que relaciona o nível de serviço oferecido através da sua capacidade de

funcionamento. Da mesma forma, o grau de saturação, comprimento de fila de espera e demoras, são outros indicadores relevantes a esse tipo de análise.

Os indicadores fornecidos pelo programa podem ser específicos, sejam eles ao nível da rede no geral, para a seção, para um movimento específico, entre outros. Esses indicadores podem ser divididos em globais (dados coletados do início ao fim do experimento) e periódicos (dados coletados para um certo período) (Aimsun, 2015).

2.3.7.1. Demoras

Para a análise de demoras em interseções, segundo TRB (2010), deve-se ter em conta quatro principais fatores: Tráfego (interações entre veículos podem interferir na velocidade), condições anormais na circulação, características geométricas da interseção e condições de entrada.

Baseando-se no modelo proposto por Webster obtido através de simulação no computador, o valor de atraso médio é fornecido pela expressão 18 (Costa et al., 2008).

$$d = 0,9 \cdot \frac{c \cdot (1 - \frac{g}{c})^2}{2 \cdot (1 - x \cdot \frac{g}{c})} + \frac{x^2}{2 \cdot q \cdot (1 - x)} \quad (18)$$

Onde, d é o atraso médio por veículo (s);

C é a duração do ciclo (s);

g é o tempo de verde útil (s);

x é o grau de saturação;

q é o débito de chegadas (s).

2.3.7.2. Fila de espera

De acordo com Aimsun (2015), a fila de espera é definida como fila virtual média não seção durante o intervalo em não ocorre movimento de atravessamento, é medida em número de veículos. Para as interseções com sinais luminosos, o modelo determinístico tem sido mais utilizado no que se refere ao procedimento de chegadas e partidas. Segundo Costa *et al.* (2008), para ciclos não saturados (onde as filas se dissipam ao fim do tempo de verde) a

fila de espera máxima (N_u expresso em veículos) que decorrerá ao início do verde é igual ao número de veículo que chegam durante o intervalo em que não há atravessamento, conforme se observa na expressão 19.

$$N_u = q \cdot (C - g) \quad (19)$$

Entretanto, para situações em que há ciclos saturados e não saturados se tem de somar ao valor anterior, o número médio de veículos N_0 , que sucede no início do verde, esse valor pode ser obtido através da expressão 20.

$$N_0 = \frac{Q \cdot T_f}{4} \cdot \left(z + \sqrt{z^2 + \frac{12 \cdot (x - x_0)}{Q \cdot T_f}} \right) \quad (20)$$

Onde, N_0 é o número total de veículos retirados em fila de espera após o verde (veí);

Q é a capacidade (veí. /h);

T_f é o período em que existe o débito q (h);

$$z = x - 1$$

$$x_0 = 0,67 + \frac{s \cdot g}{600}$$

Admiti-se que: Se $x < x_0$ $N_0 = 0$

Se $x < 0,9$ T_f não é significativo

Se $x < 0,9$ T_f não é significativo

2.3.7.3. Tempo de viagem

Conforme Aimsun (2015) o tempo de viagem representa o tempo médio que um veículo demora a percorrer uma determinada seção, isto é, é o intervalo de tempo em que se entra e sai da seção.

Para Dowling *et al.* (2004), a fonte mais confiável para a obtenção do tempo de viagem é pelos “corridas de carro flutuantes”, método o qual um ou mais veículos são guiados por um segmento de uma seção várias vezes durante um período onde o tempo de viagem é calculado. O número de contagens necessárias desse tempo é influenciado diretamente pela variabilidade dos tempos medidos em campo, em casos de situações de trânsito livre se

recomenda três corridas para se estabelecer um valor de tempo médio fiável, todavia para trânsito intenso, se pode exigir mais de 10 contagens.

2.4. Considerações finais

Este ponto evidenciou que a análise do desempenho de interseções, designadamente na sua vertente de análise de capacidades, pode ser desenvolvida tendo por base os modelos convencionais como é o caso do modelo de Webster, aplicado a interseções luminosas, e o modelo do TRL, aplicado a rotundas. Por uma questão de extensão do documento, não foram aqui apresentados modelos aplicados a interseções prioritárias.

Contudo o recurso a modelos convencionais de estimação dos níveis de serviço aplicados a elementos rodoviários isolados está cada vez mais comprometido, uma vez que não permite responder de forma integrada à complexidade associada ao funcionamento das redes viárias urbanas. Ou seja, os resultados dos métodos convencionais representam o estado da rede num período de tempo bem definido, assumindo que as condições de circulação dos veículos são constantes nesse período. Este tipo de representação é adequado para aplicações tradicionais, mas tem limitações para a análise de desempenho de efeitos dinâmicos no tráfego como por exemplo aqueles que se esperam da implementação de Sistemas Inteligentes de Transportes (ITS). Para este tipo de objetivos os modelos mais indicados são os microscópicos. Os efeitos estocásticos, a variabilidade da procura do tráfego no tempo e a redistribuição do tráfego na rede em função dos níveis de congestionamento, são aspetos que apenas poderão ser levados em conta por recurso a modelos integrados de atribuição e simulação de tráfego.

Neste capítulo ficaram evidenciadas as potencialidades do uso da microssimulação, aplicada aos estudos de tráfego em meio urbano, comparativamente aos modelos convencionais. Por essa razão, essa foi a metodologia adoptada no âmbito do presente trabalho e que se detalha no capítulo seguinte.

3. Microsimulador Aimsun

O primeiro protótipo do software de microsimulação AIMSUN2 (Advanced Interactive Microscopic Simulator for Urban and Non-urban Networks), foi desenvolvido no ano de 1989 por membros da Universidade Politécnica da Catalunha (UPC) em Barcelona. Entretanto, apenas no ano de 1997 a empresa Transport Simulation Systems (TSS) começou a comercializar o modelo (Aimsun, 2018).

Esse modelo de *software* foi desenvolvido como um recurso de análise para gerenciadores de tráfego e possuem capacidade de representar diferentes tipos de redes de tráfego, como urbanas, interurbanas, vias circulares, artérias, ou ainda, a combinação de todas elas (TSS, 2003).

Ainda de acordo com a TSS (2003), a aplicabilidade do modelo engloba desde sistemas avançados de gerenciamento de tráfego, sistemas de prioridade ao transporte público, sistema de controle, até a avaliação do impacto ambiental devido a emissão de poluentes e consumo de energia.

Segundo a TSS (2003), os dados de entrada requeridos pelo Aimsun são diversos e diversificados e dependem do nível de rigor pretendido. Em termos gerais incidem sobre dois tipos de dados: (1) cenário de estudo e, (2) parâmetros de simulação. O cenário compreende quatro itens de entrada, são eles, plano de controle de tráfego, demanda de tráfego, planos de transporte público e descrição de rede.

Em relação ao sistema de controle, o programa permite controlar os semáforos por tempos fixos ou atuados de acordo com as condições de circulação do tráfego pela rede visando a sua otimização. Os sinais verticais de preferência de passagem e parada, são outras características que podem ser simuladas.

A prioridade de transporte público é outro atributo presente no *software*. Por meio de detectores introduzidos em pontos estratégicos se faz possível a detecção desse tipo de veículo assim evitando que o mesmo seja forçado a parar.

Alguns dos resultados detalhados fornecidos pelo programa, são: tempo de viagem, velocidades, fluxo, entre outros, apresentados em forma de gráficos ou tabelas. Além desses, a capacidade de resolver diversos tipos de redes de tráfego, modelar variados tipos de controle de tráfego e interface de fácil manipulação, são outras vantagens que o programa oferece (Boxill & Yu, 2000).

3.1. Demanda de tráfego

Os dados de demanda de tráfego podem ser compostos por fluxos de entrada nas seções de entrada da rede e as percentagens do movimento em cada nó da rede, ambos segregados por tipologia de veículo (Aimsun, 2015). Os dados a serem introduzidos resultam de contagens realizadas em campo ou definidos como valores aleatórios para uma condição experimental.

Outra possibilidade de codificação da procura de tráfego é a partir da utilização da matriz O/D. Em situações de redes extensas é definida por um conjunto dessas matrizes. Segundo Aimsun (2015), as matrizes fornecem o número de viagens entre centróides de origem e destino (cada um representativo de uma zona), onde as escolhas são definidas pelos caminhos mais curtos/económico (minimização do custo generalizado) e influenciados por características como intervalo de tempo, propósito de viagem e tipologia de veículo.

Uma matriz O/D abrange todas as possibilidades de geração de viagens em uma rede para um determinado tipo de veículo, classe de usuário e um determinado período pré-definido, onde cada célula (i,j) de uma matriz representa o número de veículo que vão do centroide i para o centroide j (Aimsun, 2015).

A tipologia dos veículos (ônibus, carro, pedestres, transporte público, vans, ambulância, táxi, caminhão, etc.) contribui para a classificação das diferentes características e comportamentos dos veículos e condutores (Aimsun, 2015). Os tipos de veículos pertencem a classes pré-definidas (privada, pública, comercial, entre outras) ou criadas para o efeito, as quais podem ser utilizadas para situações de restrição de faixa.

Os veículos possuem características como comprimento, largura, velocidade máxima desejada, capacidade máxima, classe de veículos, aceleração máxima, tempo de reação, entre outros (Aimsun, 2015). Esses parâmetros são de grande importância pois nas etapas de calibração e validação são estes que podem/devem ser ajustados incrementalmente.

3.2. Princípios básicos de modelos de atribuição de tráfego

Num modelo convencional de atribuição os principais *inputs* são a matriz OD das viagens, a rede viária com informação topológica e um conjunto de equações/parâmetros que traduzem o processo de interação entre condutores e entre estes e a rede. São identificados

os caminhos alternativos entre cada par OD e posteriormente as viagens geradas/atraídas entre esse par são distribuídas pelo conjunto de caminhos. Os principais *outputs* são os fluxos de tráfego nos diferentes arcos da rede e os custos de viagem entre as zonas.

O modelo assenta num conjunto de conceitos e técnicas que vale a pena apresentar de forma resumida. O conceito de *custo generalizado de viagem* está na base de todos os modelos de atribuição. No caso de um viajante dispor de mais do que uma alternativa para fazer a viagem ele irá considerar diversos fatores para fazer a sua escolha de caminhos. Estes fatores são muitas vezes difíceis de quantificar e considerar no modelo, como é o caso do conforto, paisagem e sentimento de perigo. Normalmente, o custo de uma viagem é formulado através de uma combinação linear de tempo de viagem, extensão, e eventualmente custos fixos tais como portagens.

Por simplificação considera-se que todas as viagens com origem (ou destino) numa zona começam (ou acabam) num ponto específico denominado de *centróide*. As viagens realizadas na área de estudo durante um período de tempo estão contidas na matriz O/D, a qual pode ser obtida essencialmente de duas formas: *i*) sessões de inquéritos O/D complementados por contagens de tráfego. É um método rigoroso, mas caro já que implica a realização de um número elevado de inquéritos e o recurso a uma equipa alargada de observadores e de agentes policiais. Em zonas urbanas este processo pode ainda impor perturbações à normal circulação do tráfego; *ii*) estimativa baseada em contagens de tráfego. Este método consiste em encontrar a matriz mais provável que quando aplicada à rede conduz à minimização do erro entre os fluxos observados e os modelados. É um método mais económico embora menos confiável.

A rede viária é representada através de um conjunto de arcos e de nós. Em modelos mais básicos, a única função dos nós é a de ligar os arcos, enquanto os arcos são caracterizados por um conjunto de atributos que servem de base ao cálculo do custo generalizado das viagens. Neste cálculo assume-se que o tempo de viagem varia com o tráfego de acordo com a curva da *velocidade-fluxo*, também conhecida como a curva fundamental do tráfego. Na escolha de caminhos assume-se que os condutores se comportam de forma racional e escolhem o caminho com o menor custo. Independentemente deste princípio é sabido que há condutores que optam por diferentes trajetos para realizar uma viagem entre o mesmo par O/D. As seguintes razões podem ser apontadas para essas diferenças: *i*) a população de condutores é heterogénea, havendo condutores que valorizam de forma distinta os fatores envolvidos na viagem; *ii*) os condutores não têm todos o mesmo conhecimento da rede e das

condições de circulação (efeitos estocásticos); *iii*) o tempo de viagem em cada caminho depende do nível de serviço oferecido pelos arcos, o qual varia no tempo em função das condições de saturação.

3.3. Modelos microscópicos comportamentais

O modelo integra modelos comportamentais que permitem representar o comportamento individual de cada condutor ao longo do sistema durante um determinado intervalo de tempo, face a determinadas situações. Esse processo é explicado através dos submodelos *lane-changing*, *gap-acceptance* e *car-following*. Sendo assim, fornece uma modelagem com elevado detalhe, que permite distinguir entre tipologia de veículos, variadas geometrias do sistema e incidentes.

A ocorrência de mudança de comportamento dos veículos ao longo do tempo baseia-se nos submodelos citados anteriormente, dessa forma, segundo Aimsun (2015) a tendência é de que os veículos circulem a uma determinada velocidade, entretanto, ao longo do percurso se deparam com condicionantes, como veículos adjacentes, veículos precedentes, controle semafórico, sinalização, entre outros, que acabam influenciando diretamente o seu comportamento.

3.3.1. Lane-changing

Os algoritmos são utilizados para modelar matematicamente a decisão de mudança de via (*lane-changing*). Normalmente essa mudança justifica-se sempre que o veículo, ao circular atrás de outro veículo, é impedido de manter a velocidade desejada e dispõe, na via adjacente de condições adequadas para efectuar a manobra de mudança de via.

A mudança de via é baseada no modelo desenvolvido por Gipps em 1986. Para isso devem ser avaliados fatores como: distância até a próxima manobra, possibilidade de manobra na pista e condições de tráfego na pista (Aimsun, 2015).

O *software*, verifica de forma aleatória o comportamento dos condutores, seja de forma agressiva ou cautelosa, para ceder passagem ou evitar que veículos em seu entorno tomem a posição a dianteira.

De modo a representar o comportamento do condutor ao longo do sistema, são designadas três zonas, as quais correspondem a diferentes tomadas de decisões para executar a mudança, conforme se observa na figura 7.

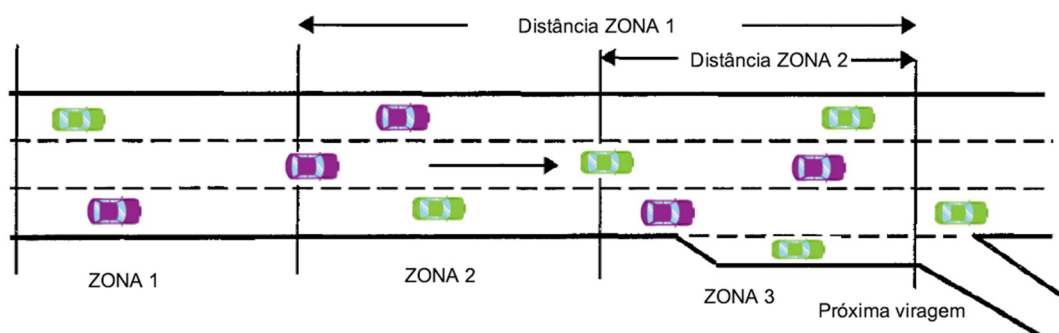


Figura 7 - Definição de zonas para mudança da via (Adaptado de Barceló & Casas, 2005)

Como demonstrada na figura acima, a zona 1 é o trecho mais distante da seção de tomada de decisão. Os movimentos de mudança de via são influenciados pelas condições do tráfego na envolvente do veículo e independentemente da decisão a ser tomada posteriormente. De modo a analisar a necessidade de execução dessa mudança, devem ser considerados alguns parâmetros, como: velocidade desejada do veículo, velocidade e distância do veículo precedente e velocidade e distância do veículo à frente (Barceló & Casas, 2005).

Na zona 2, designada de zona intermediária, a mudança de via é determinada pela tomada de decisão de sair no próximo nó. A movimentação dos veículos, centra-se por isso, na aproximação do veículo, por mudanças sucessivas de via, da via que permite executar a manobra final desejada (Barceló & Casas, 2005).

A zona 3 é a que se encontra mais próximo da viragem pretendida, onde os veículos procura atingir a via que lhe permite realizar a manobra, se necessário forçando a mudança de via, com a redução da velocidade ou parada por completo, para viabilizar a manobra final. Nessas situações, os veículos na via adjacente possuem a capacidade de alterar o seu comportamento com o objetivo de garantir um intervalo suficiente para a mudança de via (Barceló & Casas, 2005).

As distâncias das zonas 1, 2 até a próxima viragem, conforme representa a Figura 3, são pré-definidas pelo utilizador, por dois parâmetros. Sendo assim, de acordo com Aimsun (2015) os parâmetros que as definem são distância (metros) e tempo (segundos). Após determinar esses parâmetros, calcula-se a sua conversão pela expressão 21.

$$D_m = D_t \cdot S_{limit}(s) \quad (21)$$

Onde, D_m é a distância (m);

D_t é a distância (s);

$S_{limit}(s)$ é a velocidade limite da secção (s).

3.3.2. Gap-acceptance

O submodelo de aceitação do intervalo crítico (Gap-acceptance), é um dos principais modelos microscópicos que determina a predisposição de veículo não prioritário para se inserir na corrente prioritária, mediante a análise de distribuição dos headways da corrente prioritária. De acordo com Barceló & Casas (2005), o modelo considera características como o posicionamento do veículo relativamente ao ponto de colisão hipotético, as velocidades e taxas de aceleração dos veículos inseridos na via. A partir desses parâmetros é calculada a possibilidade do veículo não prioritário atingir o ponto de embate potencial, antes, durante ou após o seu atravessamento por parte de veículo prioritário, e assim a possibilidade de embate.

A figura 8, apresenta um modelo proposto por Aimsun (2015) para avaliação de intervalos, o qual será descrito em seguida:

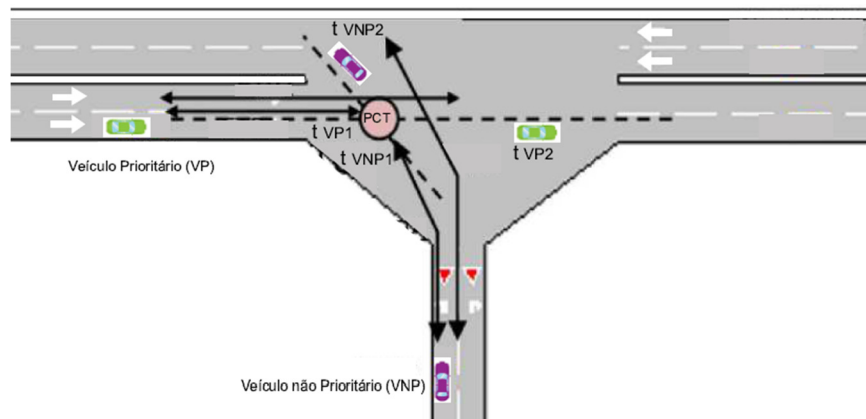


Figura 8 - Modelo de representação do gap-acceptance (Adaptado de Aimsun, 2015)

O processo de avaliação de intervalos, como representa a figura acima, segue a devida metodologia descrita a seguir (Aimsun, 2015):

- A. Considerando uma aproximação, identificar o veículo prioritário (VP) e o veículo não prioritário (VNP);

- B. Determinar o local onde ocorre a colisão entre eles, chamado de ponto de colisão teórica (PCT);
- C. Calcular o tempo, o qual o (VP) e (VNP) levam até atingir o (PCT), sendo chamados de t_{VP1} e t_{VNP1} , respectivamente;
- D. Calcular o tempo estimado, o qual o (VP) e (VNP) levam a ultrapassar a zona de colisão (PCT), sendo chamados de t_{VP2} e t_{VNP2} , respectivamente.

Considera-se um processo seguro, caso o t_{VNP2} mais uma margem de segurança (relacionado ao comportamento do usuário) seja menor que t_{VP1} . Contudo, caso o t_{VNP1} seja superior a t_{VP2} , o VP já atravessou a intersecção e é identificado um novo VP o qual é capaz de interferir no cruzamento.

3.3.3. Car-following

O modelo de seguimento (car-following) presente no Aimsun, baseia-se também no modelo de Gipps (1986), o qual considera que um determinado veículo seguidor é ou não condicionado pelo veículo líder. Isto é, de acordo com TRB (2000) os veículos que circulam em uma determinada via podem ser influenciados por outros veículos posicionados atrás ou à frente, tendo por base um conjunto de parâmetros como a aceleração e desaceleração, a velocidade desejada, etc.

Considera-se que esse submodelo possui a calibração baseada nas variáveis de fluxo de tráfego, como: densidade, fluxo e velocidade (Vasconcelos, Neto, Santos, Silva, & Seco, 2014).

