



FCTUC DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
FACULDADE DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE DE COIMBRA

Soluções Atuadas de Sinais Luminosos: Comparação do Desempenho de Diferentes Planos de Regulação e Arquiteturas de Detecção de Tráfego Aplicadas a Cruzamentos Isolados

Dissertação apresentada para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil
na Especialidade de Urbanismo Transportes e Vias de Comunicação

Autor

Marta Filipa da Conceição Silva

Orientador

Professor Doutor Álvaro Jorge Maia Seco

Esta dissertação é da exclusiva responsabilidade do seu autor, não tendo sofrido correcções após a defesa em provas públicas. O Departamento de Engenharia Civil da FCTUC declina qualquer responsabilidade pelo uso da informação apresentada

Coimbra, Julho, 2016

AGRADECIMENTOS

Não poderia deixar de prestar aqui a minha gratidão a algumas pessoas que direta ou indiretamente contribuíram para que fosse possível a conclusão deste trabalho.

Começo por agradecer ao Professor Doutor Álvaro Jorge Maia Seco, Professor do Departamento de Engenharia Civil (DEC) da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra (FCTUC), pela orientação científica neste trabalho, pelo constante incentivo e disponibilidade, pelos importantes conhecimentos que me transmitiu e pela forma amigável com que sempre me recebeu.

Um agradecimento ao Eng.º Luís Coimbra pelo importante apoio na aprendizagem do software de microssimulação utilizado durante este trabalho.

Aos meus pais, não sei como agradecer todo o seu apoio, esforço e dedicação incondicional que me deram ao longo destes anos, acompanhando me sempre em todo o meu percurso académico, nem sempre fácil, dando-me as melhores condições para poder estudar e concluir os meus estudos no ensino superior, bem como a compreensão de todas as minhas ausências. À minha irmã pela sua amizade, cumplicidade e apoio em momentos nem sempre fáceis.

Um agradecimento especial ao Luís por todo o seu amor, apoio incondicional e compreensão ao longo destes anos. Tu mais do que ninguém acompanhaste cada minuto deste trabalho.

Por fim, mas não menos importantes um agradecimento aos excelentes amigos que tive a felicidade de conhecer durante estes anos de curso em Coimbra, que de alguma forma me acompanharam e apoiaram no meu percurso académico. À minha amiga Rita por toda a disponibilidade, estímulo e amizade que me ofereceu especialmente nesta reta final .

RESUMO

As soluções de gestão do tráfego rodoviário e pedonal são, têm que ser, particularmente em ambientes urbanos, cada vez mais soluções ativas, ajustadas em tempo real com base em informação recolhida usando os mais variados meios. Na área do controlo de tráfego em interseções isoladas com recurso a sinais luminosos existe em diferentes países um conjunto variado de diferentes soluções de referência, com diferentes opções relativamente ao número, tipo e localização dos sistemas de monitorização em tempo real do tráfego, não sendo sempre claro quais são as soluções mais eficientes para cada situação de tráfego e geometria de interseção.

Nesta dissertação pretende efetuar-se uma análise comparativa de várias soluções tipo, quando aplicadas a interseções isoladas correntes de diferentes geometrias típicas e sob diferentes padrões e níveis de procura. O desempenho das várias estratégias de atuação suportadas por diferentes arquiteturas de localização de detetores, foram avaliadas através do recurso a microsimulação com utilização do software AIMSUN.

Os resultados obtidos demonstraram que geralmente as soluções totalmente atuadas são as estratégias de gestão de tráfego que apresentam uma maior eficiência no desempenho das interseções isoladas, reduzindo os tempos médios de atraso.

Palavras-chave: sinais luminosos, controlo atuado, microsimulação, cruzamento isolado, Webster

ABSTRACT

The current road and pedestrian traffic management solutions are, particularly in urban environments, more and more active solutions adjusted in real time based on information collected, using various means. In the traffic control area at isolated intersections using the light signals, there is a diverse set of different referenced solutions in different countries, with different options regarding the number, type and location of the real time traffic monitoring systems. Furthermore, it is not always clear which solution performs better on every traffic scenario and intersection geometry.

This study compares and analyzes several standard solutions, when applied to isolated intersections different flows of standard geometries under different conditions and demand levels. The performance of the several operating strategies supported by different architectures of the sensors' location were evaluated using the microsimulation AIMSUN software.

The results of this study show that, generally, the actuated signal control are the traffic management strategies that show a greater efficiency in the performance of isolated intersections, reducing the average delay time.

Keywords: traffic signal, microsimulation, actuated control, isolated intersection, Webster

ÍNDICE

1 INTRODUÇÃO	1
1.1 Importância do tema	1
1.2 Definição dos Objetivos e da Metodologia de Análise	2
1.3 Estrutura da Dissertação	3
2 ESTADO DA ARTE	5
2.1 Enquadramento Geral	5
2.2 Sinais Luminosos a Tempos Fixos	5
2.2.1 Critérios de otimização dos semáforos a tempos fixos	6
2.2.2 Plano de Regulação Semafórico – Método de Webster	6
2.3 Sinais Luminosos de Comando Atuado	9
2.3.1 Soluções Semi-Atuadas	10
2.3.2 Solução Totalmente Atuada	11
2.3.3 Sistemas de Detecção/Detetores	12
2.3.4 Recomendações FHWA	13
2.3.5 O Sistema MOVA	16
2.3.6 Outros sistemas de referência: Soluções coordenadas	17
2.4 Considerações Finais	19
3 Identificação do Problema e METODOLOGIA DE ANÁLISE	20
3.1 O Problema, os Objetivos e a Metodologia Base de Análise	20
3.2 Identificação dos Indicadores de Desempenho	21
3.3 A ferramenta da Microssimulação	22
3.4 As Estratégias em Análise	22
3.4.1 Conjunto de Estratégias 1	23
3.4.2 Conjunto de Estratégias 2	26
3.5 Definição dos Cenários	26
3.5.1 Layout/Geometria	27
3.5.2 Características da Procura	27
3.5.2.1 Perfil base da Procura	28
3.5.2.2 Repartição Direcional do Tráfego	29

3.5.2.3 Composição do Tráfego	29
3.5.3 Comportamento dos condutores	29
3.5.4 Os cenários de análise	30
3.6. Construção do Modelo	30
3.6.1 Estimativa do Fluxo de Saturação e dos Tempos Perdidos	31
3.6.2 Capacidade e Taxa de Saturação	33
3.6.3 Coeficiente de Equivalência	34
3.6.4 Geração de Tráfego	35
3.6.5 Os Planos de Regulação de referência	36
4 ANÁLISE DOS RESULTADOS	40
4.1 Conjunto Estratégias 1	40
4.1.1 Resultados referentes ao Layout 1	41
4.1.2 Resultados referentes ao Layout 2	44
4.1.3 Análise Comparativa entre o Layout 1 e o Layout 2	47
4.2 Conjunto Estratégias 2	47
5 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS	49
5.1 Conclusões	49
5.2 Trabalhos Futuros	50
6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	51

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2. 1 - Evolução temporal dos sinais luminosos das correntes de tráfego de um cruzamento a duas fases (Costa et al 2008, pág.35).....	6
Figura 2. 2 - Relação entre a duração do ciclo, a demora e a capacidade (Costa et al, 2008, pág.36	8
Figura 2. 3 - Solução Semi-atuada com ativação e extensão dinâmica da fase secundária (adaptado Costa et al,2008) a) cruzamento com solução semi-atuada b) Fluxograma com lógica de atuação	10
Figura 2. 4 - Solução totalmente atuada com ativação e extensão dinâmica das fases	11
Figura 2. 5 - Lógica de ativação para a solução totalmente atuada do exemplo anterior.....	12
Figura 2. 6 - Parâmetros que definem a duração de cada fase, FHWA.....	13
Figura 2. 7 - Exemplo aplicativo do intervalo de extensão (FHWA,2008).....	15
Figura 2. 8 - – Localização dos detetores na estratégia de comando atuado MOVA (adaptado Department of Transport,1997)	17
Figura 3. 1 – Localização do detetor nas soluções semi-atuadas nos layouts 1 e 2	23
Figura 3. 2 – Localização dos detetores nas soluções totalmente atuadas nos Layouts 1 e 2 ..	24
Figura 3. 3 – Lógica de atuação para as soluções semi-atuadas.....	25
Figura 3. 4 – Lógicas de atuação para as soluções totalmente atuadas	25
Figura 3. 5 – Esquema representativo da análise da localização ótima do sensor	26
Figura 3. 6 - Geometria do Layout 1 e Layout 2, respetivamente.....	27
Figura 3. 7 – Gráfico representativo do perfil base da procura (López, 2014)	28
Figura 3. 8 – Padrões reais e conceptuais de partidas de veículos (Costa et al, 2008, pág.20)	31
Figura 3. 9 – Esquema representativo da disposição dos sensores para o layout1	32
Figura 3. 10 – Gráfico da procura para os diferentes níveis de saturação.....	34
Figura 3. 11 – Diferentes tipos de geração de veículos no AIMSUN (adaptado, TSS, 2013a))	36
Figura 3. 12 – Esquema representativo do Layout 2	37
Figura 4. 1 – Relação entre o tempo de extensão e o tempo médio de atraso	48