Tem-se estudado muito a possibilidade de se obter valores mais reais da trajetória para a calibração desses parâmetros. Sendo assim, Vasconcelos et al. (2014) realizaram uma pesquisa a qual recorreu a um *datalogger* e a um telêmetro LIDAR, sendo esse utilizado para medir a distância até o veículo seguinte, e aquele, com a função de oferecer dados mais precisos com a associação de GPS e acelerômetros, com o objetivo de se descobrir a melhor alternativa para a calibração de certos parâmetros.

Conforme Vasconcelos et al. (2014), a pesquisa baseou-se em dois métodos para comparação, sendo o método 1 a verificação dos parâmetros fundamentais e o método 2 a otimização dos valores de parâmetros para atingir um determinado objetivo pré-definido. Os resultados do estudo indicaram que o método 1 é muito mais consistente ao se tratar do

significado físico de cada parâmetro, logo o recomendam para situações de previsão. Entretanto, o método 2 foi mais eficaz em apresentar padrões de aproximação e afastamento, sendo assim se recomenda seu uso em situações em que se deseja determinar a condição do tráfego presente, como visualizações ou demonstrações.

Sendo assim, Aimsun (2015) apresenta a seguir os cálculos realizado pelo software, no qual o submodelo propõe que a velocidade máxima que um veículo pode acelerar durante um intervalo de tempo, é representada pela expressão 22.

$$V_a(n, t + T) = V(n, t) + 2,5 a(n)T \left(1 - \frac{V(n,t)}{V^*(n)}\right) \sqrt{0,025 + \frac{V(n,t)}{V^*(n)}} \quad (22)$$

Onde, $V(n, t)$ é a velocidade do veículo n no instante t ;

$V^*(n)$ é a velocidade desejada do veículo n para sua posição atual;

$a(n)$ é a aceleração máxima para o veículo n ;

T é o tempo de reação.

Entretanto, limitações impostas pelo veículo precedente, podem ser calculados através da velocidade conforme representa a expressão 23.

$$V_b(n, t + T) = d(n)T + \sqrt{d(n)^2 T^2 - d_n \left\{ 2[x(n-1, t) - s(n-1) - x(n, t)] - V(n, t)T - \frac{V(n-1, t)^2}{d'(n-1)} \right\}} \quad (23)$$

Onde, $d(n)$ (< 0) é a desaceleração máxima requerida pelo veículo n ;

$x(n, t)$ é a posição do veículo n no instante t ;

$x(n-1, t)$ é a posição do veículo à frente ($n-1$) no instante t ;

$s(n-1)$ é o comprimento efetivo do veículo ($n-1$);

$d'(n-1)$ é uma estimativa da desaceleração desejada do veículo ($n-1$);

Assim, a velocidade final pode ser obtida a partir dos mínimos de ambas velocidades, como ilustra a expressão 24.

$$V(n, t + T) = \min\{ V_a(n, t + T), V_b(n, t + T) \} \quad (24)$$

Tratando-se de um processo que reavalia o modelo e o atualiza quanto suas velocidades e localizações, recomenda-se o uso da expressão 19 para encontrar o posicionamento dos veículos.

$$x(n, t + T) = x(n, t) + V(n, t + T)T \quad (25)$$

Para o cálculo de velocidade de circulação de um veículo em uma secção s , se considera a velocidade máxima desejada do veículo $V_{max}(i)$, o limite de velocidade da secção $S_{limit}(s)$ e o parâmetro de aceitação da velocidade $\theta(i)$. Para cálculo da velocidade limite utiliza-se a expressão:

$$S_{limit}(i, s) = S_{limit}(s) \cdot \theta(i) \quad (26)$$

Dessa forma, a velocidade máxima na secção é dada pela expressão:

$$V_{max}(i, s) = \min[S_{limit}(i, s), V_{max}(i)] \quad (27)$$

Onde, $V_{max}(i, s)$ corresponde a $V^*(n)$ da expressão 22.

3.4. Período de carregamento da rede

O *warm-up*, mais conhecido como período de carregamento da rede, é definido como o período de tempo que deve anteceder a simulação desejada, período esse que garante que a rede não inicie em vazio (sem qualquer veículo em circulação) e se encontre apta a fornecer resultados aceitáveis. Ou seja, importa definir um período inicial que permita a que os centróides debitem veículos na rede, deixando-a estabilizar em termos de procura de tráfego. Essa estabilização depende de inúmeros factores, de entre os quais se destaca a dimensão da rede e o grau de saturação.

Segundo Dowling et al. (2004) o período de *warm-up* é definido através do momento em que o número de veículos presentes na rede deixa de crescer por um mínimo especificado. Caso a velocidade média e o número de veículos não estabilizarem nos primeiros 15 minutos, existe a possibilidade de o analista ter considerado uma demanda maior que a capacidade do sistema.

3.5.Considerações finais

Os modelos de microssimulação são instrumentos utilizados para representar detalhadamente a realidade. O *software* Aimsun é uma ferramenta para análise de tráfego passível de representação de variados cenários. Dentre os principais resultados fornecidos pelo programa se pode citar: tempo de viagem, velocidade, fluxo, demora e fila de espera.

A procura de tráfego pode ser inserida no modelo baseado no seu fluxo de entrada e percentagem de movimento presente em cada nó. Existe, entretanto, outra opção que é a utilização da matriz OD. Para a estruturação da matriz O/D deve-se considerar todas as possibilidades de geração de viagem, onde as preferências são determinadas por factores quantificáveis, como caminho mais curto, intervalo de tempo, propósito de viagem, ou por factores mais difíceis de recolher como é o caso de conforto, paisagem ou segurança. Como forma de se determinar essas informações são considerados dois métodos, através de inquéritos com os utentes ou estimativa baseada em contagens de tráfego.

A principal característica desse *software* é a capacidade de simular os movimentos individuais de cada veículo presente na rede, pautados basicamente em três modelos comportamentais, são eles *lane-changing*, *gap-acceptance* e *car-following*. Sendo o primeiro relacionado com a mudança dos veículos de via, o segundo com a inserção de um veículo não prioritário em uma corrente prioritária, e o último a forma como um veículo precedente que pode ser condicionado pelo veículo que circula à sua frente.

O capítulo subsequente indica a metodololgia proposta utilizando o programa *Aimsun* para análise do desempenho do cruzamento em estudo.

4. Metodologia de abordagem

Este ponto apresenta genericamente a metodologia de abordagem adoptada para o desenvolvimento desta dissertação. Dadas as potencialidades associadas à microssimulação, optou-se por basear o trabalho na aplicação destas técnicas, o que potenciou o desenvolvimento de análises integradas, tendo por base diferentes indicadores de desempenho. É apresentada uma análise dos critérios que apoiaram a seleção do *software* utilizado para a pesquisa em questão. Em seguida é exposta a metodologia para recolha de dados de campo e definido um conjunto de cenários alternativos ao melhoramento do desempenho da interseção objecto de estudo.

Numa segunda fase são descritos os passos para a construção do modelo de simulação, suportado pelo Software *Aimsun*, dando particular relevância às tarefas de calibração e de validação do modelo.

Por fim, é realizada a comparação dos resultados relativos à aplicação de diferentes soluções alternativas, às quais são associados a cada um dos cenários correspondentes à previsível evolução da procura. Em síntese o procedimento adoptado encontra-se ilustrado no fluxograma da figura 9.

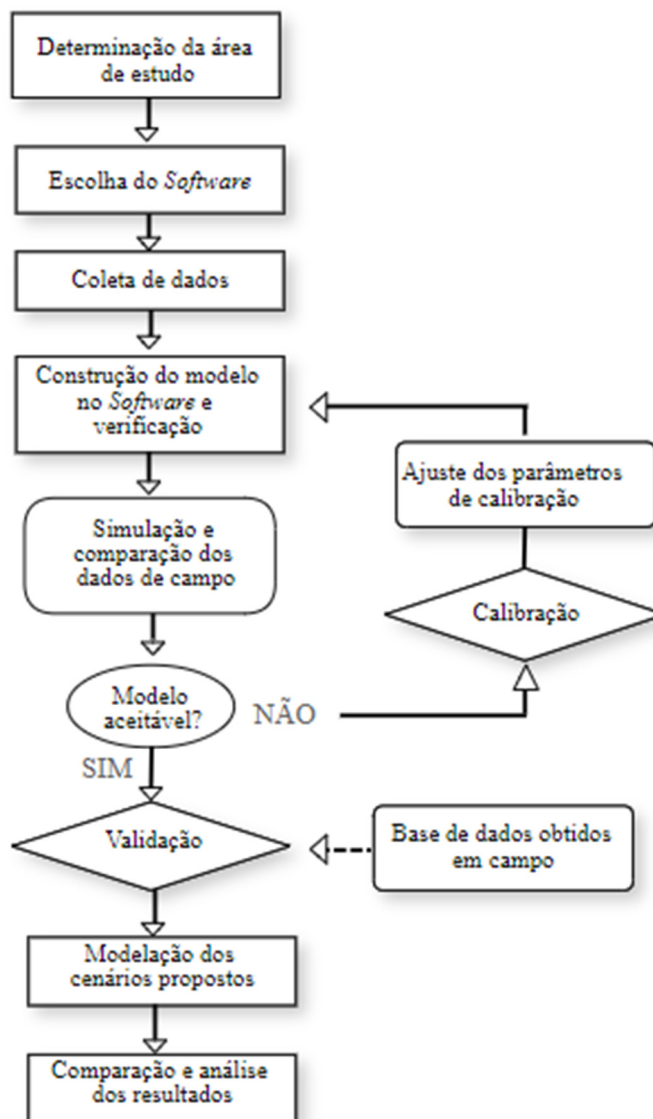


Figura 9 - Fluxograma da metodologia adotada para a pesquisa

4.1. Caracterização da área em estudo

Antes de definir a área objecto de estudo, considerou-se relevante desenvolver uma análise preliminar sobre o tipo de intervenção que se pretende concretizar. No caso de trabalhos voltados para o planeamento estratégico, é recomendável optar por áreas de intervenção mais extensas, com a finalidade de considerar o maior número de deslocamentos, e prever assim, de maneira confiável, o impacto dessa alternativa.

Contudo, em caso de intervenções de carácter operacional a análise poderá limitar-se a área confinadas ao local específico objecto de intervenção.

Também a organização das sessões de recolha de dados é outra problemática que influencia a identificação da área objecto de estudo. Importa verificar a possibilidade de realizar contagens e pesquisas na área seleccionada, ou ainda, certificar-se se a região possui mecanismos de coleta de dados automáticos ou de câmeras de monitorização.

Tendo todas as questões por base, optou-se por limitar a análise a uma intersecção emblemática da cidade de Leiria, a qual apresenta problemas de capacidade/funcionamento, sendo por isso relevante potenciar a definição e avaliação de medidas correctivas que permitam melhorar o seu desempenho global. Assim, foi seleccionado o cruzamento semaforizado em frente a Câmara Municipal de Leiria. Trata-se de uma intersecção de grande relevância para a cidade e que apresenta um elevado nível de congestionamento em horários de pico, muito devido à sua proximidade de instituições de ensino e de outros equipamentos urbanos importantes (Tribunal de Comarca, Centro Distrital de Segurança Social e Câmara Municipal). Complementarmente, refere-se ainda o interesse demonstrado por parte da Câmara Municipal de Leiria em utilizar os resultados e conclusões deste trabalho para, em conformidade, melhorar o desempenho da intersecção e zona envolvente.

Assim, em síntese, a intersecção seleccionada situa-se em Leiria, cidade localizada no centro de Portugal, numa zona urbana próxima do centro da cidade, conforme representa a figura 10, a qual assegura o acesso à A19 pela Rua Doutor João Soares, e gere o fluxo de tráfego com origem no centro da cidade, através da Rua Doutor José Jardim, e noutros espaços circundantes, através da Rua dos Mártires e Largo da República. A intersecção é composta por 4 ramos e dispõe de um controlo de tráfego semaforizado a tempos fixos.

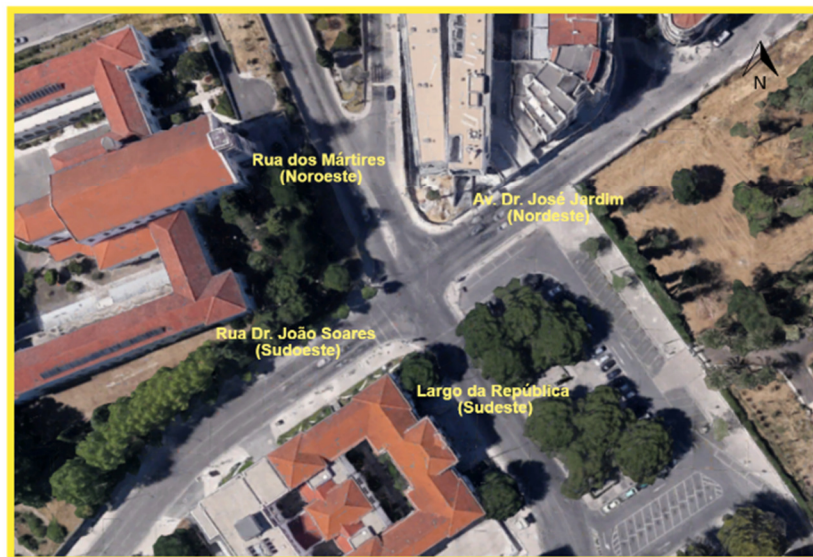


Figura 10 - Localização da área em estudo em Leiria

4.2. Escolha do *Software*

Segundo TRB (2000) importa relacionar os recursos que o modelo de simulação oferece às especificidades e aos objectivos da análise. Nesse enquadramento identificam-se os seguintes critérios mais relevantes para seleção do modelo: capacidade do *software* (dimensão da rede, nível de detalhe de representação da rede, representação do tráfego, composição do tráfego, operações de tráfego, controle de tráfego, resultados do modelo, dados de entrada, usabilidade e recursos necessários), sendo esse um dos mais relevantes para a escolha, além da disponibilidade de dados, facilidade de utilização e recursos necessário.

O modelo escolhido para a modelação, no âmbito do presente estudo foi o *software* AIMSUN (Advance Interactive Micro-simulation for Urban and Non-Urban Networks) versão 8.1 disponibilizado pela Universidade de Coimbra, o qual já foi definido antes de se iniciar a pesquisa. Dessa forma, o estudo de caso foi condicionado a satisfazer as características do programa, substituindo a ordem comum utilizada para modelos de microssimulação.

4.3.Recolha de dados e Análise de tráfego

O procedimento para recolha de dados baseou-se em contagens de campo, complementada pela informação constante do relatório de “Requalificação da Rotunda D. Dinis e da Nova Rotunda da Praça da República em Leiria” de Engimind (2018), graciosamente disponibilizado pela Câmara Municipal de Leiria. Os valores das contagens realizadas pela empresa contratante foram sujeitos a uma análise crítica inicial, tendo sido considerados como representativos dos níveis de procura atual no cruzamento. Também a evolução natural do tráfego e a geração de tráfego devido a novos empreendimentos previstos para os espaços adjacentes foram da mesma forma, dados retirados do relatório para uma previsão de projeção futura.

Relativamente aos dados geométricos, recorreu-se à fotografia aérea e ao sistema de informação geográfica, que permitiram atualizar a cartografia local fornecida pela Câmara Municipal de Leiria.

O processo da recolha de dados exigiu várias visitas ao local para validação da informação compilada e organização de sessões de recolha complementar. De seguida é detalhado o procedimento adoptado para recolha de cada uma das variáveis/parâmetros necessários à construção de base do modelo.

4.3.1. Características geométricas

A caracterização da rede viária foi baseada no levantamento de dados geométricos relativos às vias (secção), a qual procurou ser ampla e completa abrangendo dados como: tipologia de arco, seu comprimento, largura, as vias reservadas/partilhadas, velocidade em regime livre, curvatura e declives; e as intersecções (nós)/modos de regulação, no que tange os movimentos preferenciais e grupos semaforicos.

No estudo presente optou-se em utilizar imagens do *Google Earth* como base para a suporte dos trabalhos de codificação da rede, confirmados com a planta geométrica disponibilizada pela Câmara Municipal de Leiria.

Sendo assim foi possível detalhar a intersecção, sendo que no sentido sudoeste o ramo dispõe de dois sentidos de circulação, sendo 2 das vias associadas à entrada e 1 à saída do cruzamento, as vias de entrada cada uma delas com 3,20 m de largura e a de saída com 3,70 m. No ramo sudeste, são igualmente disponibilizados os 2 sentidos de circulação, com 4 vias de circulação, sendo 2 de entrada e 2 de saída. Ambas possuem largura média de 3,15 m. Já no sentido nordeste, o ramo possui um sentido único de circulação, disponibilizando 4 vias de entrada na intersecção, com 2,70 m de largura cada uma delas. Por fim, o ramo no sentido noroeste possui dois sentidos, dos quais 2 vias são de entrada com largura média de 3,00 m. As medidas tiveram de ser adaptadas ao modelo, pois não é possível se considerar largurar diferentes de vias para um mesmo ramo.

4.3.2. Contagens de tráfego

As contagens de tráfego foram realizadas pela empresa Engimind, contratada pela Câmara Municipal de Leiria, a qual realizou contagens direcionais para cada um dos movimentos direcionais identificados na figura 11.

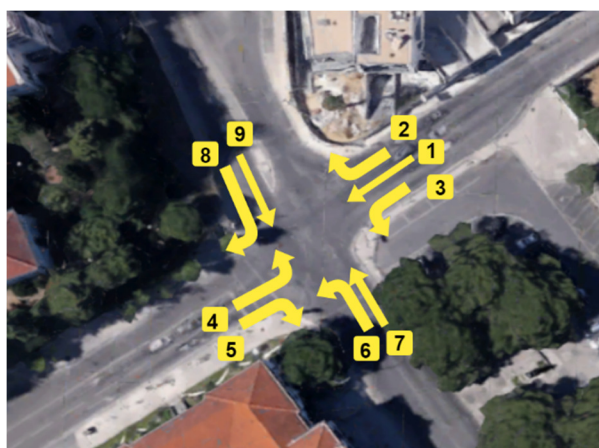


Figura 11 – Numeração dos movimentos direcionais do cruzamento em estudo

Com o objetivo de se obter resultados mais precisos a contagem foi dividida em dois períodos, pelo período de ponta da manhã (PPM) e pelo período de ponta da tarde (PPT), na data do dia 11 de abril de 2018. O intervalo de tempo considerado para contagem foi em

períodos de 15 minutos entre 07:30 - 09:30 no PPM, e entre 17:30 - 9:30 no PPT. As tabelas 2 e 3 apresentam uma súmula das contagens efetuadas em cada período diferenciado por movimento, tendo-se convertido as diferentes tipologias de veículos em unidades de veículos ligeiros equivalentes (uvl). Para o efeito foram tidas em consideração os seguintes factores de conversão 1 uvl → 1 ligeiro e 2 uvl's → 1 pesado.

Tabela 2 - Valores da contagem de tráfego para o PPM (uvl/h) (Adaptado de Engimind, 2018)

Período	Mov. 1		Mov. 2		Mov. 3		Mov. 4		Mov. 5		Mov. 6		Mov.7		Mov.8		Mov. 9	
	lig.	pes.	lig.	pes.	lig.	pes.	lig.	pes.	lig.	pes.	lig.	pes.	lig.	pes.	lig.	pes.	lig.	pes.
07:30-07:45	12	1	21	0	11	1	9	1	7	0	10	0	51	0	6	1	31	1
07:45-08:00	16	0	17	0	17	3	18	0	28	1	10	0	47	0	7	1	26	2
08:00-08:15	48	3	55	1	22	0	59	1	61	1	14	0	126	0	31	1	74	0
08:15-08:30	59	3	47	0	22	1	67	1	76	1	38	1	136	1	57	1	84	0
08:30-08:45	72	3	50	0	26	0	60	2	79	1	48	0	118	2	62	2	69	0
08:45-09:00	69	2	40	1	35	2	52	2	63	3	53	0	140	0	55	0	92	1
09:00-09:15	61	2	59	1	34	0	43	3	59	2	54	0	127	0	49	0	98	0
09:15-09:30	54	1	41	0	28	2	55	3	38	2	36	1	108	1	22	0	84	1

Tabela 3 - Valores da contagem de tráfego para o PPT (uvl/h) (Adaptado de Engimind, 2018)

Período	Mov. 1		Mov. 2		Mov. 3		Mov. 4		Mov. 5		Mov. 6		Mov.7		Mov.8		Mov. 9	
	lig.	pes.	lig.	pes.	lig.	pes.	lig.	pes.	lig.	pes.	lig.	pes.	lig.	pes.	lig.	pes.	lig.	pes.
17:30-17:45	69	3	44	1	29	2	59	2	61	2	45	0	106	0	51	1	83	0
17:45-18:00	78	0	50	0	53	0	49	3	68	1	56	1	123	2	38	0	92	0
18:00-18:15	84	2	53	0	41	1	51	1	53	1	67	0	124	0	49	2	95	0
18:15-18:30	77	2	56	0	40	1	61	3	73	2	59	0	166	0	38	0	106	0
18:30-18:45	71	1	42	1	46	1	46	1	67	1	56	0	140	1	35	1	108	0
18:45-19:00	59	3	41	0	43	1	38	2	46	1	62	0	117	0	26	0	106	0
19:00-19:15	58	0	44	0	45	0	43	2	58	0	41	0	114	0	18	0	96	0
19:15-19:30	40	2	46	1	46	1	44	2	50	0	29	0	78	0	23	1	91	1

Como resultado das contagens realizadas, foi possível avaliar a evolução da procura de tráfego ao longo do período de ponta, para cada movimento, conforme representa os gráficos das figuras 12 e 13.

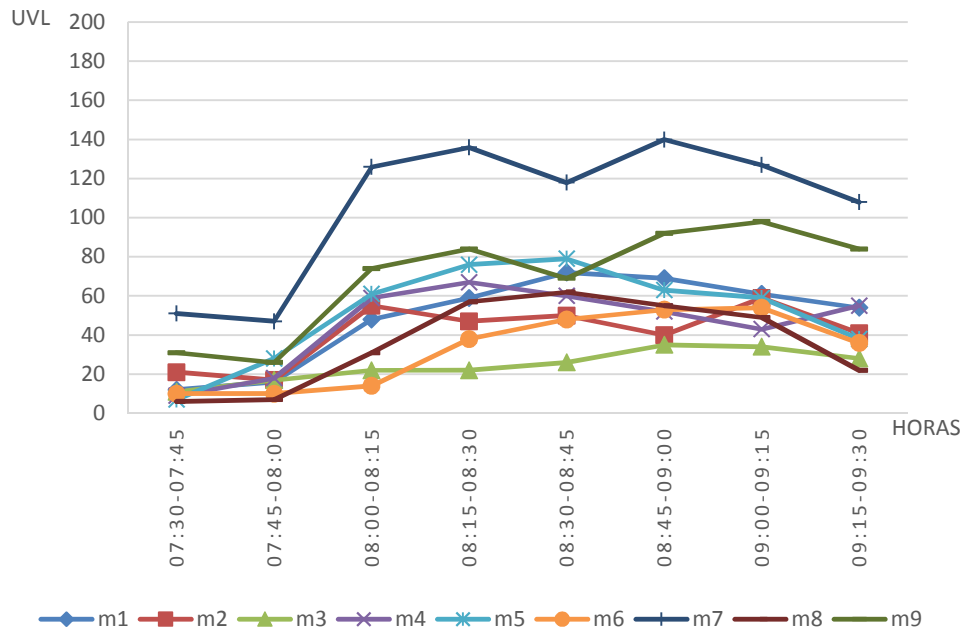


Figura 12- Resultados da contagem de tráfego no PPM (Uvl/15min)

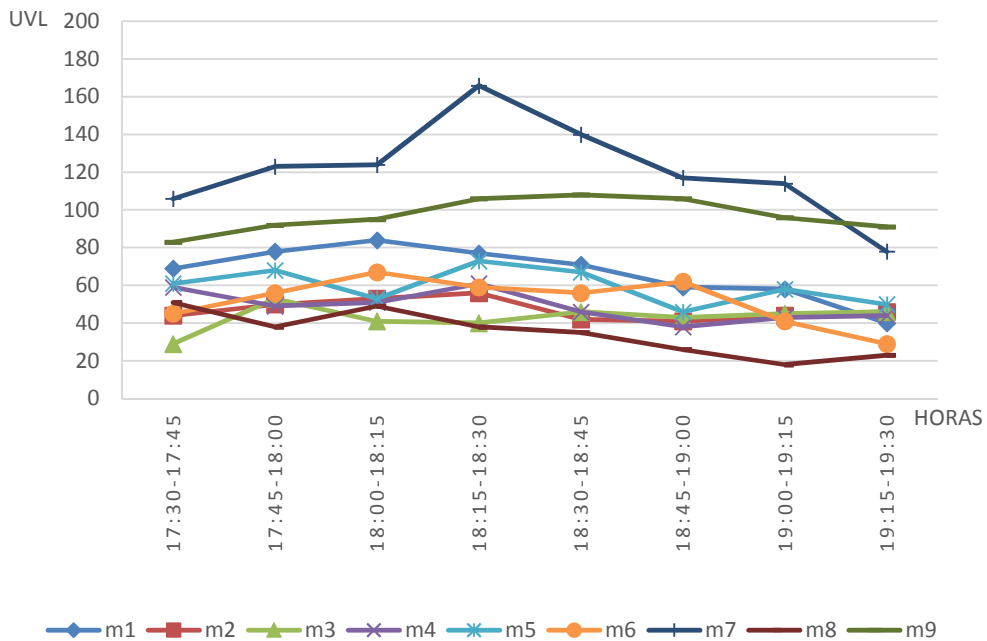


Figura 13 - Resultados da contagem de tráfego no PPT (Uvl/15min)

Assim, da análise dos resultados das contagens do cruzamento concluiu-se que o horário de ponto da manhã (HPM) se situa entre as 08:15 – 09:15 e o horário de ponta da tarde (HPT) entre as 18:15 – 19:15. Posteriormente, o volume de tráfego em uvl foi calculado para a hora de ponta, podendo os resultados serem observados nas figuras 14 e 15.

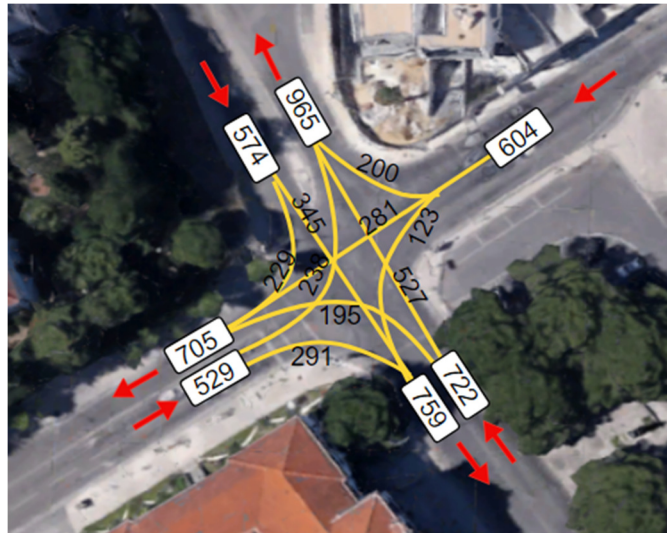


Figura 14 - Valores de volume de tráfego para HPM (uvl/h)

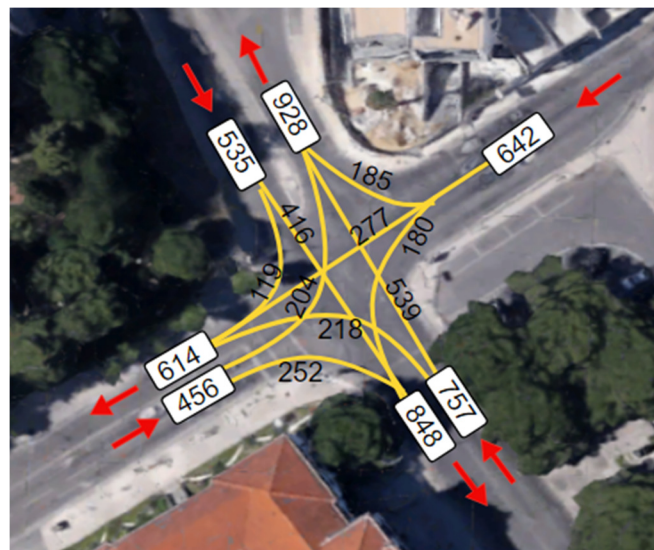


Figura 15 - Valores de volume de tráfego para HPT (uvl/h)

4.3.3. Avaliação das filas de espera

Uma vez que o estudo da Engimind não disponibilizava o comprimento das filas de espera, optou-se por registá-las directamente *in loco* para os períodos de ponta da manhã e da tarde.

Recorreu-se ao método de Webster, assumindo que a fila de espera corresponde ao número de veículos que, estando já parado no cruzamento no instante em que abre o verde, permanece em fila depois de terminar o período de verde. Dados os efeitos estocásticos e a variabilidade da procura do tráfego no tempo, optou-se por medir as filas em 3 ciclos sucessivos como forma de esbatimento desses efeitos. Os resultados obtidos para a HPM e HPT encontram-se sintetizados na tabela 4 e 5. Através da figura 16 pode se observar os postos de contagem considerados.

Tabela 4 - Valores da contagem em campo de fila média (uvl) em cada via que chega a intersecção para HPM

Posto	Contagem	Campo	
		via esquerda	via direita
1	1°	12	3
	2°	11	2
	3°	8	4
	média	11,00	3,00
2	1°	21	8
	2°	20	6
	3°	21	3
	média	21,00	6,00
3	1°	1	17
	2°	2	24
	3°	2	21
	média	2,00	21,00
4	1°	22	
	2°	24	
	3°	23	
	média	23,00	

Tabela 5 - Valores da contagem em campo de fila média (uvl) em cada via que chega a intersecção para HPT

Posto	Contagem	Campo	
		via esquerda	via direita
1	1°	31	2
	2°	29	5
	3°	28	2
	média	30,00	3,00
2	1°	23	7
	2°	21	11
	3°	15	11
	média	20,00	10,00

3	1°	4	14
	2°	3	8
	3°	3	10
média		4,00	11,00
4	1°	31	
	2°	32	
	3°	30	
média		31,00	



Figura 16 - Indicação dos postos de contagem para obtenção dos valores de fila média de veículos

Estes dados permitiram não só aferir os fluxos de entrada no sistema, como serviram de base aos processos de calibração e validação apresentados no ponto 4.4.3.

4.3.4. Evolução da procura de tráfego

Optou-se por considerar o ano horizonte de 2028, correspondente a um período de dimensionamento de 10 anos. Esta assumpção respeita as referências da especialidade associadas ao dimensionamento de intersecções, em zonas urbanas não consolidadas, correspondendo, de forma geral ao período de vigência dos Planos Directores Municipais (PDM).

A estimação da procura futura baseou-se igualmente no relatório da Engimind do ano de 2018. O relatório considerou a contribuição de duas parcelas para se obter resultados confiáveis de demanda futura, são eles a evolução natural do tráfego e a geração de tráfego

por empreendimentos habitacionais e comerciais próximos. Sendo o primeiro representado pelo aumento do uso de veículos, e o segundo, o aumento direto devido a atividades dos estabelecimentos contíguos.

A evolução natural do tráfego resulta da demanda atual associada a uma taxa de crescimento anual. A metodologia para determinar a evolução até o ano horizonte de projecto previsto baseou-se nos valores de venda de combustíveis no município de Leiria. Dessa forma, obtiveram-se os valores representados na tabela 6.

Tabela 6 - Fator de crescimento e taxa de crescimento anual média (Adaptado de Engimind, 2018)

	Horário de ponta		Tráfego Médio Diário Anual	
	Fator de crescimento	Tx. de cresc. anual média	Fator de crescimento	Tx. de cresc. anual média
2018/2028	1,04	0,47%	1,10	1,03%

A implantação de um novo supermercado Pingo Doce Leiria e o loteamento Quinta da Malta em torno da área em estudo tende a influenciar, de forma direta, a projeção da procura de tráfego no cruzamento, pelo que foram tidos em conta, no âmbito do presente estudo. Optou-se assim por utilizar os valores de geração e distribuição do tráfego apresentados no trabalho da Engimind, o qual foi baseado na aplicação de índices de geração de tráfego estabelecidos para superfícies comerciais com características similares. As figuras 17 e 18 apresentam os resultados obtidos da procura de tráfego projectada para o ano de 2028.

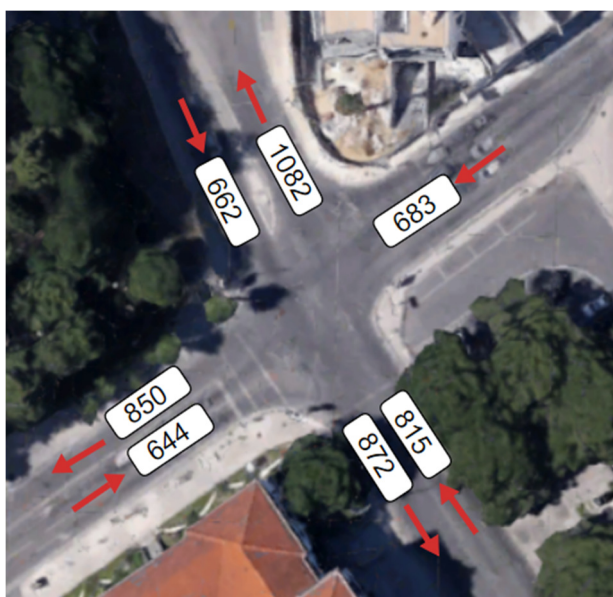


Figura 17 - Estimativa de demanda futura de tráfego (uvl/h) para HPM em 2028

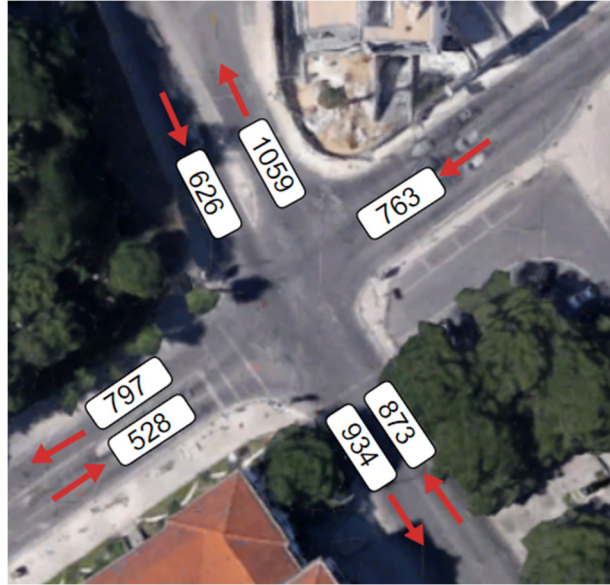


Figura 18 - Estimativa de demanda futura de tráfego (uvl/h) para HPT em 2028

4.3.5. Tipologia de veículos

Apesar do *software* possibilitar a introdução de diversas matrizes diferenciadas por tipologia de veículos, por uma questão de facilitação do uso dos dados disponibilizados pela Engimind, optou-se por considerar uma matriz OD global convertida em uvl. Refira-se adicionalmente que o relatório da Engimind já assumia duas tipologias de veículos, a saber ligeiros e pesados, tendo os pesados sido convertidos em ligeiros, recorrendo ao factor de conversão de 2. Os valores médios das características foram os valores *default* do *software*, para o veículo ligeiro.

4.3.6. Modo de Regulação – Plano de temporização

Os semáforos são dispositivos de controlo, os quais permitem separar no tempo a passagem de movimentos conflituantes, conferindo-lhe segurança e fluidez. Os semáforos funcionam em ciclo, o qual é subdividido em diversas fases. Em cada fase, o sinal verde, o qual autoriza o avanço da correspondente corrente de tráfego, é seguido de um tempo de transição que separa o fim do sinal verde para o início da próxima fase verde, com a função de limpar o cruzamento e assim oferecer segurança aos condutores durante as mudanças de fase. Esta transição engloba o sinal amarelo, o qual possui a função de alertar o condutor para a chegada do sinal vermelho, e o sinal vermelho que determina a parada imediata do condutor.

O cruzamento em análise possui quatro ramos controlados por semáforos, conforme se observa na figura 19.



Figura 19- Semáforos do cruzamento em estudo

O plano de temporização vigente foi igualmente fornecido pela Câmara Municipal de Leiria, o qual foi posteriormente validado com visitas de campo. Por se tratar de um plano de regulação elaborado em 1998 registaram-se algumas alterações no faseamento, as quais foram tidas em conta na presente análise tendo-se para o efeito atualizado os valores disponibilizados com base nos valores observados.

Após a confirmação em campo constatou-se que o plano de controlo atual assenta num ciclo de 110s, sub-divididos em quatro fases que acomodam 9 movimentos direcionais, conforme se observa na figura 20.

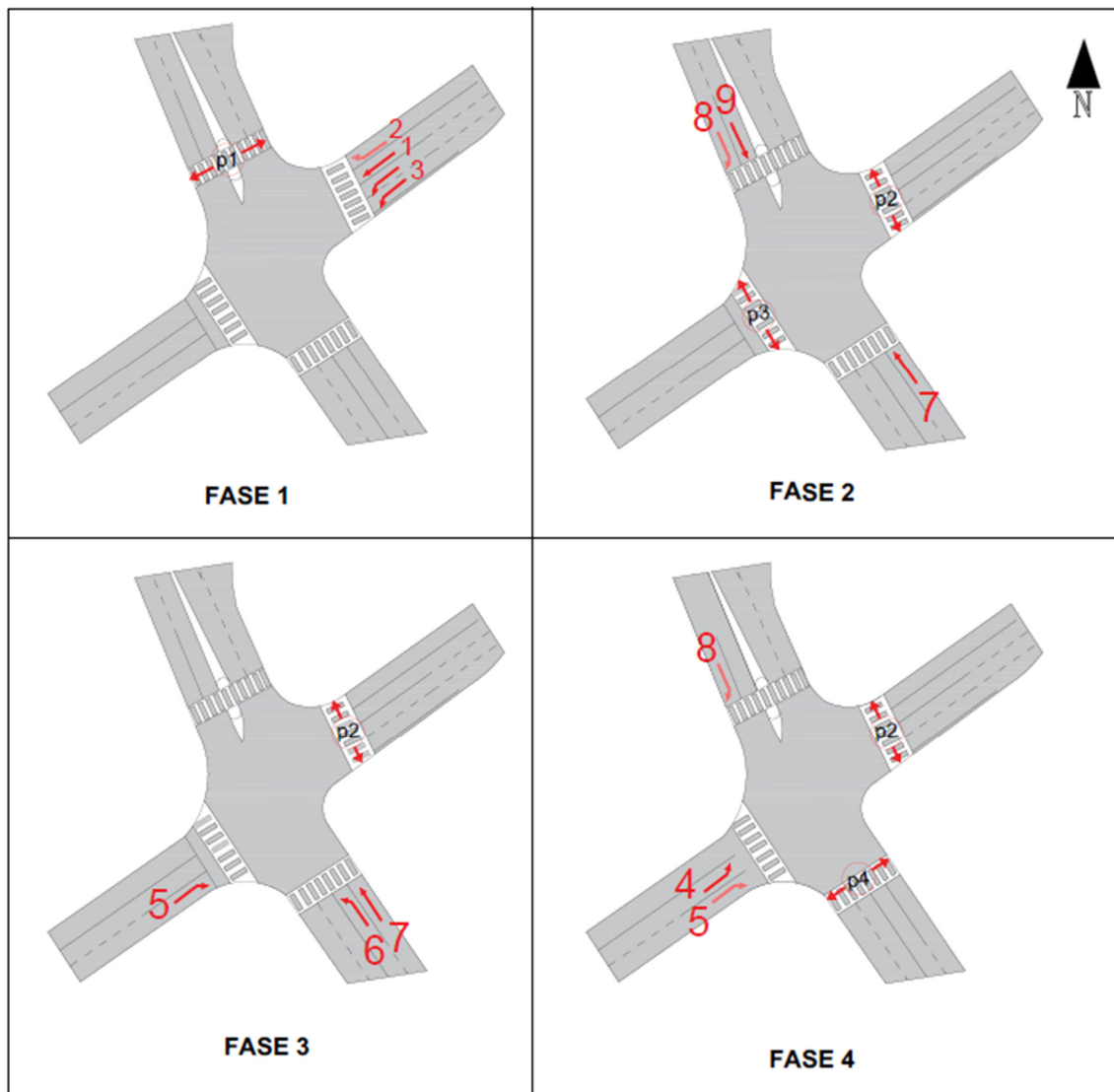


Figura 20 - Faseamento do cruzamento em estudo

Os dados disponibilizados suportaram a definição da temporização sub-dividida em luz verde (passagem permitida), luz amarela fixa (passagem proibida, salvo em situações em que o veículo se encontra próximo a linha da paragem e não possa parar), luz amarela intermitente (passagem permitida, desde que se cumpra a regra de prioridade/cedência de prioridade ao peão) e luz vermelha (passagem proibida). Como resultado das contagens e do correspondente cálculo das cargas, obteve-se o faseamento do movimento veicular e pedonal, tal como representa a figura 21.