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2. 1 - Intervalo padrão para o tempo máximo de verde (FHWA, 2008).....	14
Tabela 2. 2 - Intervalo padrão para o tempo mínimo de verde que responda à expectativa do condutor (FHWA, 2008)	14
Tabela 2. 3 - Tempo mínimo de verde para limpar as filas de espera (FHWA, 2008).....	15
Tabela 2. 4 - Duração do intervalo de extensão, para soluções de comando atuado com detecção em modo de presença (FHWA,2008).....	16
Tabela 3. 1 – Velocidade desejada para veículos ligeiros e pesados para diferentes cenários.	30
Tabela 3. 2 – Plano de regulação	32
Tabela 3. 3 – Valores obtidos para o fluxo de saturação e tempo perdido.....	33
Tabela 3. 4 - Coeficientes de equivalência geralmente adotados (Costa et al, 2008)	34
Tabela 3. 5 – Valores do fluxo de saturação e da capacidade estimados	38
Tabela 3. 6 – Tempos verdes máximos para cada fase dos diferentes planos de regulação relativos ao layout 1.....	38
Tabela 3. 7 – Tempos verdes máximos para cada fase dos diferentes planos de regulação relativos ao layout 2.....	39
Tabela 4. 1 – Tempos médios de atraso para cenários com taxa de saturação 50% e velocidade constante, Layout 1.....	41
Tabela 4. 2 - Tempos médios de atraso para cenários com taxa de saturação 70% e velocidade constante, Layout 1.....	41
Tabela 4. 3 - Tempos médios de atraso para cenários com taxa de saturação 90% e velocidade constante, Layout 1.....	41
Tabela 4. 4 - Tempos médios de atraso para cenários com taxa de saturação 50% e velocidade variável, Layout 1	42
Tabela 4. 5 - Tempos médios de atraso para cenários com taxa de saturação 70% e velocidade variável, Layout 1l.....	42
Tabela 4. 6 - Tempos médios de atraso para cenários com taxa de saturação 90% e velocidade variável, Layout 1	42
Tabela 4. 7 - Tempos médios de atraso para cenários com taxa de saturação 50% e velocidade variável, Layout 1	42
Tabela 4. 8 - Tempos médios de atraso para cenários com taxa de saturação 70% e velocidade variável, Layout 1	43

Tabela 4. 9 - Tempos médios de atraso para cenários com taxa de saturação 90% e velocidade variável, Layout 1	43
Tabela 4. 10 - Tempos médios de atraso para cenários com taxa de saturação 50% e velocidade variável, Layout 2	44
Tabela 4. 11 - Tempos médios de atraso para cenários com taxa de saturação 70% e velocidade variável, Layout 2	44
Tabela 4. 12 - Tempos médios de atraso para cenários com taxa de saturação 90% e velocidade variável, Layout 2	44
Tabela 4. 13 - Tempos médios de atraso para cenários com taxa de saturação 50% e velocidade variável, Layout 2	45
Tabela 4. 14 - Tempos médios de atraso para cenários com taxa de saturação 70% e velocidade variável, Layout 2	45
Tabela 4. 15 - Tempos médios de atraso para cenários com taxa de saturação 90% e velocidade variável, Layout 2	45
Tabela 4. 16 - Tempos médios de atraso para cenários com taxa de saturação 50% e velocidade variável, Layout 2	45
Tabela 4. 17 - Tempos médios de atraso para cenários com taxa de saturação 70% e velocidade variável, Layout 2	46
Tabela 4. 18 - Tempos médios de atraso para cenários com taxa de saturação 90% e velocidade variável, Layout 2	46
Tabela 4. 19 – Resultados obtidos quando aplicado o Conjunto de Estratégias 2	48

SIMBOLOGIA

A_i – é o tempo de amarelo após a fase i

Cap – Capacidade dado pelo AIMSUN

C_0 – é a duração ótima do ciclo

C – é a duração do ciclo

Coef. Eq. – Coeficiente de equivalência

D1, D2, D3 e D4 – representa o detetor instalado

d_1 – é a distância a que se encontra o sensor da linha de paragem

d_y – é a distância a que se encontra o sensor y em metros

$d_{percorrida}$ – é a distância percorrida dada pelo AIMSUN

g_i – é o tempo de verde útil para a fase i

g_A e g_B – representam os tempos de verde útil da fase A e da fase B

G_i – é o tempo de verde real

I_i – é o tempo de transição

L – é o de tempo perdido no ciclo

l_i – é o tempo perdido da fase i

n – é o número total de veículos em vei.

n_f – é o número de fases que constitui o ciclo

n_4 – representa o total de 4 veículos

n_{n-4} – representa a diferença do número total de veículos e 4 veículos

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

Q – é a capacidade global do cruzamento em vei/h

Q_i – representa a capacidade da via para uma determinada proporção de pesados i

$Q_{100/0}$ – representa a capacidade da via para 100% de ligeiros

r_i – é o tempo de vermelho integra entre a fase i e $i+1$

s – é o fluxo de saturação em vei/h

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

s_A e s_B – representam os fluxos de saturação de cada entrada em vei/h

T_{ext} – é o tempo de extensão da fase do movimento em segundos

t_{pa} – é o tempo perdido no arranque

t_{ap} – é o tempo adicional de paragem

t_p – é o tempo perdido por fase

t_4 – é o instante de passagem do 4º veículo detetado em s

t_{n-4} – é o instante de passagem do $n-4$ veículo detetado em s

t_{total} – o tempo total experimentado no AIMSUN

$t_{\text{atrasomédio}}$ – é o indicador para a avaliação final, em s/vei
 $t_{\text{atrasomédioAimsun}}$ – é o valor fornecido pelo AIMSUN, em s/km
 $V_{\text{simulados}}$ – corresponde ao número de veículos simulados na rede
 v_t – é a velocidade do tráfego de aproximação em km/h
 x – é a percentagem da repartição da via
 x' – é a percentagem de pesados
 Y – é o índice de carga do cruzamento
 y_i – é o índice de carga da fase i
 y_{cj} – é o índice de carga da corrente de tráfego j

ABREVIATURAS

AIMSUN – Advanced Interactive Microscopic Simulator for Urban and Non-Urban Networks

FHWA – Federal Highway Administration

HCM – Highway Capacity Manual

MOVA – Microprocessor Optimised Vehicle Actuation

O/D – Origem/Destino

SCATS – Sydney Co-ordinated Adaptive Traffic System

SCOOT – Split Cycle and Offset Optimisation Technique

TRL – Transport Research Laboratory

TSS – Transport Simulation Systems

UTOPIA – Urban Traffic Optimization by integrated Automation

1 INTRODUÇÃO

1.1 Importância do tema

Devido ao tendencial sistemático crescimento do tráfego, bem como das frequentes alterações dos seus padrões, e de forma assegurar as condições de segurança rodoviária e de escoamento, é cada vez mais importante que seja possível ajustar em tempo real as soluções de gestão de tráfego rodoviário e pedonal reguladas por sinais luminosos, especialmente em meios urbanos.

Inicialmente utilizavam-se apenas sinais luminosos de tempos fixos, em que independentemente das variações dos fluxos de tráfego estas soluções mantêm sempre a mesma sequência de instruções durante intervalos de tempo constantes, daí serem menos eficientes quando a procura se desvia bastante dos valores tomados como referência. Com os desenvolvimentos e avanços tecnológicos, particularmente nos sistemas de comunicação e de informática, cada vez mais existem novos instrumentos e processos de recolha remota e em tempo real de informação. Tal fato levou a uma cada vez maior aplicação de novos sistemas, dito atuados, capazes de se adaptarem quase instantaneamente à procura.

Na gestão de tráfego em cruzamentos de nível o recurso à sinalização luminosa é uma solução de custo relativamente baixo, tanto na instalação como na manutenção, apresentando bons níveis de desempenho, com elevada redução dos pontos de conflito entre as trajetórias das correntes de tráfego da interseção, face a muitas soluções passivas de regulação.

Existem diferentes soluções de referência tais como solução semi-atuada com ativação e extensão dinâmica da fase secundária ou apenas com fase especial para as viragens à esquerda, solução totalmente atuada com ativação e extensão dinâmica das fases, solução atuada com fase de espera para períodos mortos, soluções com ativação dinâmica de fases pedonais entre outras de carácter mais específico. No entanto estas soluções variam consoante o país em questão, o tipo e localização dos sistemas de monitorização em tempo real de tráfego (soluções semi-atuadas ou totalmente atuadas, utilização de detetores apenas junto às entradas das interseções ou utilização de pares de detetores...).

Como nem sempre é claro quais as soluções mais eficientes para cada situação de tráfego e geometria de interseção pretende-se analisar de forma comparativa várias soluções tipo (semi-atuadas ou atuadas baseadas em diferentes arquiteturas de localização de detetores), quando aplicadas a interseções correntes sob diferentes padrões de procura.

1.2 Definição dos Objetivos e da Metodologia de Análise

O presente trabalho centra-se na análise comparativa de várias estratégias de gestão de tráfego reguladas por sinais luminosos aplicadas a cruzamentos isolados, tendo em conta diversos planos de regulação e diferentes arquiteturas de deteção. No entanto este trabalho teve o foco principal na avaliação do desempenho das soluções de controlo semaforizado atuado, uma vez que, dada a ampla gama de soluções de referência, nem sempre é possível ter a certeza sobre qual a melhor solução para determinada interseção.

Para alcançar este objetivo a avaliação comparativa suporta-se no estudo do desempenho relativo das diferentes estratégias, sujeitas cada uma delas a diferentes pesos relativos do tráfego nos eixos rodoviários que se cruzam e diferentes níveis de procura. Isto é, para diferentes tipos de geometria de interseção com diferentes distribuições de tráfego pelos eixos rodoviários que se cruzam, pretende-se encontrar a melhor solução, tanto a nível de estratégia de regulação semafórica como a respetiva localização ótima dos detetores associados à solução.

Por último, foi também objetivo deste estudo a apresentação clara e simples dos conceitos e resultados, por forma a permitir a fácil compreensão e análise tendo em conta as características base deste exercício. A motivação para tal deve-se ao fato da existência de um reduzido número de estudos de investigação sobre este tema.

O presente estudo baseou-se na utilização do *software* de microssimulação AIMSUN, *Advanced Interactive Microscopic Simulator for Urban and Non-Urban Networks* (AIMSUN – versão 7.0.4. Outubro 2012), disponibilizado pelo Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Coimbra, visto que este apresenta todas as valências necessárias para a realização deste trabalho, sendo considerado um dos mais conceituados instrumentos de trabalho pela comunidade científica da especialidade.

A metodologia de análise deste trabalho passou pelas seguintes fases: (i) estudo das diferentes soluções semaforizadas de referência; (ii) definição dos indicadores de desempenho; (iii) definição das estratégias; (iv) definição dos cenários, e (v) construção e calibração do modelo.