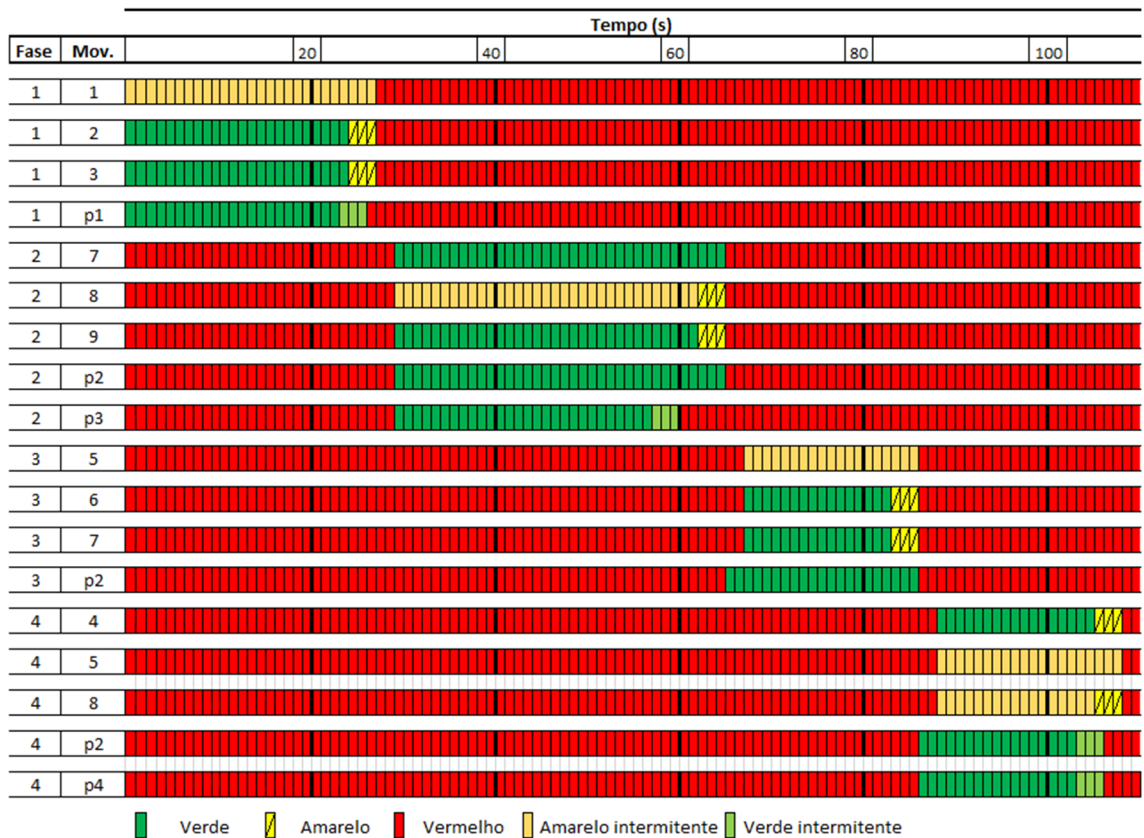


Figura 21 - Plano de regulação de cruzamento em estudo

4.4. Construção do modelo de simulação

4.4.1. Codificação da rede

A codificação da rede é a primeira etapa a ser executada para construção do modelo de simulação. Para a realização dessa etapa recorreu-se à base uma imagem retirada do *Google Street View* e inserida na escala ideal. Ferramentas complementares como o *Google Street View* e *Google Earth* permitiram obter detalhes da rede, os quais nem sempre se revelam de fácil acesso.

A codificação da rede assentou na cartografia e fotografia aérea, onde cada elemento infraestrutural está associado a uma caixa de diálogo a qual sistematiza as suas características de base, tais como: tipo de via, velocidade máxima, capacidade, inclinação, etc. Seguidamente foram criados os nós na conexão entre os vários segmentos (arcos), e os diversos conectores para materializar os movimentos de mudança de direção ou prosseguir a sua marcha. Também cada nó está associado a um conjunto de características, como direção de cada movimento; modelo de regulação; grupos semafóricos, etc.

Após a criação de segmentos e do nó, foram definidas as linhas de eixo contínuas e introduzidas as travessias pedonais. Posteriormente foram definidas as correntes de tráfego e o plano de temporização, conforme figura 22. Essas informações foram inseridas ao nível do plano de controle do cruzamento.

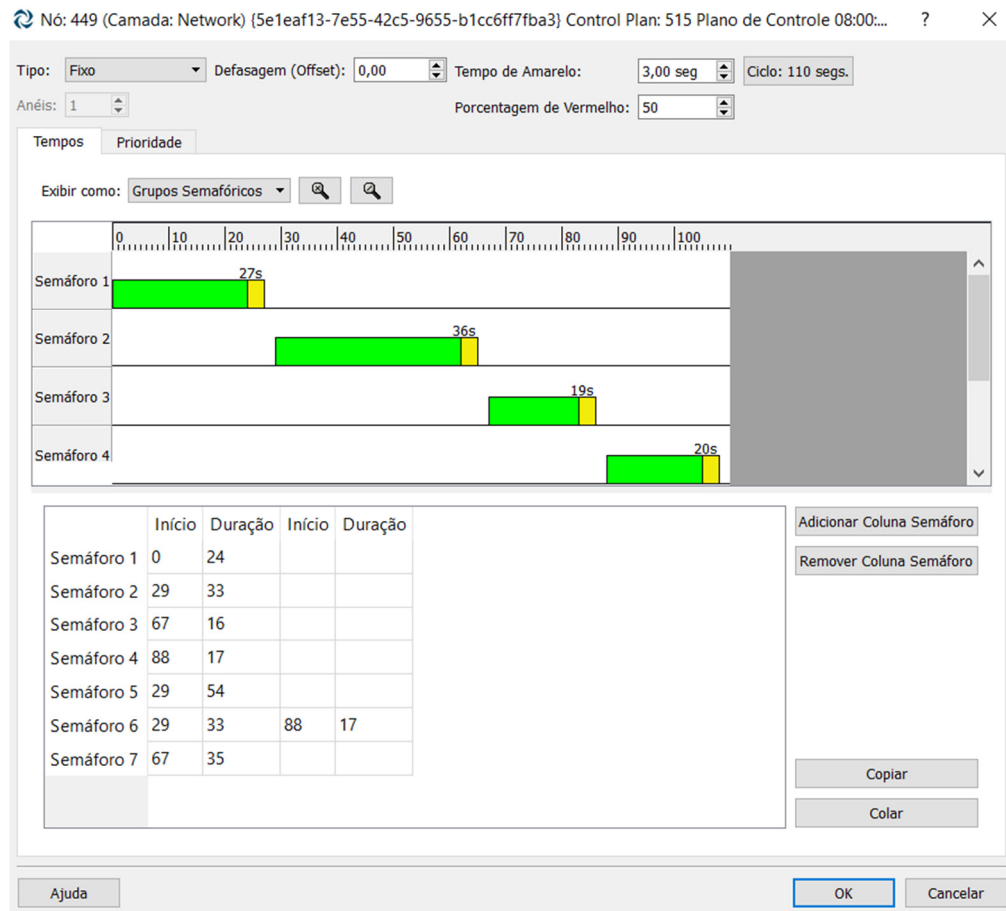


Figura 22 - Criação do plano de controle no AIMSUN

De forma a potenciar o carregamento de diferentes planos de controle, a funcionar em diferentes períodos de tempo se necessário, foi criado o plano de controlo “master”. Esse plano foi configurado para iniciar às 08:00 e durar 01 hora e 15 minutos, a fim de considerar 15 minutos de *warm-up* (tal como apresentado no subcapítulo 3.4) - ver figura 23.

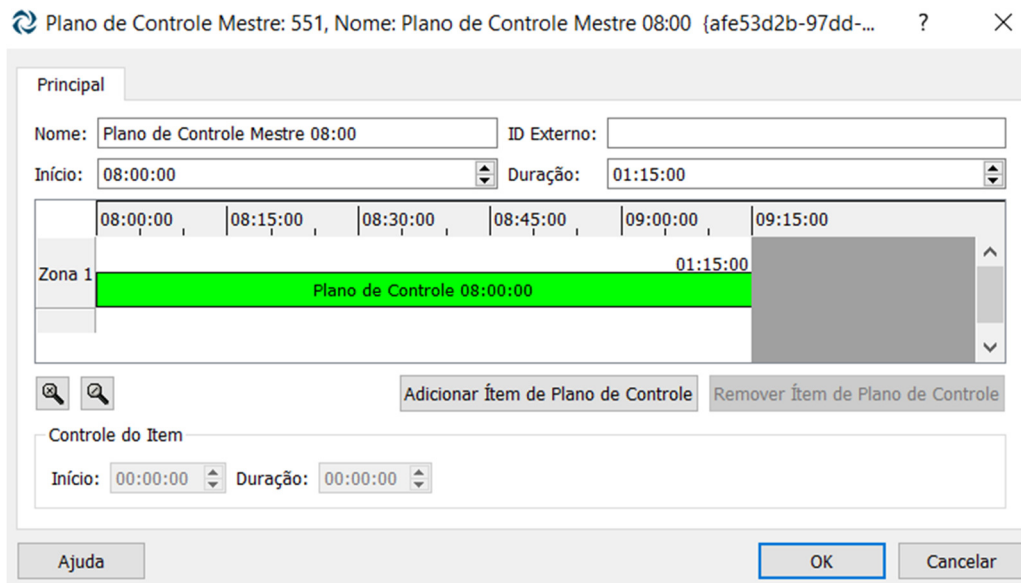


Figura 23 - Configuração do plano de controle “master” no AIMSUN

4.4.2. Construção da matriz O/D

A construção da matriz OD, baseou-se numa configuração geométrica de centróides. A partir destes definiram-se as vias que geram ou atraem fluxos de tráfego, como forma de quantificar o volume de veículos que entram e saem do cruzamento, conforme apresenta a figura 24.

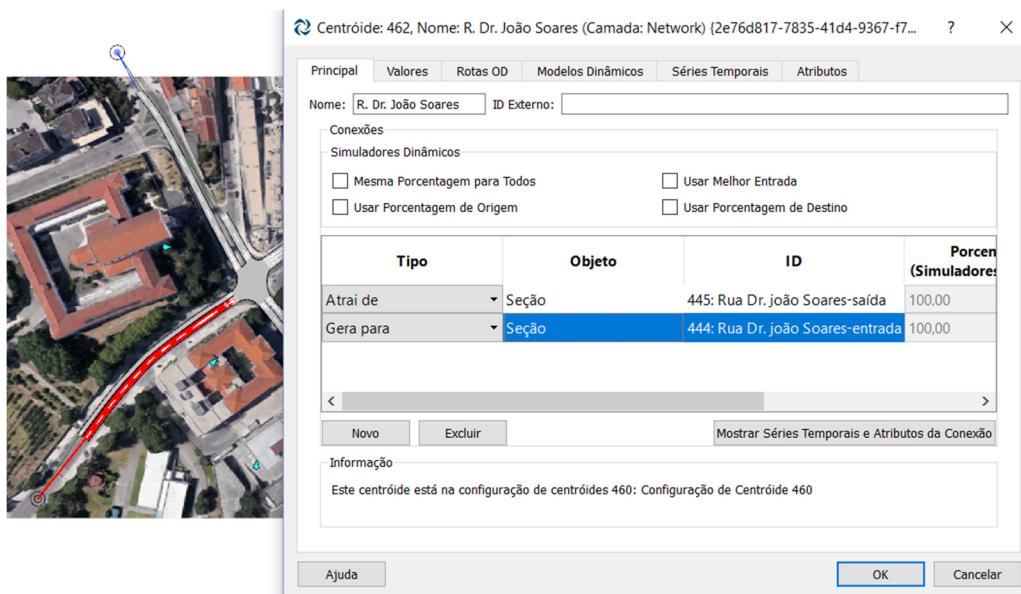


Figura 24 - Criação dos centróides no AIMSUN

A definição dos centróides permitiu criar a matriz OD para a HPM, como representa a figura 25, para a tipologia de veículo (ligeiro) definida anteriormente, tendo por base os valores das contagens de tráfego convertidas em uvl/h, para cada movimento direcional. Devido ao período de aquecimento (*warm-up*) foi necessário multiplicar cada valor das células por 1,25.

Figura 25 - Matriz O/D para horário de ponta da manhã (HPM) no AIMSUN

De forma a esbater o efeito estocásticos do tráfego, optou-se por considerar 10 replicações adoptando-se o correspondente valor médio.

Terminada a fase de construção do modelo os trabalhos incidiram sobre a adequação do modelo para representar uma determinada realidade. Este procedimento permitiu identificar falhas na simulação e que foram corrigidas (revisão da codificação, da matriz) até representar de forma minimamente representativa da realidade.

Os componentes essenciais a serem verificados no modelo de microsimulação são: a configuração geométrica das vias e dos nós, e os correspondentes atributos e modos de regulação como sinais luminosos e detectores; a configuração do plano de regulação semafórica e dos movimentos permitidos; a representação da demanda de tráfego pela matriz OD e a conferência do comportamento individual de cada veículo baseado nos sub-modelos *lane-changing*, *gap-acceptance* e *car-following*.

4.4.3. Calibração e validação do modelo

Este ponto apresenta de forma sumária os trabalhos de calibração e de validação do modelo.

4.4.3.1. Calibração

O processo de calibração para além da sua relevância para assegurar a adequação do modelo aos objectivos do estudo, tende a ser complexo o que deverá obrigar à definição de uma planificação dos trabalhos em fase anterior à recolha de dados.

Os modelos de microssimulação de tráfego fornecem variados resultados (medidas de desempenho) que reproduzem as condições do trânsito, tais como o tempo de deslocação, o atraso, comprimento médio de fila, velocidade, volume, densidade, entre outros. Em consequência, alguns destes valores podem ser directamente comparados aos valores observados no campo. Nesse contexto, a etapa de calibração do presente trabalho centrou-se na comparação dos dados simulados e observados ao nível dos comprimentos de fila de espera (unidades de veículos) presentes em cada via de cada segmento do cruzamento, uma vez que tal observação não carece de equipamentos ou técnicas especiais para medição.

O comprimento das filas foi registado a partir de contagens directas ao local de estudo, no dia 16 de maio (quinta-feira) de 2019, na HPM, no intervalo entre 08:45-09:05. Apenas para o posto 4, e dada a dificuldade em segregar os diferentes movimentos direccionais, o registo apresentado corresponde à fila global.

A calibração do modelo pode ser baseada no ajuste incremental de vários parâmetros de calibração, muitos deles caracterizadores do comportamento do condutor face a diferentes condições de circulação. No entanto, para o estudo em questão optou-se por limitar o ajuste a um conjunto limitado de parâmetros cuja definição depende de país para país e de região para região, designadamente: a aceleração máxima, o tempo de reacção, tempo de reacção em pare, tempo de reacção em semáforo. Para os restantes parâmetros mantiveram-se os valores *default* apresentados pelo *software*.

O processo de calibração iniciou-se por correr o modelo mantendo todos os parâmetros com os seus valores *defaults*, valores esses apresentados na Tabela 7. Posteriormente, cada um destes parâmetros foi sendo incrementado ou reduzido sequencialmente até se obterem valores de filas de espera próximos dos registados directamente no local.

Tabela 7 - Valores defaults dos parâmetros no Aimsun

Parâmetro	Unidade	Default
Aceleração máxima	m/s ²	3,00
Tempo de reação	s	0,80
Tempo de reação em pare	s	1,20
Tempo de reação em semáforos	s	1,60

De forma geral, a *aceleração máxima* corresponde ao valor máximo da aceleração que o veículo pode atingir em qualquer situação, dentro dos limiares de conforto. Trata-se de um parâmetro com grande relevância para os sub-modelos comportamentais *gap-acceptance* e *car-following*. Quanto ao primeiro sub-modelo, a capacidade de acelerar e evitar a colisão com outro veículo conflituante, influencia o intervalo de segurança requerido, mas também a facilidade com que um veículo secundário se insere na corrente principal. Já o segundo sub-modelo caracteriza o comportamento do veículo que segue um determinado veículo líder, nos seus movimentos de aproximação ao líder.

Já o *tempo de reação* influencia o comportamento dos veículos não somente a tipologia veicular, mas sim ao nível da rede como um todo. Adota-se um valor constante e comum a todos os condutores presentes na simulação. Define-se como o tempo de reação que um condutor em movimento leva para reagir a mudança de velocidade do veículo precedente. Devido a essa característica influencia o sub-modelo comportamental *lane-changing*.

O *tempo de reação parado*, é dividido em tempo de reação em paragem (tempo que leva para um veículo parado reagir à aceleração do veículo à frente) e *tempo de reação no semáforo* (tempo que leva para o primeiro veículo parado em frente ao semáforo reagir a abertura do mesmo). Note-se que esse parâmetro tem influência direta na dissipação da fila de espera.

Como referido anteriormente, o procedimento de calibração passou por fazer variar incremental e individualmente cada um destes parâmetros de entrada, uma vez que a alteração desses valores segue uma certa lógica e se realiza em etapas.

Para efeito de cálculo, considerou-se apenas os valores de fila mais significativas de cada ramo, e como resultados os movimentos 1, 2, 3, 4, 7 e 9 foram os maiores valores encontrados. A tabela 8 apresenta os valores de fila de espera (uvl) levantados em campo para os movimentos relevantes.

Tabela 8 - Valores de fila de espera em uvl/15min contabilizados na HPM

Ramos	Movimento	Contagem	Campo
1	9	1°	12
		2°	11
		3°	8
		média	11,00
2	4	1°	21
		2°	20
		3°	21
		média	21,00
3	7	1°	17
		2°	24
		3°	21
		média	21,00
4	1,2,3	1°	22
		2°	24
		3°	23
		média	23,00

A primeira modelação tendo por base os valores *defaults* quando comparados com os dados observados denunciaram algum desajustamento dos valores, o que justificou a necessidade de proceder à calibração de parâmetros. O primeiro parâmetro alterado foi a *aceleração máxima*, realizou-se a sua redução e incremento de forma a avaliar se as filas se aproximavam ou distanciavam das filas recolhidas em campo. A tabela 9 apresenta os seus os valores médios observados resultantes da alteração dos valores de aceleração.

Tabela 9 - Calibração dos valores de aceleração máxima para HPM

Parâmetro	Ramo	1ª Etapa							
		2,6	2,7	2,8	2,9	3,1	3,2	3,3	3,4
Aceleração máxima (m/s ²)	1	10,00	10,00	10,00	10,00	7,00	7,00	7,00	8,00
	2	7,00	7,00	7,00	7,00	5,00	5,00	5,00	5,00
	3	7,00	8,00	8,00	8,00	11,00	11,00	11,00	11,00
	4	11,00	11,00	11,00	11,00	14,00	14,00	14,00	14,00

De acordo com a tabela 9, notou-se que a redução ou incremento dos valores da aceleração não influenciaram significativamente nos resultados, sendo assim se optou em manter o valor *default* para esse parâmetro.

Em seguida se alterou o parâmetro *tempo de reação* através do incremento de seu valor, a fim de aumentar o número de veículos presentes na fila de espera. Os resultados estão representados na tabela 10.

Tabela 10 - Calibração dos valores do tempo de reação para HPM

Parâmetro	Ramo	2ª Etapa					
		0,9	1	1,1	1,2	1,3	1,4
Tempo de reação (s)	1	7,00	7,00	7,00	7,00	7,00	7,00
	2	5,00	5,00	5,00	5,00	6,00	7,00
	3	11,00	11,00	11,00	11,00	11,00	11,00
	4	14,00	14,00	14,00	14,00	14,00	14,00

Observou-se ainda que não houve alteração considerável dos valores médios, pelo que optou por manter o valor *default*. O mesmo procedimento foi repetido para o parâmetro *tempo de reação (pare)*, estando os resultados resumidos na tabela 11.

Tabela 11 - Calibração dos valores de tempo de reação (pare) para HPM

Parâmetro	Ramo	3ª Etapa				
		1,30	1,40	1,50	1,60	1,70
Tempo de reação - pare (s)	1	7,00	7,00	7,00	7,00	7,00
	2	5,00	5,00	5,00	6,00	7,00
	3	11,00	11,00	11,00	11,00	11,00
	4	14,00	14,00	14,00	14,00	14,00
	Ramo	1,80	1,90	2,00	2,05	2,07
	1	7,00	7,00	7,00	6,00	12,00
	2	9,00	15,00	15,00	28,00	26,00
	3	11,00	11,00	11,00	8,00	20,00
	4	14,00	14,00	14,00	18,00	17,00

Os resultados da tabela 11, permitem concluir que a partir do tempo de reação (1,9 s) começou a haver alteração nas filas médias resultantes do modelo, pelo que se optou por continuar a incrementação o parâmetro até se alcançar os valores de fila média observados no campo. Apesar do valor elevado de tempo de reação (*pare*), considerou-se a possibilidade de continuar a incrementá-lo devido a inclinação de dois dos ramos, assim sendo aceitável um tempo de reação maior para regressar ao movimento. O valor foi incrementado até 2,07 s e executado a medição das filas, como resultado se obteve valores muito próximos ao medidos em campo, logo fixou-se os valores de *tempo de reação (pare)* como 2,07 s.