A primeira fase passou por uma aprendizagem sobre os conceitos relativos à aplicação das diferentes soluções de gestão de tráfego reguladas por sinais luminosos, tais como soluções a tempos fixos, soluções semi-atuadas e soluções totalmente atuadas.

Em seguida, definiram-se os indicadores de desempenho com base no resultados fornecidos pelo AIMSUN de forma a responder aos objetivos deste trabalho. Para tal consideraram-se os seguintes indicadores de desempenho: o tempo médio de atraso e o número de paragens.

A definição das estratégias passou pela adoção de dois conjuntos de estratégias, em que o primeiro conjunto de estratégias visa testar todas as soluções referidas na primeira fase com diversos planos de regulação, variação da localização de sensores; enquanto no segundo grupo de estratégias optou-se por uma análise à variação do tempo de extensão e respetiva localização do sensor.

Quanto aos cenários, procurou-se introduzir diferentes condições na análise, tais como:

- 1) Variação da velocidade dos veículos na rede;
- 2) Níveis de Saturação (S): 50%, 70% e 90%;
- 3) Proporção via principal/via secundária: 50/50 (%), 70/30 (%) e 90/10 (%),

isto para o primeiro conjunto de estratégias, quanto ao segundo:

- 1) Nível de Saturação (S): 70%;
- 2) Proporção via principal/via secundária: 70/30 (%).

A construção e calibração do modelo tentou reproduzir o comportamento dos veículos em interseções isoladas, baseando-se na aplicação dos parâmetros de calibração de *default* usados no AIMSUN, tentando garantir um modelo próximo da realidade.

1.3 Estrutura da Dissertação

Esta dissertação encontra-se dividida em 5 capítulos. O presente capítulo, é de introdução ao trabalho elaborado, onde é apresentada a motivação para a sua realização, os objetivos e respetiva metodologia adotada.

No capítulo 2 é feita uma apresentação sobre o tema em estudo com base nas referências bibliográficas, onde é apresentada cada estratégia de regulação semafórica, bem como a sua heurística de funcionamento e sua aplicabilidade. Sendo também feita uma breve apresentação de alguns sistemas centralizados de controlo de tráfego (SCOOT; SCATS; UTOPIA).

Durante o capítulo 3 são apresentadas de forma detalhada quase todas as fases da metodologia de análise, começando por enumerar alguns dos problemas que levaram aos objetivos do presente trabalho, é feita também uma breve apresentação à ferramenta de simulação adotada. Em seguida apresenta as estratégias a analisar e os cenários definidos, estando em falta apenas a exposição de todos os parâmetros necessários à construção do modelo, a qual é feita na parte final deste capítulo.

O capítulo 4 é referente à apresentação e discussão dos resultados obtidos de todas as análises realizadas, terminando com uma análise geral dos resultados.

Por fim, no capítulo 5, são apresentadas conclusões sobre os resultados e o trabalho alcançado durante este estudo, e ainda uma breve nota sobre possíveis trabalhos futuros.

2 ESTADO DA ARTE

2.1 Enquadramento Geral

Os primeiros cruzamentos semafóricos (Costa et al, 2008) aparecem por volta de 1868, em Londres, onde respondiam a um comando manual e os semáforos funcionavam a gás. Mais tarde surgem as lâmpadas de três cores (1918 em Nova Iorque) e só depois a resposta ao comando automático (1926 em UK).

A instalação de sinais luminosos nos cruzamentos tem como finalidade garantir a segurança de todos os utilizadores da rede viária, procurando otimizar as condições de fluidez de todos os movimentos de tráfego, aumentando assim a capacidade, diminuindo o tempo de viagem e prevenindo possíveis acidentes. Esta medida de gestão de tráfego permite algum controle sobre as decisões dos utilizadores, sobretudo na alteração de comportamentos (p. ex. velocidades) e na coordenação do tráfego na rede. A decisão de colocação de soluções semafóricas depende da matriz O/D do respetivo cruzamento, dos utilizadores (condutores, peões, ciclistas, ...), da possibilidade de acidentes, entre outros.

Os semáforos em cruzamentos de nível podem funcionar respondendo a diferentes tipos de comando, tais como as estratégias de regulação semafórica a tempos fixos, como de comando atuado.

2.2 Sinais Luminosos a Tempos Fixos

As soluções a tempos fixos apresentam uma sucessão de períodos de tempo constantes, isto é, mesmo tempo de verde, amarelo e vermelho em cada ciclo, independentemente da variação do fluxo de tráfego que chega ao cruzamento. Isto acontece, uma vez que o plano de regulação é independente das variações da procura registadas ao longo do tempo, bem como da velocidade de circulação, da composição do tráfego.

Genericamente, o plano de regulação é definido em função do período previsível de maior procura, o que tende a conduzir a estratégias de regulação semafórica pouco eficientes fora dos períodos de pico de procura, uma vez que nesses períodos, mesmo não gerando congestionamento no cruzamento, tende a provocar demoras excessivas aos condutores.

2.2.1 Critérios de otimização dos semáforos a tempos fixos

Um dos critérios de otimização (Costa et al,2008) mais utilizado na determinação do plano de regulação é a minimização do atraso total, o qual é obtido através do produto do atraso médio por veículo pelo débito de chegadas respetivo e, representa o comprimento médio da fila de espera. Mais tarde em vez da minimização do atraso total utilizou-se o número de paragens, que permitiu adotar novos critérios de otimização, como a minimização do consumo de combustível ou mesmo dos custos de operação.

Para se chegar à solução ótima o plano de regulação tem que ter em conta algumas restrições (impostas por razões de comodidade, segurança e operacionalidade), de modo a respeitar certos limites. Por exemplo, para a duração do tempo de verde geralmente o tempo mínimo é fixado em 8 segundos de forma a garantir a saída de pelo menos três veículos, a duração do ciclo deve estar compreendida entre 30 e 120 segundos (Costa et al, 2008), entre outros.

Um ciclo demasiado longo aumenta os tempos de vermelho o que leva à impaciência dos condutores devido aos longos períodos de espera, o que pode gerar violações do tempo de vermelho tanto pelos condutores como pelos peões; um ciclo excessivamente curto aumenta a frustração dos condutores induzindo-os também a violações da lei.

2.2.2 Plano de Regulação Semafórico – Método de Webster

Para que num cruzamento semafórico os veículos transitem de forma segura e confortável é essencial que o seu plano de regulação se ajuste adequadamente à procura, por isso o seu dimensionamento é efetuado com base no intervalo de pico. O Plano de regulação semafórico é constituído por fases e definido pelo tempo destinado a cada uma, os tempos de transição entre as fases bem como a duração do ciclo, como apresentado na figura 2.1.

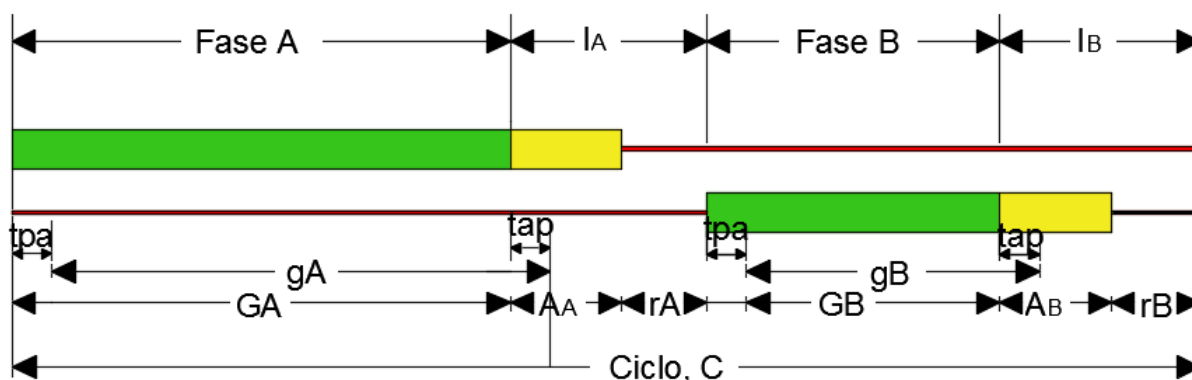


Figura 2. 1 - Evolução temporal dos sinais luminosos das correntes de tráfego de um cruzamento a duas fases (Costa et al 2008, pág.35)

A metodologia de dimensionamento de soluções a tempos fixos usada no presente trabalho para a determinação dos planos de regulação é a de Webster, que apesar de simples, atualmente ainda é tomada como referência na literatura especializada. Este método baseia-se (Webster,1958) na minimização das demoras médias infligidas às correntes de tráfego críticas de cada fase do plano de regulação adotado, com a restrição de estas correntes de tráfego ficarem a operar com a mesma taxa de saturação.

Este método desenvolve-se segundo um conjunto de fases que a seguir se indicam:

A) Índice de Carga das Fases e do Cruzamento

Estes índices traduzem o grau da necessidade do verde em percentagem do ciclo, sendo o índice de carga da fase j dado pelo rácio entre o fluxo verificado e o fluxo de saturação:

$$y_i = \max(q_{ji}/s_{ji}) = \max(y_{cj})$$

onde y_i é o índice de carga da fase i , q_{ij} é o débito de chegadas da corrente de tráfego j que avança na fase i ; s_{ji} é o débito de saturação da corrente de tráfego j que avança na fase i e y_{cj} é o índice de carga da corrente de tráfego j .

Quando estamos perante várias correntes de tráfego que avançam na mesma fase o valor adotado para o índice de carga da fase será o máximo associado à corrente de tráfego mais condicionante.

O índice de carga do cruzamento Y é obtido através da soma dos índices de carga das fases, ou seja:

$$Y = \sum y_i$$

onde Y é o índice de carga do cruzamento e y_i o índice de carga da fase i .

B) Tempo Perdido no Ciclo

O tempo perdido no ciclo, L , é o período de tempo num ciclo que não é utilizado pelos veículos, isto é, a soma dos tempos perdidos em cada fase, quando o sinal se encontra vermelho ou vermelho e amarelo.

$$L = \sum (l_i + r_i + A_i)$$

onde l_i é o tempo perdido da fase i , r_i é o tempo de vermelho integral entre a fase i e $i+1$ e A_i é o tempo de amarelo após a fase i .