Por fim, com o valor de *tempo de reação (pare)* fixado, realizou-se a alteração de forma incremental do parâmetro de *tempo de reação (semáforo)*, estando os resultados se resumidos na tabela 12.

Tabela 12 - Calibração dos valores de tempo de reação (semáforo) na HPM

Parâmetro	Ramo	2ª Etapa			
		1,7	1,8	1,9	2,0
Tempo de reação - semáforo (s)	1	12,00	12,00	12,00	12,00
	2	29,00	29,00	29,00	31,00
	3	18,00	20,00	17,00	19,00
	4	17,00	17,00	17,00	17,00

Da mesma forma que a *aceleração máxima* e *tempo de reação*, não se notou alteração significativa dos valores das filas médias com o incremento do *tempo de reação (semáforos)*, tendo-se assim mantido o seu valor *default*.

Optou-se em não utilizar o tempo de atravessamento pedonal no plano de regulação, devido à dificuldade em quantificar de forma precisa esses valores, o que acaba por interferir na precisão final dos resultados obtidos.

O processo de calibração terminou no momento em que os resultados modelados foram considerados próximos dos observados no campo. A representação do erro percentual médio obtido através da relação dos valores calibrados com os valores de campo, podem ser observadas na tabela 13.

Tabela 13 - Erro percentual entre valores medidos em campo e valores obtidos através do modelo

Ramo	Contagem de veículos		
	Campo	simulação	erro (%)
1	11,00	12,00	9,09
2	21,00	26,00	23,81
3	21,00	20,00	4,76
4	23,00	17,00	26,09
		erro médio	15,94

Ao fim do processo de calibração dos parâmetros, os valores resultantes utilizados no modelo foram: aceleração máxima ($3,00 \text{ m/s}^2$), tempo de reação ($0,80 \text{ s}$), tempo de reação - pare ($2,07 \text{ s}$) e tempo de reação - semáforo ($1,60 \text{ s}$). Apesar do erro resultante assumir valores não negligenciáveis, optou-se por considerar o modelo calibrado, atendendo a que, mais do que os valores absolutos, importa valorizar os resultados relativos associados a análises comparativas.

4.4.3.2. Validação

Para o procedimento da validação recorreu-se à metodologia de comparação dos tempos de percurso, verificando o tempo de viagem percorrido por um determinado veículo em uma distância pré-determinada, e posterior comparação com os valores modelados.

Para essa etapa da pesquisa, os levantamentos dos dados de tempo de viagem foram realizados na HPT no intervalo entre as 18:20 – 18:35, aplicados ao movimento 1.

O trajeto foi determinado em campo e seu comprimento médio foi de 87 m obtido através de medição realizada no *Google Earth*, conforme se observa na figura 26. Os valores dos resultados e o erro médio podem ser observados na tabela 14.

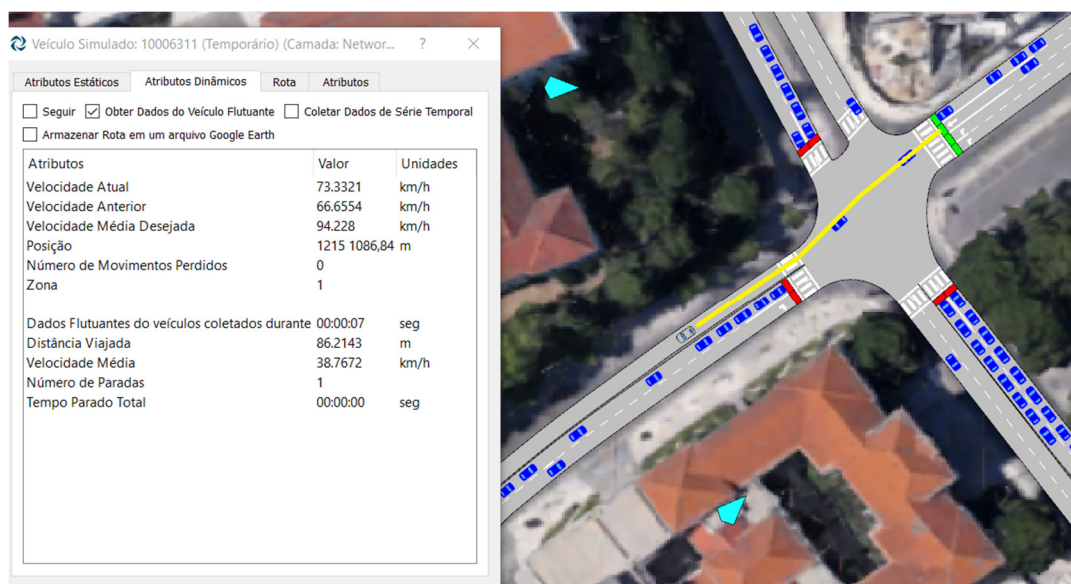
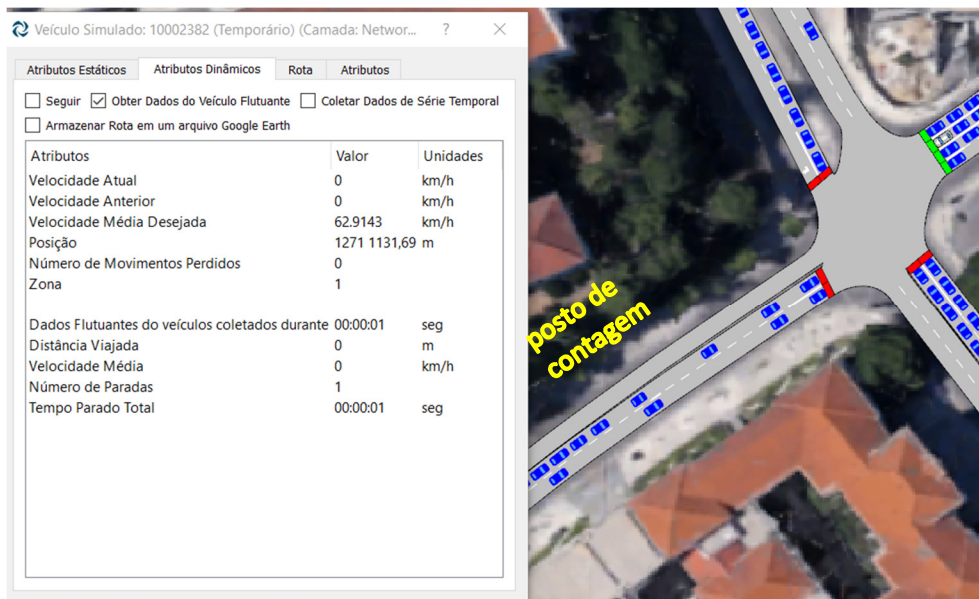


Figura 26 - Posto de contagem e trajeto escolhido para levantamento do tempo de viagem

Tabela 14 - Valores de tempo de viagem para o trajeto em estudo

N° da contagem	Contagem		
	Campo (s)	simulação (s)	erro (%)
1	11	8	27,27
2	10	9	10,00
3	9	9	0,00
4	10	9	10,00
5	9	7	22,22
		erro médio	13,90

Sabendo-se da influência inevitável de fatores externos, como precisão por parte do cronômetro na hora das contagens, considerou-se que o erro obtido se aproxima dos 13,90% tendo-se admitido o modelo validado.

4.5.Considerações Finais

A metodologia para a codificação da rede modelo da dissertação seguiu etapas bem definidas. Inicialmente definiu-se a área de estudo, a qual apresentava problemas de capacidade. A fase seguinte centrou-se na escolha do *software*, o qual foi disponibilizado pela Universidade de Coimbra. A etapa da recolha de dados, foi desenvolvida tendo como base os dados de contagem já disponibilizado pela Câmara Municipal de Leiria e complementada com dados observados e conferidos em campo, tal como filas de espera e plano de temporização.

A etapa seguinte centrou-se na codificação do modelo, com a criação dos segmentos, nós, travessias pedonais, correntes de tráfego e plano de temporização. Finalizado esse passo, procedeu-se à execução e à calibração e validação do modelo. Os parâmetros relevantes a etapa da calibração foram a *aceleração máxima*, *tempo de reação*, *tempo de reação parado* e *tempo de reação no semáforo*. Para a etapa de validação se utilizou uma variável diferente das utilizadas na calibração, sendo esta o *tempo de viagem*.

O capítulo subsequente apresenta os resultados obtidos em termos de indicadores de desempenho, para cada cenário de intervenção e cenário futuro proposto.

5. Avaliação do desempenho de soluções alternativas

Este capítulo centra-se na apresentação do desempenho assegurado pelas diferentes alternativas de regulação aplicadas ao cruzamento objecto de estudo, tendo por base diferentes níveis de procura de tráfego.

Suportados pela aplicação do modelo AIMSUN devidamente calibrado e validado, os trabalhos assentaram na avaliação do normal funcionamento do cruzamento, tendo por base diferentes soluções de regulação de tráfego, tais como a modificação do plano de regulação, plano de regulação semafórica por comando actuado e a sua transformação numa rotunda. O principal objetivo dessa etapa é avaliar, de forma comparativa, a capacidade associada a cada uma das propostas alternativas para um cenário futuro e discutir quais as principais vantagens e limitações associadas a cada umas delas.

5.1. Definição dos cenários de estudo

Neste ponto são apresentados os cenários fixados para apoiar as diferentes análises comparativas. Esses cenários abrangeram duas problemáticas distintas: (1) evolução previsível da procura de tráfego; (2) diferentes tipologias de intervenção na infraestrutura.

Como cenário de referência às análises comparativas, assumiu-se a situação atual, seja em termos de procura de tráfego seja como modo de regulação.

Inicialmente realizou-se a verificação do plano de regulação em funcionamento no cruzamento em estudo, recorrendo ao método de *Webster* (apresentado no subcapítulo 2.1.1.1) o qual foi aqui considerado como o cenário de referência. Os cálculos detalhados são apresentados no Anexo A.

Observou-se que os tempos de limpeza presentes no plano de regulação atual são de 2 s para todas as transições de fases. Os cálculos revelaram que os tempos de limpeza inter-fase 1-2 e 4-1 poderiam ser de apenas 1s. A inter-fase 2-3 deveria manter os 2 s de tempo de limpeza e a inter-fase 3-4 carece de um tempo de limpeza de 3 s. Assim, constatou-se um desajuste do plano de regulação vigente em relação às exigências locais, o que, para além de se reflectir nos valores da capacidade, se traduz, complementarmente em potenciais problemas de segurança.

No que respeita à repartição de tempo de verde útil, verificou-se que os valores de verde aplicados às fases 2 e 3 são superiores aos valores calculados, o que se traduz em tempos perdidos desnecessários. Complementarmente, o verde aplicado às fases 1 e 4 são inferiores aos valores de cálculo, o que justificou o seu reajuste de forma a permitir responder às exigências da procura local.

5.2.Cenários de evolução da procura de tráfego

As políticas urbanas de gestão das cidades, corroboradas pela política europeia em termos de mobilidade sustentável, defendem de uma forma inequívoca o uso cada vez mais em massa dos transportes colectivos e os modos suaves (andar a pé ou de bicicleta), complementadas pela adopção de medidas desincentivadoras ao uso do veículo individual. Nessa óptica, é perspectivável que, de acordo com a política seguida e empreendida pela autarquia, designadamente em termos de mobilidade urbana e de usos do solo, a evolução da procura de tráfego, assuma cenários diferenciados, podendo reduzir a procura de tráfego automóvel se adoptadas medidas incentivadoras ao uso destes modos alternativos, ou pelo contrário, aumentar se apostar na habitação dispersa e na total ausência de medidas desincentivadoras ao uso do transporte individual.

Nesse sentido foram considerados 3 cenários de evolução da procura:

Cenário realista – correspondente à normal evolução do tráfego, tendo por base os critérios estabelecidos no ponto 4.3.4 e admitindo que a política atual se manterá nos próximos anos;

Cenário pessimista – admite que nada será feito no sentido de desincentivar o uso do transporte individual no espaço central e que, por isso, o natural desenvolvimento económico do município, a procura tenderá a crescer ainda mais do que o previsto. Em termos práticos admitiu-se que tal política se traduzia no acréscimo da procura em cerca de 15% das futuras viagens, nos movimentos direccionais com destino no centro da cidade;

Cenário Optimista – admite que a autarquia irá optar por medidas ativas no sentido de promover modos alternativos (bus, bike e pedonal), associados a desincentivos fortes ao uso do transporte individual. Em termos práticos admitiu-se que tal política se revelará capaz de transferir 30% das futuras viagens para esses modos alternativos.

5.3. Cenários relativos à tipologia de intervenção

Este ponto centra-se na apresentação das soluções de intervenção alternativas adoptadas. Optou-se por procurar avaliar diferentes soluções viáveis, partindo de soluções de baixo custo, até soluções ambiciosas e que se exigem a reformulação geométrica da interseção.

Assim, foram definidos 3 cenários de base:

Cenário 1 – Corresponde à solução atual, mas onde se procura otimizar o modo de funcionamento do sistema, seja em termos de alteração do faseamento, seja pelo ajuste do plano de temporização;

Cenário 2 – Recorrendo a pequenas intervenções físicas, procura-se otimizar o funcionamento do sistema semaforizado, criando, sempre que possível e útil, pequenas vias adicionais;

Cenário 3 – Solução ambiciosa que avalia os impactes associados à transformação da solução atual numa rotunda.

Estes três cenários serão avaliados de forma comparativa, recorrendo a indicadores de desempenho quantificados e que, de forma sistemática permitem avaliar cada uma destas soluções.

5.3.1. Cenário de referência - Situação Atual x Futuro

Inicialmente, como forma de avaliar a situação atual desenvolveu-se uma análise comparativa onde se procurou perceber qual o modo de funcionamento assegurado pela solução atual e como esta deverá acomodar o aumento previsível da procura, tendo-se para o efeito considerado os 3 cenários de procura futura (*realista, pessimista e otimista*).

Para essa análise, assumiu-se a HPM e HPT como período de avaliação. A análise considerou a modelação dos três cenários de evolução da procura futura, sendo que a matriz do cenário *realista* foi constituída com os valores de fluxo de veículos para o ano de 2028; para o cenário *pessimista* assumiu-se a matriz futura realista com um acréscimo de 15% nos valores dos movimentos direcionais com destino ao centro da cidade, e por fim, para a matriz do cenário *otimista* estabeleceu-se uma redução de 30% nos valores de fluxo de veículos da matriz futura realista.

Os resultados obtidos para cada um dos indicadores de desempenho (demora (s), comprimento máximo de fila (uvl), velocidade (Km/h)) podem ser observados nas tabelas 15 e 16.

Tabela 15 - Resultados dos indicadores de desempenho para cenário atual e futuro da HPM

	Cenários em Análise			
	Atual	Futuro - sem alteração		
		Realista	Pessimista	Optimista
Demora (s)	1,29	23,27	69,51	0,14
Comp. máx de fila (uvl)	13	83	213	4
Velocidade (Km/h)	23,62	19,14	15,73	27,16

Tabela 16 - Resultados dos indicadores de desempenho para o cenário atual e futuro da HPT

	Cenários em Análise			
	Atual	Futuro - sem alteração		
		Realista	Pessimista	Optimista
Demora (s)	3,27	72,14	142,83	0,12
Comp. máx de fila (uvl)	19	156	348	4
Velocidade (Km/h)	20,88	15,30	14,56	26,44

As comparações gráficas entre o cenário atual e os cenários futuros para a HPM e HPT podem ser observadas nas figuras 27 e 28.

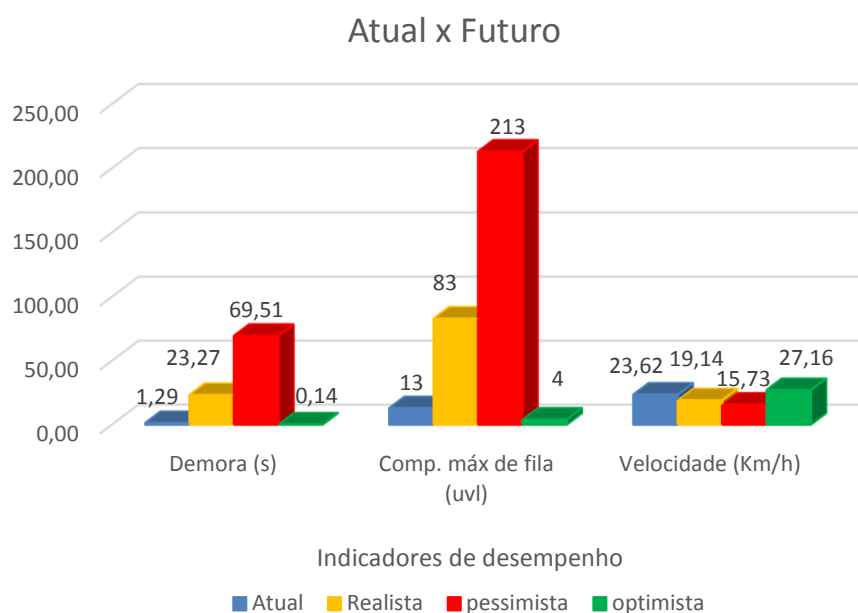


Figura 27 - Gráfico comparativo entre cenário atual e cenários futuros (realista, pessimista, optimista) para HPM

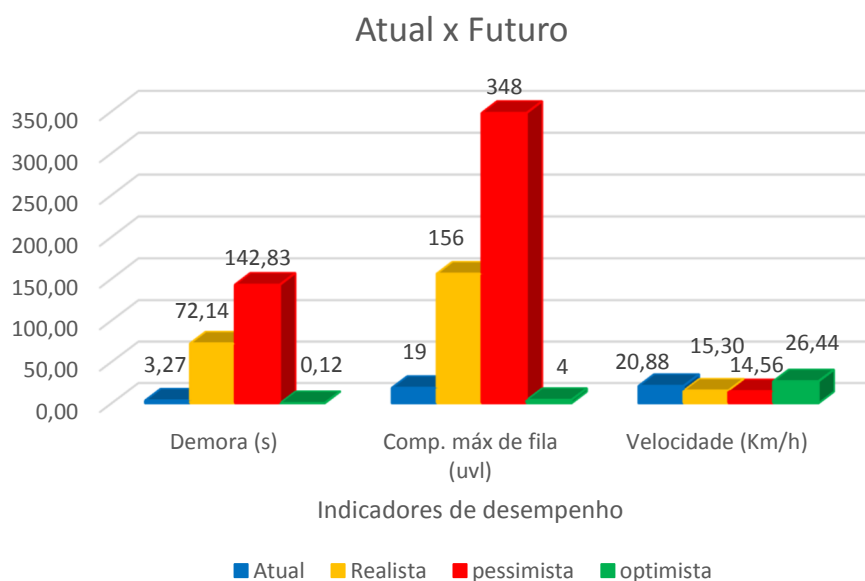


Figura 28 - Gráfico comparativo entre cenário atual e cenários futuros (realista, pessimista, optimista) para HPT

Estes resultados permitem concluir que, como seria expectável, a degradação do modo de funcionamento da interseção aumentará com o aumento dos níveis da procura de tráfego, resultando em condições inaceitáveis quando aplicados os cenários realista ou pessimista. Refira-se que a interseção, nos moldes atuais, já se encontra a funcionar no limiar de saturação, pelo que qualquer pequena oscilação poderá resultar na saturação geral da

interseção. Este efeito é particularmente evidente quando se analisa o indicador “comprimento máximo da fila”.

Os valores do comprimento máximo da fila passam de 13 para 83 e 213 veículos, quando avaliados os cenários *realista* e *pessimista* comparativamente ao cenário atual, permitindo concluir que a manter-se a solução de regulação atual, deve a Câmara Municipal adoptar medidas de controlo da procura que permitam alterar hábitos e padrões de mobilidade, tendentes à adopção de um cenário optimista. Para o cenário futuro realista e pessimista os valores são menores no período da manhã quando comparados com o período da tarde. Apesar das matrizes O/D para o período da manhã assumirem maiores valores globais, verifica-se que no que respeita aos movimentos críticos (movimentos 7 e 9) acabam por serem maiores no período da tarde. Entretanto, para o cenário futuro optimista não se notou considerável diferença entre os valores do período da tarde e da manhã.