Por simplificação, normalmente admite-se que o tempo perdido por fase, l_i , é aproximadamente nulo o que implica que o tempo perdido no ciclo é dado por:

$$L = 5 * n_f$$

em que n_f é o número de fases que constitui o ciclo e 5 é o valor correspondente ao tempo de transição, admitindo 3 segundos de vermelho e 2 de amarelo.

C) Duração do Ciclo Ótimo

Dentro do intervalo de ciclos admissíveis, como se pode observar na figura 2.2, é fundamental determinar o ciclo ótimo que responda melhor à procura minimizando as demoras, paragens, ou seja, correspondendo ao intervalo de tempo com o menor tempo de atrasos para os veículos que usam o cruzamento.

$$C_o = \frac{1.5 * L + 5}{1 - Y}$$

em que C_o é a duração ótima do ciclo, L é o tempo perdido no ciclo e Y o índice de carga do cruzamento.

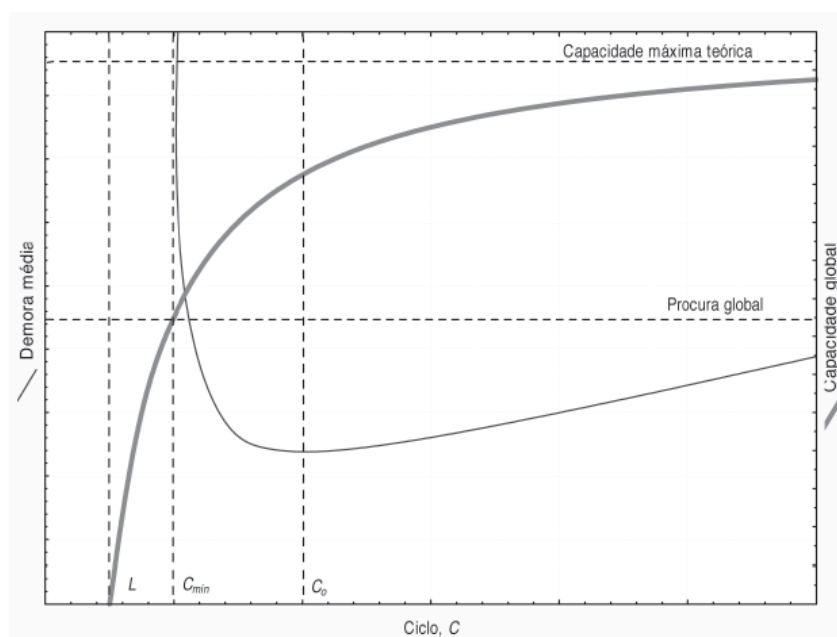


Figura 2. 2 - Relação entre a duração do ciclo, a demora e a capacidade (Costa et al, 2008, pág.36)

D) Tempos de verde útil

A distribuição dos tempos de verde pelo ciclo referente a cada fase é obtida considerando a proporcionalidade entre os tempos de verde útil e os índices de carga. A repartição do ciclo é definida por Webster pela seguinte expressão:

$$g_i = y_i \frac{C - L}{Y}$$

onde g_i é o tempo de verde útil para a fase i , C é a duração do ciclo ótimo, L o tempo perdido no ciclo e Y o índice de carga do cruzamento.

2.3 Sinais Luminosos de Comando Atuado

As soluções de comando atuado são sistemas mais sofisticados que permitem dar resposta em tempo real respondendo quer às flutuações do tráfego rodoviário ou pedonal, quer às alterações que possam ocorrer ao longo do tempo de vida útil. Estas soluções têm em consideração diversas características, tais como a procura, a geometria do cruzamento, etc.

As estratégias de gestão de tráfego de comando atuado ajustam-se continuamente à realidade, devido à permanente recolha de informação relativa às correntes de tráfego do cruzamento, obtida através de sensores colocados nos acessos, quer rodoviários quer pedonais, à interseção.

Existem diversas estratégias de regulação semafórica, desde as mais simples às mais complexas, com capacidade para responder a diferentes objetivos (Costa et al 2008). Destacando-se algumas das seguintes estratégias de regulação dos sinais luminosos:

- Variação em tempo real da duração das fases dependendo do nível momentâneo de procura;
- Decisão em tempo real sobre a relevância de chamada de determinada fase ou sequência de fases;
- Aplicação de estratégias anti-bloqueio no próprio cruzamento, em cruzamentos adjacentes ou ao nível da rede, através do controlo dos fluxos e da deteção de incidentes;
- Variação dinâmica da prioridade relativa atribuída a cada corrente de tráfego rodoviário ou pedonal em função da sua importância relativa em cada momento;
- Defesa da segurança e minimização das demoras dos peões, bem como minimização das demoras impostas aos veículos através de uma monitorização mais apertada dos movimentos dos peões;
- Controlo das velocidades dos veículos a partir da sua monitorização em tempo real;
- Atribuição de prioridade de acesso a veículos de emergência ou de transportes coletivos a partir da sua identificação em tempo real;
- Estratégias de minimização dos impactos do congestionamento através do controlo de fluxos;
- Estratégias de recurso para resposta a situações de funcionamento deficiente dos sistemas de recolha de informação em tempo real.