Estas tendências gerais estão igualmente plasmadas nos outros indicadores de desempenho analisados. A velocidade regista uma redução significativa nos cenários futuros realista e pessimista (passa de 24 para cerca de 19 e 16 km/h), correspondendo a uma redução de 19% e 33,4% dos valores respectivamente, para HPM e 26% e 30% para HPT. Para o cenário optimista regista-se um aumento de 15% no seu valor na HPM e de 26,6% na HPT.

Relativamente à demora, o registo é semelhante. Verificou-se que os valores do cenário futuro pessimista e realista foram muito elevados em relação ao cenário atual, registando-se uma redução significativas no cenário futuro optimista.

Registe-se o facto dos movimentos sujeitos a maiores níveis de procura de tráfego são os movimentos 7 e 9, os quais sofrem um agravamento significativo na ponta da tarde.

Desta análise conclui-se que o cruzamento já se encontra a funcionar muito próximo da saturação, formando filas de espera não negligenciáveis, particularmente nos períodos de pico. Qualquer aumento da procura traduzir-se-á no agravamento das condições de funcionamento, o que justifica o estudo de soluções alternativas que permitam aumentar a reserva de capacidade, de forma a responder ao previsível aumento natural da procura.

5.3.2. Cenário 1 – Otimização do funcionamento do sistema semafórico

O cenário 1 procura avaliar o efeito, em termos de aumento do desempenho associado à simples optimização do modo de funcionamento do sistema atual, resultante da alteração do

seu faseamento e temporização. Na sequência de uma análise preliminar constatou-se que tal alteração se traduziria na criação de conflitos primários, pelo que se descartou essa hipótese centrando-se a alteração no estabelecimento de um ciclo de 120 s (sendo o atual de 110 s) e na redistribuição dos tempos de verde proporcionalmente à carga global do cruzamento - ver figura 29. Os cálculos basearam-se na aplicação do método de Webster.

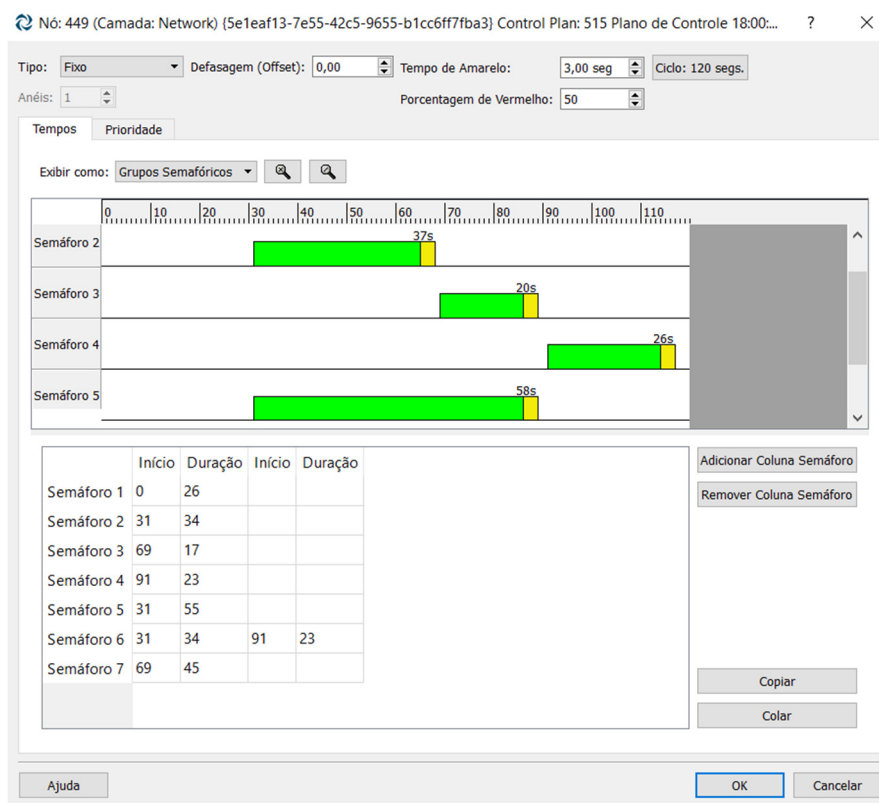


Figura 29 - Plano de regulação a considerar um ciclo de 120 s

Da mesma forma, desenvolveu-se a modelação para os três cenários futuros, para os períodos da manhã e da tarde – ver tabelas 17 e 18.

Tabela 17 - Resultados dos indicadores de desempenho para cenário 1 atual e futuro da HPM

	Cenários em Análise			
	Atual - Ciclo óptimo (120s)	Futuro - Ciclo óptimo (120s)		
		Realista	Pessimista	Optimista
Demora (s)	1,03	18,79	62,24	0,1
Comp. máx de fila (uvl)	13	56	210	3
Velocidade (m/s)	23,19	17,93	15,75	27,11

Tabela 18 - Resultados dos indicadores de desempenho para cenário 1 atual e futuro da HPT

	Cenários em Análise			
	Atual - Ciclo óptimo (120s)	Futuro - Ciclo óptimo (120s)		
		Realista	Pessimista	Optimista
Demora (s)	3,83	72,09	138,6	0,12
Comp. máx de fila (uvl)	19	159	340	4
Velocidade (m/s)	20,63	15,67	14,72	26,60

As comparações gráficas entre o cenário atual e os cenários futuros para a HPM e HPT podem ser observadas nas figuras 30 e 31.

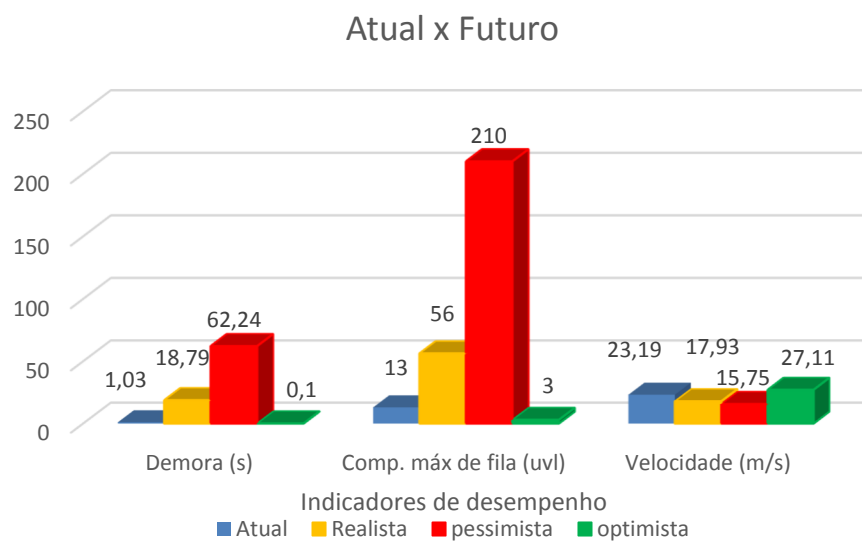


Figura 30 - Gráfico comparativo entre cenário atual e cenários 1 futuro (realista, pessimista, optimista) para HPM

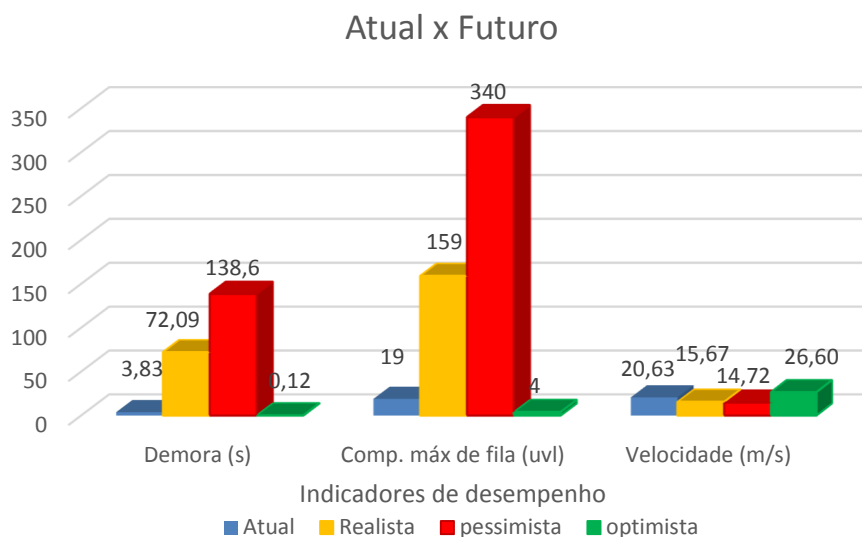


Figura 31 - Gráfico comparativo entre cenário atual e cenários 1 futuro (realista, pessimista, optimista) para HPT

Tendo por referência a solução atual, verifica-se que a otimização do sistema se reflectiu num muito ligeiro melhoramento do funcionamento do sistema, não tendo, contudo, a alteração introduzida um significativo físico significativo.

Assim e independentemente do indicador de desempenho adoptado verifica-se que a variação dos valores obtidos é praticamente negligenciável, justificando a adopção de soluções mais ambiciosas.

5.3.3. Cenário 2 – Plano de regulação por comando actuado

O cenário 2 procura avaliar o efeito associado à alteração do plano a tempos fixos para um plano de comando actuado, mantendo o ciclo de 120 segundos. Para o efeito, foi definido o valor de tempo mínimo (*tmín*) de 8,0 seg. para acomodar o impacto do arranque do veículo e um valor de tempo máximo (*tmáx* - tempo de verde máximo de cada fase) de forma a não exceder o valor da fase (calculado para a temporização a tempos fixos). Foi ainda definido o intervalo de extensão (*ext*) como sendo de 2,0 seg, de forma a estender o verde entre o valor mínimo e máximo enquanto houver chegada de veículos nos ramos secundários. Considerou-se ainda um tempo de passagem (*tpas* – 3,0 seg) entre veículos a partir do qual, não havendo deteção, o verde é interrompido passa a vermelho. Optou-se em manter o “Recall” desativado, pois assim a fase correspondente so é ativada quando houver deteção de veículos, mantendo o verde ativo na fase principal. Por fim, ativou-se o “Hold” de forma a manter o verde ativo na via principal até que se ative a fase secundária. A figura 32 mostra as opções assumidas, aplicadas à fase 1.

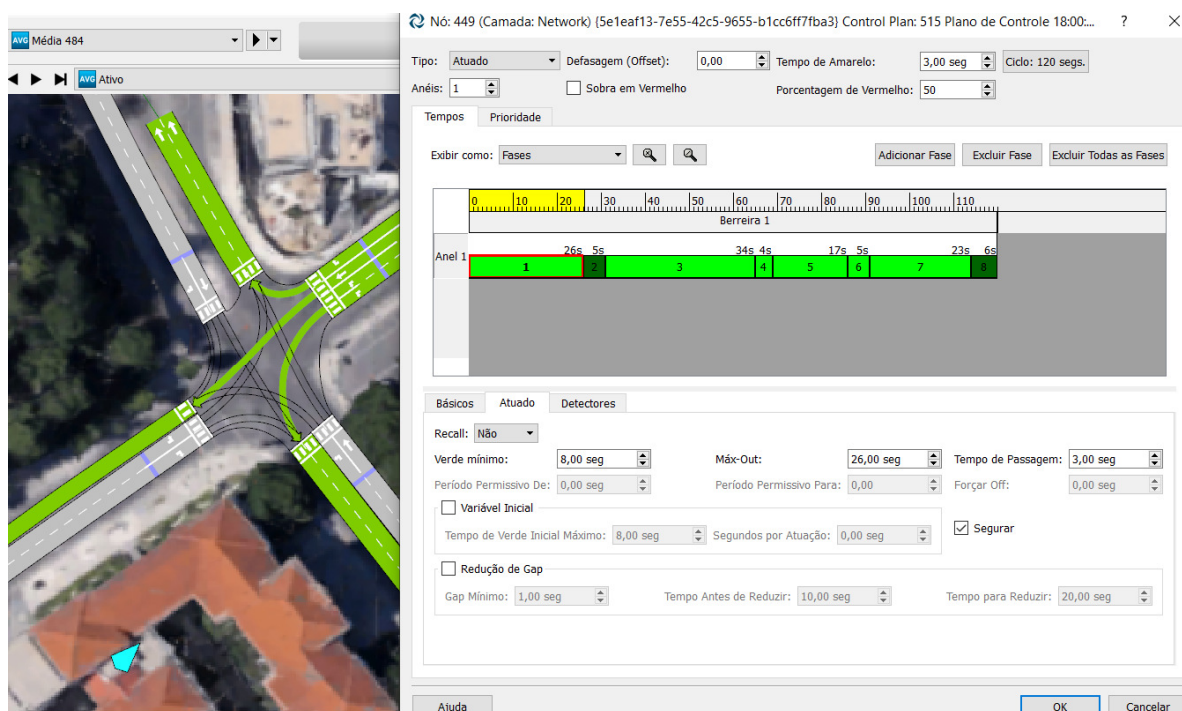


Figura 32 - Configuração do plano de comando actuado para a fase 1

À semelhança das soluções anteriores, a avaliação do desempenho da solução atuada, teve por base os três cenários futuros de procura, para os períodos da manhã e da tarde. Os resultados globais encontram-se sintetizados nas tabelas 19 e 20.

Tabela 19 - Resultados dos indicadores de desempenho para cenário 2 atual e futuro da HPM

	Cenários em Análise			
	Atual - Ciclo óptimo (120s)	Futuro - Ciclo óptimo (120s)		
		Realista	Pessimista	Optimista
Demora (s)	0,98	18,04	62,01	0,08
Comp. máx de fila (uvl)	13	55	208	2
Velocidade (m/s)	23,21	17,94	15,77	25,13

Tabela 20 - Resultados dos indicadores de desempenho para cenário 2 atual e futuro da HPT

	Cenários em Análise			
	Atual - Ciclo óptimo (120s)	Futuro - Ciclo óptimo (120s)		
		Realista	Pessimista	Optimista
Demora (s)	3,44	71,83	134,41	0,09
Comp. máx de fila (uvl)	18	154	337	3
Velocidade (m/s)	20,77	15,73	14,83	26,88

As comparações gráficas entre o cenário atual e os cenários futuros para a HPM e HPT podem ser observadas nas figuras 33 e 34.

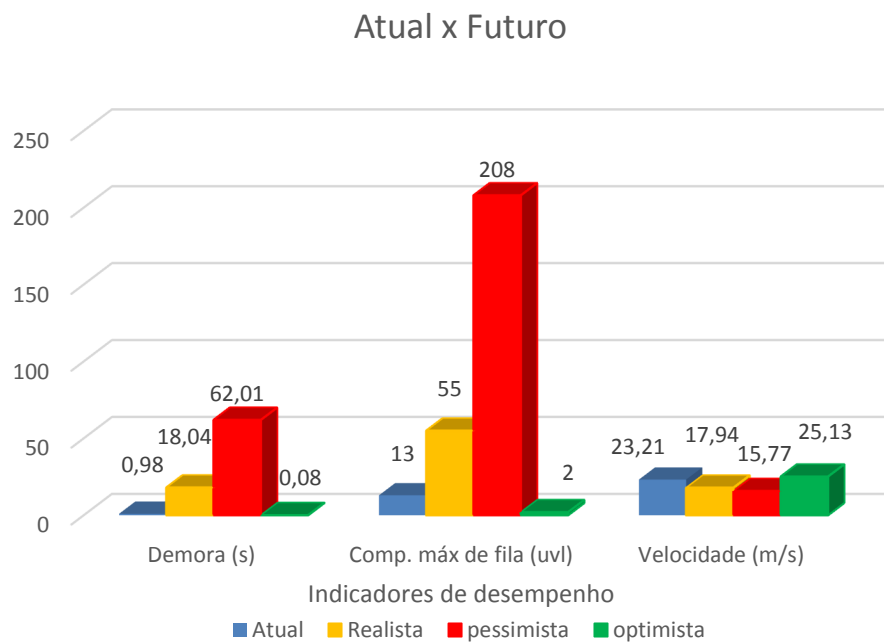


Figura 33 - Gráfico comparativo entre cenário atual e cenários 2 futuros (realista, pessimista, otimista) para HPM

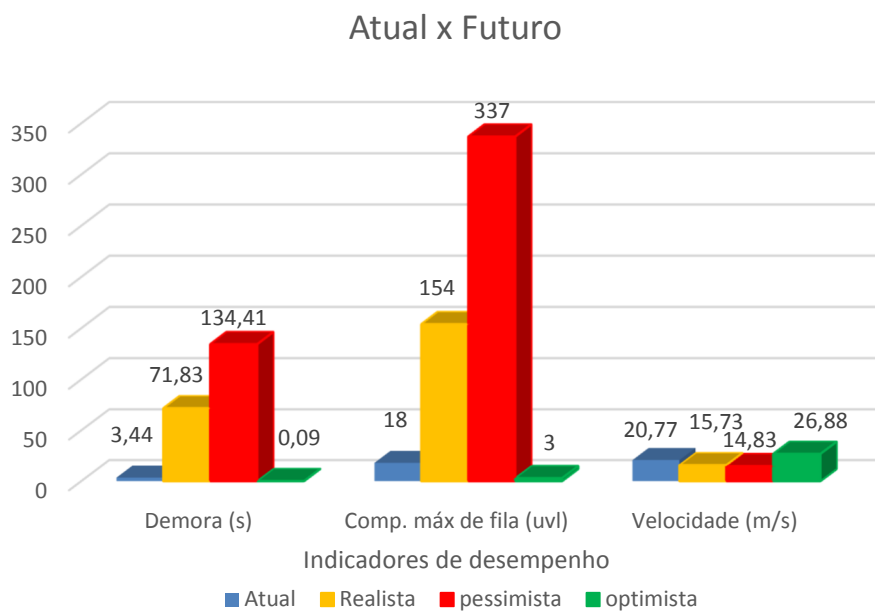


Figura 34 - Gráfico comparativo entre cenário atual e cenários 2 futuros (realista, pessimista, otimista) para HPT

A análise dos resultados comparativamente à solução atual e à solução a tempos fixos, mostra que, independentemente do cenário de evolução da procura de tráfego, a solução

atuada garante um muito ligeiro aumento do desempenho, não sendo contudo suficiente para salvaguardar um bom nível de desempenho face a aumentos moderados da procura de tráfego.

Este resultado era expectável, já que estando o cruzamento a funcionar próximo do limiar de saturação, pressupõe-se que haverá procura continuada em todos os ramos do cruzamento, pelo que se o comando fosse atuado tenderia a estender o tempo de verde incrementalmente até atingir os valores máximos de verde em cada fase (situação correspondentemente ao cenário 1 estudada no ponto anterior). Assim conclui-se que a substituição do comando a tempos fixo por um comando atuado, não se traduzirá numa melhoria significativa das condições de funcionamento do cruzamento, designadamente em hora de ponta, sendo, contudo, previsível a redução das demoras nos períodos de menor procura.

Deve assim ser encarada a possibilidade da Câmara Municipal, avaliar a possibilidade de reordenamento do cruzamento, envolvendo a reformulação geométrica da interseção.

5.3.4. Cenário 3 – Implantação de uma rotunda alongada

O cenário 3 avalia o efeito resultante da transformação da interseção numa rotunda alongada. A observação prospectiva do local, permitiu identificar a existência de árvores de elevado porte nas imediações da interseção. Dessa forma foi necessário adaptar a geometria da rotunda às exigências e condicionantes locais, de forma a preservá-las. O trabalho de codificação da solução alternativa assentou na modelação da rotunda com duas geometrias distintas, aqui designadas de modelo 1 e 2 (figuras 35 e 36).



Figura 35 - Modelo 1 de rotunda proposta para modificação



Figura 36 - Modelo 2 de rotunda proposta para modificação

A diferença entre os dois modelos centra-se na definição do ramo relativo à Rua do Município. No modelo 1 assume-se que o mesmo se desenvolve através do parque de estacionamento frontal à Câmara Municipal de Leiria, permitindo salvaguardar uma melhor

distribuição entre ramos de entrada, melhorando a visibilidade de entrada e por inerência os níveis de segurança global. Contudo, a solução resultaria na redução de um número significativo do número de lugares de estacionamento, num local onde a procura excede a oferta. O modelo 2 mantém o traçado do ramo Rua do Município, mantendo as patologias da interseção atual.

A solução final adoptada assenta na criação de um anel de circulação com 2 vias, onde conflituam entradas igualmente com 2 vias de circulação. rotunda ficou de forma que a Rua dos Mártires manteve as duas vias de entrada e saída. Houve modificação na Av. Dr. José Jardim a qual ficou configurada com duas vias de entradas na rotunda. A Rua Dr. João Soares permaneceu com duas vias de entrada e uma de saída. O largo da República foi modificado consoante o modelo adoptado, contudo em ambos modelos manteve as 2 vias de saída e de entrada.

Da mesma maneira, executou-se a modelação para os três cenários futuros, para o período da manhã e da tarde, sendo considerados os dois modelos de rotunda. Como resultado se obteve os indicadores de desempenho para o modelo 1 de acordo com as tabelas 21 e 22.

Tabela 21 - Resultados dos indicadores de desempenho para cenário 3 atual e futuro da HPM para o modelo 1

	Cenários em Análise			
	Atual - Rotunda 1 alongada	Futuro - Rotunda 1 alongada		
		Realista	Pessimista	Optimista
Demora (s)	0,05	0,06	0,08	0,04
Comp. máx de fila (uvl)	3	3	4	3
Velocidade (m/s)	43,82	42,79	39,39	47,22

Tabela 22 - Resultados dos indicadores de desempenho para cenário 3 atual e futuro da HPT para o modelo 1

	Cenários em Análise			
	Atual - Rotunda 1 alongada	Futuro - Rotunda 1 alongada		
		Realista	Pessimista	Optimista
Demora (s)	0,06	0,07	0,68	0,05
Comp. máx de fila (uvl)	3	4	9	3
Velocidade (m/s)	43,52	42,16	38,41	47

As comparações gráficas podem ser observadas nas figuras 37 e 38.

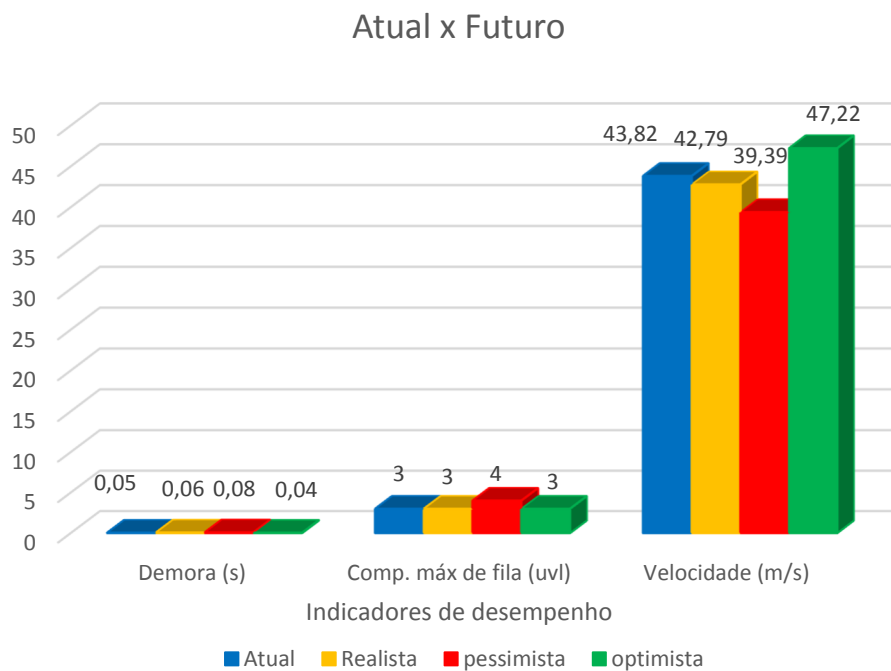


Figura 37 - Gráfico comparativo entre cenário atual e cenários 3 (modelo 1) futuros (realista, pessimista, otimista) para HPM

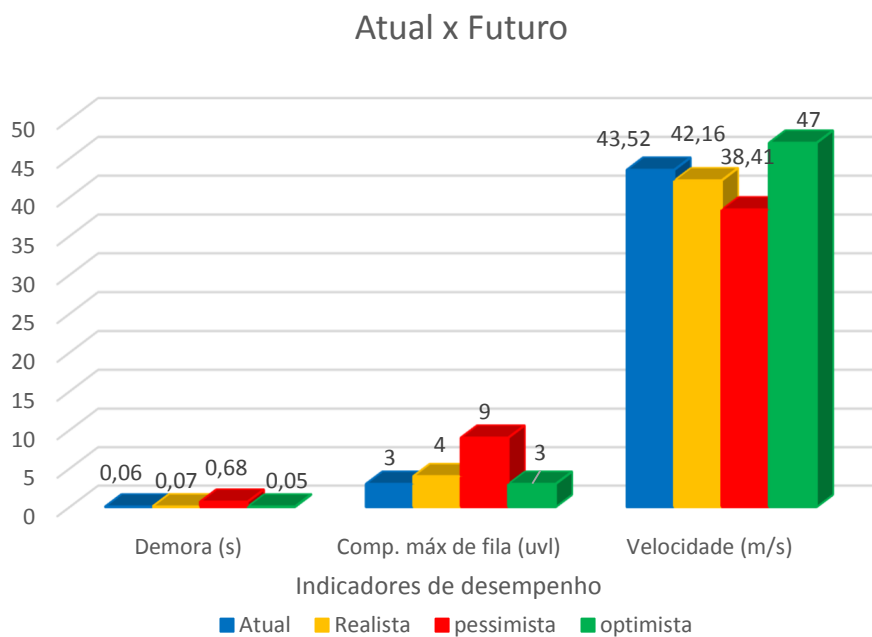


Figura 38 - Gráfico comparativo entre cenário atual e cenários 3 (modelo 1) futuros (realista, pessimista, otimista) para HPT

Para o modelo 2 os resultados obtidos dos indicadores de desempenho podem ser observados nas tabelas 23 e 24.

Tabela 23 -Resultados dos indicadores de desempenho para cenário 3 atual e futuro da HPM para o modelo 2

	Cenários em Análise			
	Atual - Rotunda 2 alongada	Futuro - Rotunda 2 alongada		
		Realista	Pessimista	Optimista
Demora (s)	0,05	0,06	0,07	0,05
Comp. máx de fila (uvl)	2	3	3	2
Velocidade (m/s)	43,61	42,77	39,81	48,24

Tabela 24 -Resultados dos indicadores de desempenho para cenário 3 atual e futuro da HPT para o modelo 2

	Cenários em Análise			
	Atual - Rotunda 2 alongada	Futuro - Rotunda 2 alongada		
		Realista	Pessimista	Optimista
Demora (s)	0,07	0,08	0,09	0,05
Comp. máx de fila (uvl)	3	4	10	3
Velocidade (m/s)	44,41	43,2	39,12	47,13

As comparações gráficas podem ser observadas nas figuras 39 e 40.

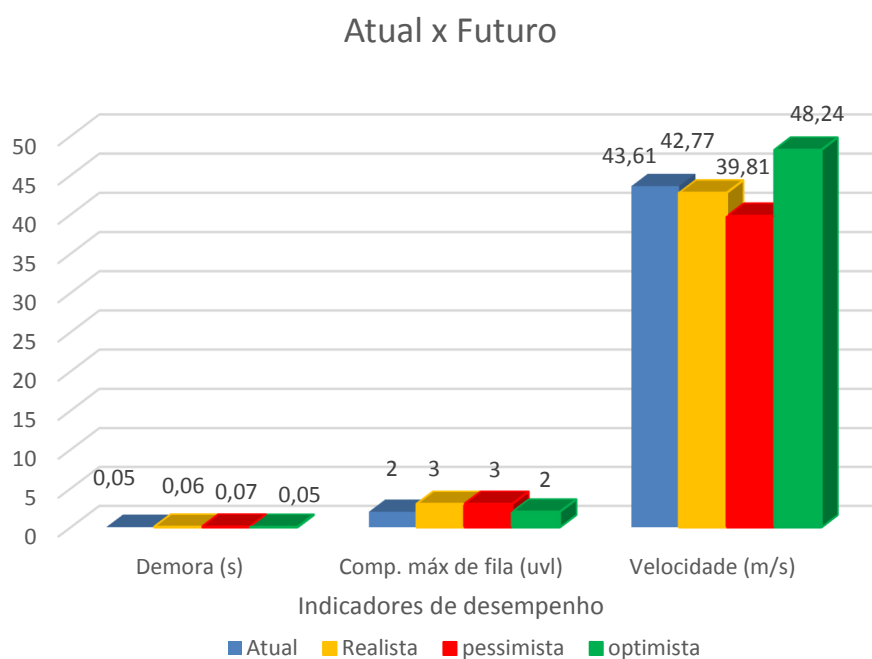


Figura 39 - Gráfico comparativo entre cenário atual e cenários 3 (modelo 2) futuros (realista, pessimista, optimista) para HPM

Atual x Futuro

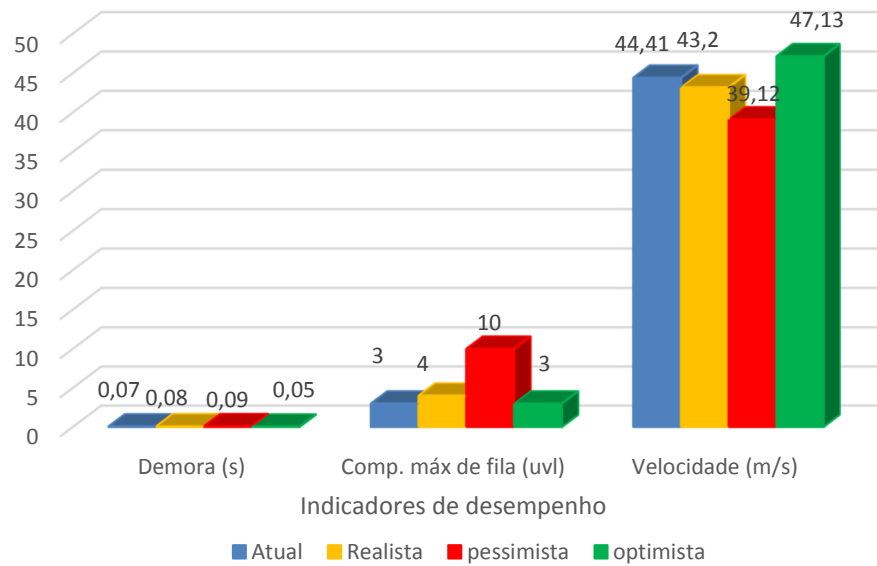


Figura 40 - Gráfico comparativo entre cenário atual e cenários 3 (modelo 2) futuros (realista, pessimista, otimista) para HPT

Comparativamente às soluções alternativas apresentadas anteriormente, os benefícios da transformação em rotunda são evidentes, registrando-se reduções significativas quer das demoras quer do comprimento das filas de espera. É ainda de destacar o fato desta ser a única solução estudada que salvaguarda o bom funcionamento da interseção mesmo nos cenários exigentes de evolução futura (pessimista e realista). Os valores obtidos, mostram que mesmo no cenário pessimista, resultante de um cenário de não tomada de medidas de gestão da procura por parte da autarquia, o cruzamento mantém uma elevada reserva de capacidade. De facto, os valores de demora e comprimento das filas, comprovam que não se prevê o registo de qualquer fila, independente do modelo de reformulação geométrica adoptado.

Compete assim à câmara Municipal definir qual o modelo que melhor responde às exigências locais, atendendo a que, ambos os modelos garantem modos de funcionamento similares, embora o modelo 1 se traduza na perda de alguns lugares de estacionamento, mas garanta uma solução mais equilibrada e segura. Apesar disso, o modelo 2, assegura igualmente níveis de segurança adequados, devendo ser trabalhados os triângulos de visibilidade locais. Paralelamente devem ainda ser devidamente estudados os raios mínimos de viragem, de forma a garantir um bom nível de operacionalidade aos veículos longos, designadamente veículos pesados de passageiros.

Em síntese é de destacar que o elevado nível de desempenho se mantém independentemente do modelo adoptado, do cenário de procura considerado e da hora de ponta da manhã ou tarde.

5.4. Análise geral comparativa das soluções estudadas

As tabelas 25 e 26. sintetizam os valores obtidos para cada indicador de desempenho, para as várias alternativas de beneficiação da interseção estudadas.

Tabela 25 - Valores dos indicadores de desempenho para cada alternativa de modificação e para cada cenário futuro para HPM

		Alternativas de intervenção (HPM)				
		Situação Atual	Alteração do ciclo semafórico (C-120s)	Plano de regulação por comando actuado	Implantação de uma rotunda alongada	
					Modelo 1	Modelo 2
realista	Demora (s)	23,27	18,79	18,04	0,06	0,06
	Comp. máx de fila (uvl)	83	56	55	3	3
	Velocidade (m/s)	19,14	17,93	17,94	42,79	42,77
pessimista	Demora (s)	69,51	62,24	62,01	0,08	0,07
	Comp. máx de fila (uvl)	213	210	208	4	3
	Velocidade (m/s)	15,73	15,75	15,77	39,39	39,81
optimista	Demora (s)	0,14	0,1	0,08	0,04	0,05
	Comp. máx de fila (uvl)	4	3	2	3	2
	Velocidade (m/s)	27,16	27,11	25,13	47,22	48,24

Tabela 26 - Valores dos indicadores de desempenho para cada alternativa de modificação e para cada cenário futuro para HPT

		Alternativas de intervenção (HPM)				
		Situação Atual	Alteração do ciclo semafórico (C-120s)	Plano de regulação por comando actuado	Implantação de uma rotunda alongada	
					Modelo 1	Modelo 2
realista	Demora (s)	72,14	72,09	71,83	0,07	0,08
	Comp. máx de fila (uvl)	156	159	154	4	4
	Velocidade (m/s)	15,30	15,67	15,73	42,16	43,2

pessimista	Demora (s)	142,83	138,6	134,41	0,68	0,09
	Comp. máx de fila (uvl)	348	340	337	9	10
	Velocidade (m/s)	14,56	14,72	15,77	39,39	39,81
optimista	Demora (s)	0,12	0,12	0,09	0,05	0,05
	Comp. máx de fila (uvl)	4	4	3	3	3
	Velocidade (m/s)	26,44	26,6	26,88	47	47,13

A sua análise cuidada, permite corroborar as conclusões parciais que foram sendo apresentadas nas análises individuais nos pontos anteriores.

O aumento do ciclo do sistema semaforico, permitiu melhorar ligeiramente o nível do desempenho do sistema, embora sem significado físico significativo. O mesmo resultado foi obtido quando testado o sistema atuado. Na realidade, o fato da intersecção estar a funcionar próxima da saturação, leva a que, um sistema atuado resulte maioritariamente em extensões de verde que tendem para o ciclo máximo de 120 seg (e por inerência dos tempos de verde máximos), aproximando-se de um funcionamento a tempos fixos.

Assim, conclui-se que a manutenção e ajustamento pontual do sistema semaforico, sem intervenções geométricas que permitam reformular geometricamente o cruzamento, resultam em pequenas melhorias, particularmente evidentes na situação atual. Contudo, qualquer pequeno aumento da procura, tenderá a traduzir-se na saturação do cruzamento.

Finalmente, a transformação da intersecção numa rotunda, é a solução que evidencia claras melhorias ao funcionamento da intersecção, independentemente do cenário de evolução da procura de tráfego. De facto, esta solução (independentemente do modelo geométrico adoptado), mantém uma elevada reserva de capacidade, respondendo com elevado nível de serviço às exigências da procura atual e de futuro.

Em alternativa, deverá a Câmara Municipal, em parceria com outros *stakeholders* locais, promover uma cultura de mobilidade sustentável, acompanhada da tomada de medidas de controlo da procura que permitam, ao longo do tempo, manter ou reduzir os níveis de procura de tráfego atuais (tender para um cenário otimista). Só perante um cenário de estabilização ou redução da procura do veículo individual, será possível manter, com níveis satisfatórios de funcionamento, o modo de regulação atual.

6. Conclusões e trabalhos futuros

A microssimulação tem sido considerada uma ferramenta cada vez mais promissora de apoio à gestão do tráfego em redes complexas, permitindo desenvolver análises integradas e completas, envolvendo indicadores caracterizadores do seu desempenho global, nas diferentes vertentes em avaliação, designadamente: capacidade, segurança e impactes ambientais. Tendo por base os resultados obtidos e a experiência nacional e internacional a microssimulação evidencia-se como um instrumento capaz de representar com elevados níveis de fiabilidade uma determinada realidade complexa. Para isso assumem particular relevância os trabalhos de calibração e validação, enquanto procedimentos de ajuste do modelo de forma a, dentro de um nível de erro pré-definido, garantir uma boa proximidade entre os valores modelados e os reais observados. Percebido o potencial da microssimulação, esta foi a técnica selecionada para avaliar as eventuais melhorias, em termos de funcionamento geral de uma interseção real, situada na cidade de Leiria e que apresenta problemas de funcionamento. Essa avaliação foi suportada pela análise comparativa de um conjunto de indicadores de desempenho, obtidos para diferentes cenários futuros de evolução da procura de tráfego.

Os trabalhos iniciaram-se com a compilação de um conjunto de informação existente e na posse de diferentes entidades, complementada por observações locais. A construção do modelo de simulação justificou o levantamento adicional de informação local, entre outras, para potenciar o desenvolvimento dos trabalhos de calibração e de validação.

Tendo por base o modelo validado, os trabalhos assentaram na análise comparativa do nível de funcionamento das diferentes alternativas, tendo por base diferentes cenários de evolução da procura de tráfego. A solução atual foi considerada como a solução de referência para efeitos comparativos.

A aplicação do modelo à situação atual, permitiu concluir que o cruzamento se encontra a funcionar no limiar de saturação, justificando-se encontrar soluções alternativas de baixo custo ou economicamente mais ambiciosas, que permitam responder aos previsíveis aumentos da procura de tráfego. Constatou-se que o aumento ligeiro do ciclo semaforico (de 110 para 120 segundos), resultou em pequenas melhorias ao modo de funcionamento global, embora a solução tenda a congestionar face a aumentos, mesmo que ligeiros, da procura de tráfego.

Os mesmos resultados foram obtidos quando substituído um comando a tempos fixos por um comando atuado. Registaram-se pequenos melhoramentos ao funcionamento do cruzamento, revelando ser uma medida corretiva insuficiente para razer face à previsível da procura de tráfego.

Estes resultados demosntram que, face aos níveis atuais de procura, deve a Câmara Municipal enveredar por soluções economicamente ambiciosas que deverão passar inevitavelmente pela reformulação geométrica da interseção, ou impor medidas restritivas ao uso do veículo automóvel de forma a travar o contínuo crescimento do tráfego, registado ao longo das últimas décadas.

Nessa linha de atuação, optou-se por testar a transformação da interseção numa rotunda alongada de dimensão compacta. Tendo por base as restrições locais, foram definidos dois modelos de intervenção alternativos, assentes numa solução de base constituída por 2 vias de circulação no anel e 2 vias de entrada. Os resultados foram surpreendentes, resultando numa melhoria generalizadas dos indicadores de desempenho, sendo mesmo a única solução alternativa que se revelou capaz de responder, com elevado nível de desempenho, ao previsível crescimento do tráfego. Em complemento e apesar da análise não ter integrado indicadores de segurança, é ainda perspectivável que esta solução resulte numa melhoria dos níveis de segurança, quer para s veículos quer para os peões, na medida em que a rotunda se afirma como uma medida, por excelência, de acalmia de tráfego.

Face a estes resultados, deve a Câmara Municipal rever a política de mobilidade a ser adoptada na cidade de Leiria. A manterem-se os níveis de crescimento da procura registados nas duas últimas décadas, a tendência será de progressão e saturação geral da rede rodoviária, obrigando à adopção de soluções correctivas profundas e por inerência extremamente dispendiosas. Em alternativa, deverá ser encetada pela autarquia uma alteração do paradigma da mobilidade urbana, através da adopção de acções de sensibilização devidamente complementadas por medidas de contenção e controlo da procura de tráfego individual (taxação e controlo da oferta de estacionamento; investimento em medidas de apoio a modos alternativos, promoção da micromobilidade, promoção do transporte público, etc.) que permitam conter o natural crescimento do tráefo individual.

Em síntese, o presente estudo permitiu evidenciar as potencialidades das técnicas de microsimulação, designadamente na aplicação a análises comparativas de soluções de intervenção alternativas.

Importa ter consciência que um trabalho desta natureza não é estanque e, portanto, não pode ser considerado como um produto acabado, sendo assim perminente deixar aqui abertas potenciais novas linhas de investigação. Como proposta para futuros trabalhos, vê-se a necessidade do desenvolvimento de uma análise mais específica sobre o impacto dos erros na etapa da calibração, dada a infinidade de possíveis parâmetros presentes no modelo de microssimulação.

Recomenda-se a utilização da mesma metodologia com a seleção de outras variáveis de calibração, igualmente a análise de outros indicadores de desempenho como forma de avaliar a sensibilidade a estas alterações.

Por fim, sugere-se uma maior especificação quanto aos modos de transportes, tais como autocarro, táxi, camião, e uma compatibilização com o atravessamento dos peões, de forma a refletir com maior fidelidade o sistema como um todo.

Por fim e como o desempenho de uma interseção deve englobar, a ponderação pesada de diferentes componentes, tirando partido dos modelos de microssimulação, importa complementar a presente análise com base em indicadores representativos da segurança rodoviária e de impactes ambientais. Só essa análise ponderada permitirá avaliar, de forma completa e informada, qual a melhor solução de reformulação da interseção objecto de estudo.

Bibliografia

- Aimsun. (2015). Aimsun 8.1 User's Manual [Programa de Computador]. TSS - Transportsimulation systems, Barcelona, Espanha.
- Aimsun. (2018). About Aimsun. Obtido 2 de Abril de 2019, de <https://www.aimsun.com/about-aimsun/>
- Alexiadis, V., Krista, J., & Chandra, A. (2004). *Traffic Analysis Toolbox Volume I: Traffic Analysis Tools Primer*. Oakland, California: Cambridge Systematics, Inc., Federal Highway Administration (FHWA).
- Ayala, R. J. L. (2013). *Procedimento para Identificação dos Principais Parâmetros dos Microsimuladores a serem Considerados no Processo de Calibração*. Dissertação de mestrado em Transportes. Universidade de Brasília, Brasília, Distrito Federal.
- Barceló, J., & Casas, J. (2005). Dynamic Network Simulation with AIMSUN. Em R. Kitamura & M. Kuwahara (Eds.), *Simulation Approaches in Transportation Analysis* (pp. 57–98). Nova York: Springer.
- Boxill, S. A., & Yu, L. (2000). *An Evaluation of Traffic Simulation Models for Supporting ITS Development* (Vol. 7). Houston, Texas: Texas Southern University, Center for Transportation Training and Research.
- CONTRAN. (2014). *Manual Brasileiro de Sinalização de Trânsito* (vol. v). Câmara Temática de Engenharia de Tráfego, da Sinalização e da Via do Denatran, Ministério das Cidades.
- Costa, A. H. P. da, Seco, Á. J. da M., & Vasconcelos, A. L. P. (2008). *Manual do Planeamento de Acessibilidades e Transportes*. Comissão de coordenação e desenvolvimento regional do norte.
- DENATRAN. (1984). *Manual de Semáforos - Coleção Serviços de Engenharia* (2ª ed.). Distrito Federal, Brasília: Ministério da Justiça.
- Dion, F., Karthik, S., & Ban, J. (2012). *Evaluation of Traffic Simulation Model Use in the Development of Corridor System Management Plans (CSMPs)*. Berkeley, California:

University of California, California Partners for Advanced Transportation Technologies (PATH).

Dowling, R., Skabardonis, A., & Alexiadis, V. (2004). *Traffic Analysis Toolbox Volume III : Guidelines for Applying Traffic Microsimulation Modeling Software*. Oakland, California: Dowling Associates, Inc., Federal Highway Administration (FHWA).

Elefteriadou, L. (2014). *An Introduction to Traffic Flow Theory*. S.l: Springer.

Engimind. (2018). *Requalificação da Rotunda D. Dinis e da nova Rotunda da praça da República*. Leiria, Leiria: Consultores em Transportes e Mobilidade.

FHWA. (2000). *Roundabouts: An Informational Guide*. Virginia, USA:U.S Department of Transport, Federal Highway Administration.

Figueiredo, M., Seco, Á., & Silva, A. B. (2014). Calibration of Microsimulation Models – The Effect of Calibration Parameters Errors in the Models’ Performance. *Transportation Research Procedia*, 3, 962–971. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2014.10.076>

Gomes, G. Z. (2004). *Uso de microssimulação na avaliação da sustentabilidade de corredores rodoviários*. Dissertação de mestrado em Engenharia Civil com ênfase em Transportes. Universidade de São Paulo, São Carlos, São Paulo.

Greenshields, B. D. (1935). A Study of Traffic Capacity. *Highway Research Board*, 14, 448–477.

Hollander, Y., & Liu, R. (2008). The principles of calibrating traffic microsimulation models. *Transportation*, 35(3), 347–362. <https://doi.org/10.1007/s11116-007-9156-2>

Karioti, E., Basbas, S., Mintsis, E., Mintsis, G., & Taxiltaris, C. (2017). Traffic and environmental impacts of traffic incidents on Thessaloniki’s inner ring road. *Transportation Research Procedia*, 24, 288–295. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2017.05.120>

Kerner, B. S. (2009). *Introduction to modern traffic flow theory and control*. Berlin: Springer-Verlag Berlin Heidelberg.

- Kimber, R. . (1980). *The traffic capacity of roundabouts*. In: *TRRL Report LR942*. Crowthorne, U.K.: Transport and Road Research Laboratory.
- Krista, J., Chandra, A., Alexiadis, V., & Skabardonis, A. (2004). *Traffic Analysis Toolbox Volume II: Decision support methodology for selecting traffic analysis tools*. Report No. *FHWA-HRT-04-039*. Oakland, California: Cambridge Systematics, Inc., Federal Highway Administration (FHWA).
- Lacalle, M. J. (2003). *Calibración Del Microsimulador AIMSUN para Flujo Ininterrumpido en La Ciudad de Santiago*. Disertación de maestría. Pontificia Universidad Católica de Chile, Santiago de Chile, Chile.
- Luttinen, T. (2004). *Capacity and Level of Service at Finnish Unsignalized Intersections*. Helsinki: Finnish Road Administration.
- Maia, F. V. B. (2007). *Calibração e Validação de Modelos de Meso e Microsimulação do Tráfego para a Avaliação de Intervenções Tático-Operacionais na Malha Viária Urbana*. Dissertação de mestrado, Programa de Mestrado em Engenharia de Transportes. Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, Ceará.
- Mclean, J. R. (1989). *Two-Lane Traffic Operations: Theory and Practice*. Nova York: Gordon & Breach.
- Poyares, C. N. (2000). *Crítérios para Análise dos Efeitos de Políticas de Restrição ao Uso de Automóveis em Áreas Centrais*. Dissertação de mestrado em programa de Engenharia de Transportes - COPPE. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.
- Rego, R. C. B., & Semente, R. S. (2017). Sistema de controle de semáforo baseado na densidade de tráfego. *Anais do Encontro de Computação do Oeste Potiguar ECOP/UFERSA*, p. 8.
- Sbayti, H., & Roden, D. (2010). *Best Practices in the Use of Micro Simulation Models*. Transportation Research Board. Arlington, Virgínia: National Cooperative Highway Research Program (NCHRP).
- Siegloch, W. (1973). Die Leistungsermittlung an Knotenpunkten ohne Lichtsignalsteuerung

[Capacity calculations at unsignalized intersections]. *Strassenbau und Strassenverkehrstechnik 1541973*.

TRB. (2000). *Highway capacity manual: HCM 2000*. Washington, DC: Transportation Research Board - National Research Council. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HY.1943-7900.0000746](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0000746).

TRB. (2010). *Highway Capacity Manual*. Washington, DC: Transportation Research Board - National Research Council.

TSS. (2003). *Getting started User's Manual AIMSUN - GETRAM Open traffic simulation environment*.

Vasconcelos, L., Neto, L., Santos, S., Silva, A. B., & Seco, Á. (2014). Calibration of the Gipps Car-following Model Using Trajectory Data. *Transportation Research Procedia*, 3(July), 952–961. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2014.10.075>

Anexos

Anexo A: Procedimento de conferência do plano de regulação do cruzamento através de método de Webster.

Inicialmente foi realizado o cálculo do tempo de limpeza para posterior conferência com o tempo do ciclo do semáforo em estudo. Foi necessário levantar os pontos de conflitos para cada uma das fases do ciclo e suas respectivas medidas, conforme se observa nas figuras A.1, A.2, A.3 e A.4. Os resultados do cálculo do tempo de limpeza podem ser observados na tabela A.1.

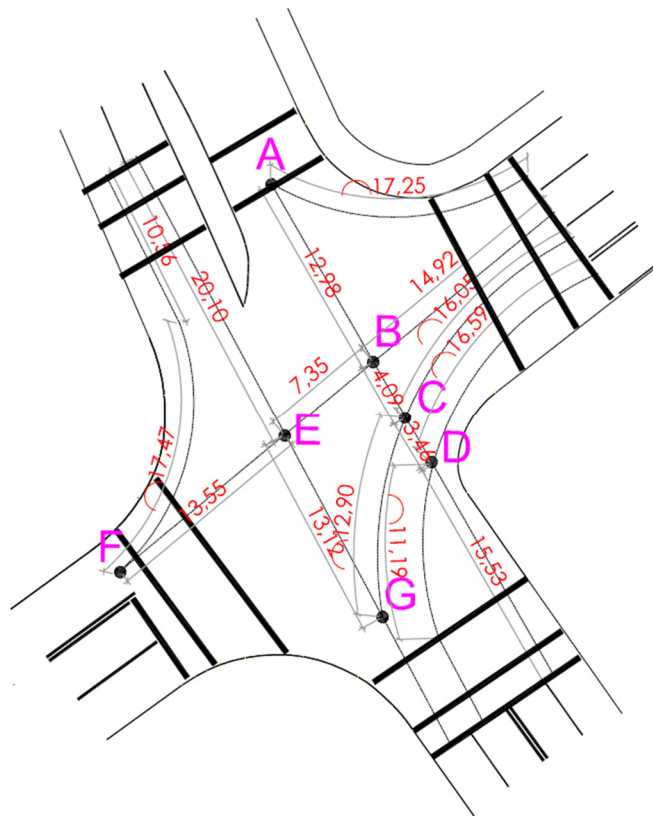


Figura A. 1 - Pontos de conflito no cruzamento em estudo da mudança de fase 1 para 2

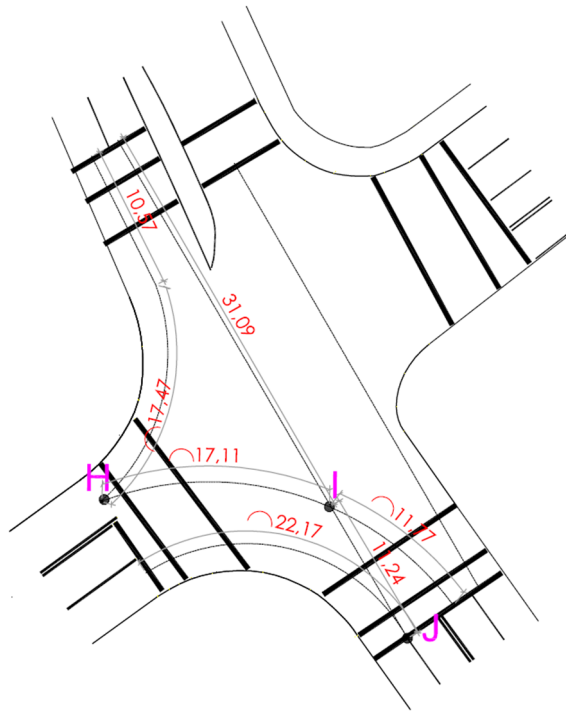


Figura A. 2 - Pontos de conflito no cruzamento em estudo da mudança de fase 2 para 3

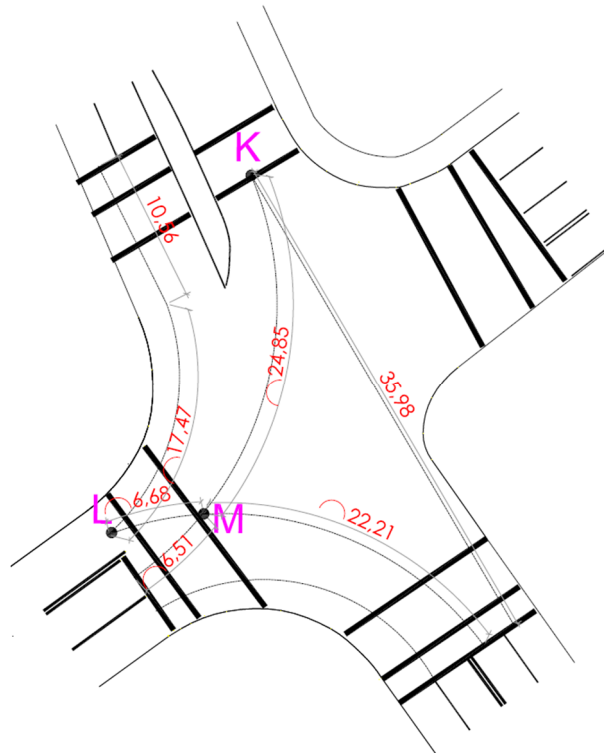


Figura A. 3 - Pontos de conflito no cruzamento em estudo da mudança de fase 3 para 4

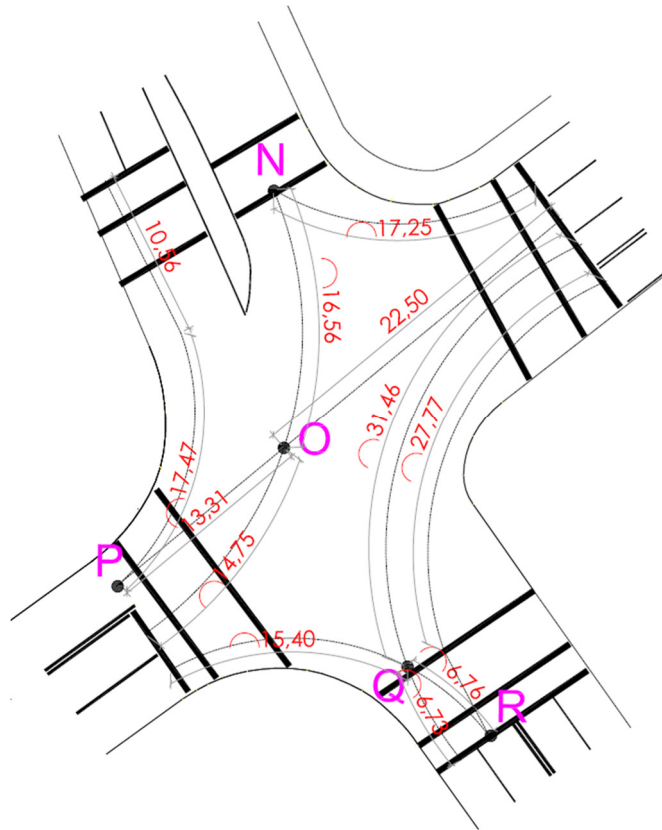


Figura A. 4 - Pontos de conflito no cruzamento em estudo da mudança de fase 4 para 1

Tabela A. 1 - Cálculo dos tempos de limpeza por fase

	Conflito	Movimento	Distância m	Velocidade Considerada m/s	Tempo de Percurso	Tempo de limpeza	Tempo de Limpeza Considerado
fase 1	Ponto A (fecha 2- abre 7)	2	22,25	10	2,23	1,38	1
		7	36,06	10	3,61		
	Ponto B (fecha 1- abre 7)	1	19,92	15	1,33	0,98	1
		7	23,08	10	2,31		
	Ponto C (fecha 3 - abre 7)	3	21,05	10	2,11	0,21	1
		7	18,99	10	1,90		
	Ponto D (fecha 3 - abre 7)	3	21,59	10	2,16	0,61	1
		7	15,53	10	1,55		
Ponto E (fecha 1- abre 9)	1	27,27	15	1,82	0,19	1	
	9	20,1	10	2,01			
Ponto F (fecha 1 - abre 8)	1	40,82	15	2,72	0,08	1	
	8	28,03	10	2,80			
Ponto G (fecha 3 - abre 9)	3	33,95	10	3,40	0,07	1	
	9	33,22	10	3,32			
fase 2	Ponto H (fecha 8 - abre 6)	8	33,04	10	3,30	0,42	1
		6	28,88	10	2,89		
	Ponto I (fecha 9 - abre 6)	9	36,09	15	2,41	1,23	2
		6	11,77	10	1,18		
		9	47,33	15	3,16	0,94	1

	Ponto J (fecha 9 - abre 5)	5	22,17	10	2,22		
fase 3	Ponto K (fecha 7 - abre 4)	7	40,98	15	2,73	0,40	1
		4	31,36	10	3,14		
	Ponto L (fecha 6 - abre 8)	6	33,89	10	3,39	0,59	1
		8	28,03	10	2,80		
	Ponto M (fecha 6 - abre 4)	6	27,21	10	2,72	2,07	3
		4	6,51	10	0,65		
fase 4	Ponto N (fecha 4 - abre 2)	4	22,25	10	2,23	0,91	1
		2	31,31	10	3,13		
	Ponto O (fecha 4 - abre 1)	4	19,75	10	1,98	0,28	1
		1	22,5	10	2,25		
	Ponto P (fecha 8 - abre 1)	8	33,03	10	3,30	0,28	1
		1	35,81	10	3,58		
	Ponto Q (fecha 5 - abre 3)	5	20,4	10	2,04	1,11	1
		3	31,46	10	3,15		
	Ponto R (fecha 5 - abre 3)	5	27,16	10	2,72	0,06	1
		3	27,77	10	2,78		

Conforme o capítulo 2.1.2, para a conferência do plano de regulação inicialmente se fez necessário calcular o débito de saturação teórico do cruzamento, para a etapa em questão se considerou os seguintes fatores de ajustamento apresentados na tabela A.2.

Tabela A. 2 - Valores dos fatores de ajuste

movimento	fw	fi	fz	fp	ft	fd
1	0,952	0,9	1	1	1	1
2	0,952	0,9	1	0,95	1	0,909747
3	0,952	0,9	1	0,95	1	0,932372
4	0,994	0,9	1	1	1	0,938575
5	0,994	0,9	1	0,95	1	0,9002
6	0,968	1,1	1	1	1	0,936869
7	0,968	1,1	1	0,95	1	1
8	0,968	1,0	1	0,95	1	0,906542
9	0,968	1,0	1	1	1	1

Em seguida se calculou o índice de carga do cruzamento a partir dos dados levantados em campo. Para obter o valor do índice de carga do cruzamento se realizou a soma dos maiores valores da carga dos movimentos que estavam presentes apenas em uma fase, de forma a não sobredimensionar o índice.

Após a determinação dos índices de carga mais relevantes de cada fase, foi possível obter os parâmetros de dimensionamento para a interseção. A tabela A.3 apresenta os valores resultantes da metodologia de cálculo apresentada no capítulo 2, tais como: procura de

tráfego (q), débito de saturação (s), índice de carga (y), tempo de verde (g), capacidade da via (Q) e grau de saturação (x).

Tabela A. 3 - Parâmetros de dimensionamento para a interseção

Fase	Movimento	q (Veí/h)	s(veí/h)	Carga de cada movimento y_i	Q (veí/h)	Grau de saturação x
1	1	281	1702,53	0,17	386,34	0,73
1	2	200	1471,43	0,14	274,98	0,73
1	3	123	1508,02	0,08	169,11	0,73
4	4	238	1648,93	0,14	327,22	0,73
3 e 4	5	291	1502,43	0,19	400,09	0,73
3	6	195	1895,40	0,10	268,10	0,73
2 e 3	7	527	1921,96	0,27	724,56	0,73
2 e 4	8	229	1625,13	0,14	314,85	0,73
2	9	345	1887,02	0,18	474,33	0,73
Total			Y	0,60		

Sabendo-se que o valor de tempo perdido do ciclo é de 20s, foi possível determinar os valores de Ciclo mínimo ($C_{mín}$), Ciclo máximo ($C_{máx}$), Ciclo óptimo (C_o) e Reserva de capacidade, como demonstra a tabela A.4.

Tabela A. 4 - Valores de ciclo e reserva de capacidade

Carga Total Y	Tempo Perdido T	$Y_{máximo}$	Ciclo Mínimo	Ciclo Óptimo	Ciclo Máximo	Reserva de Capacidade
0,60	20	0,75	49,394	86,44	120	0,26

Por fim, é realizado o cálculo do tempo de verde útil de cálculo de cada fase através dos resultados obtidos anteriormente. A tabela A.5 apresenta a repartição dos valores de verde útil de cálculo e os atuais.

Tabela A. 5 - Repartição de tempo de verde útil por ciclo

Fase	movimento	Carga de cada fase y_i	Repartição do ciclo pelas fases	
			Verde útil cálculos g (s)	Verde útil atual g (s)
1	1	0,17	24,96	24
1	2	0,14	20,56	24
1	3	0,08	12,34	24
4	4	0,14	21,83	17
3 e 4	5	0,19	29,29	33
3	6	0,10	15,56	16
2 e 3	7	0,27	41,47	49
2 e 4	8	0,14	21,31	50
2	9	0,18	27,65	33