As estratégias com planos de regulação com atuação recolhem a informação em tempo real através de sensores, capazes de detetar a passagem de veículos pertencentes a uma ou mais das correntes de tráfego de uma interseção.

Estas estratégias de regulação semafórica podem ser aplicadas de forma parcial, instalando sensores em apenas algumas vias, definindo-se como soluções semi-atuadas, ou de forma totalmente integrada, colocando sensores sobre todas as correntes de tráfego servidas pelo cruzamento, designando-se por soluções completamente atuadas.

2.3.1 Soluções Semi-Atuadas

As soluções semi-atuadas são as mais comuns, devido à sua simplicidade e fácil implementação, sendo nomeadamente adequadas em cruzamentos onde as vias definidas como secundárias apresentam uma importância reduzida face ao eixo principal.

No exemplo apresentado na figura 2.3 a via principal é privilegiada e não há necessidade de regulação para atravessamentos pedonais, resultando num plano de regulação a duas fases, em que a duração de cada uma delas depende da atuação ou não dos detetores colocados em ambas as entradas secundárias, sendo que, no limite (nomeadamente nos períodos mortos noturnos) a fase que serve os movimentos secundários pode não ser ativada durante longos períodos de tempo, mantendo-se o sistema a funcionar de acordo com as disposições da fase principal.

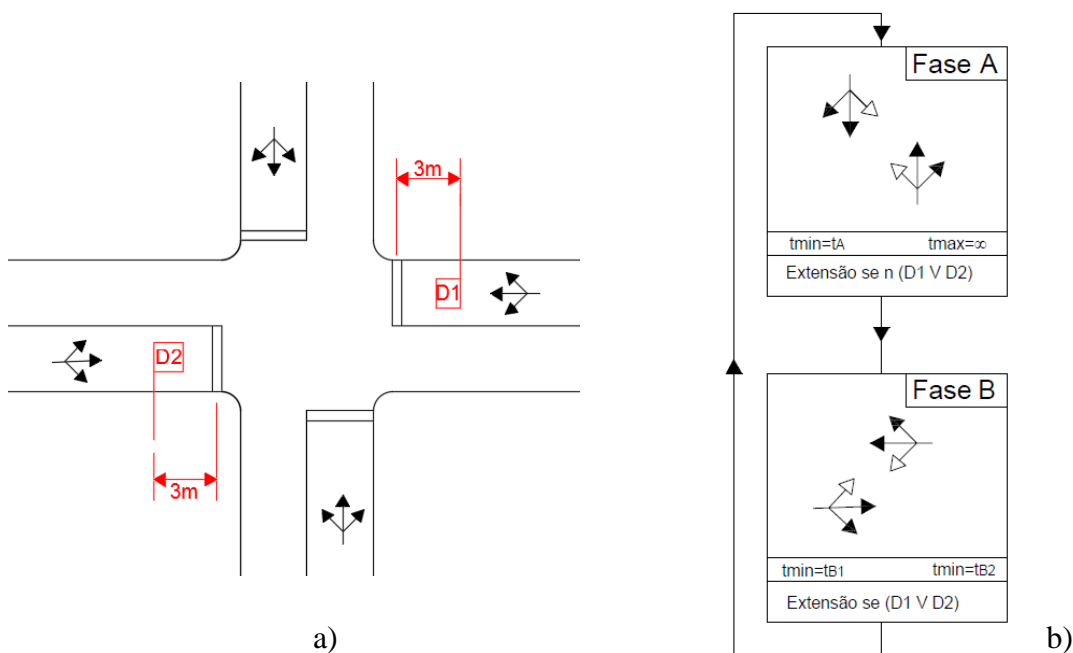


Figura 2.3 - Solução Semi-atuada com ativação e extensão dinâmica da fase secundária (adaptado Costa et al,2008)
a) cruzamento com solução semi-atuada b) Fluxograma com lógica de atuação

Em Portugal (Costa et al,2008) neste tipo de soluções semafóricas é utilizado apenas um sensor por entrada, colocado a cerca de 3 metros da linha de paragem, (ver figura 2.3), com capacidade de registar quer a presença quer a passagem de veículos. Ainda assim em outros países (HCM, 2000) são aplicadas tipologias que se baseiam na colocação de 2 sensores ao longo do trajeto de aproximação ao cruzamento, onde o sensor responsável pela duração final da fase é o sensor mais afastado do cruzamento, sendo a função do sensor mais próximo a de ativador da fase e, em alguns casos, de confirmador da informação recolhida no sensor mais afastado.

2.3.2 Solução Totalmente Atuada

Esta solução é utilizada geralmente em cruzamentos onde a importância dos eixos rodoviários que se cruzam é semelhante, (ver figura 2.4). É uma estratégia de gestão de tráfego mais exigente ao nível da infraestrutura devido ao maior número de sensores necessários, o que implica custos mais elevados.

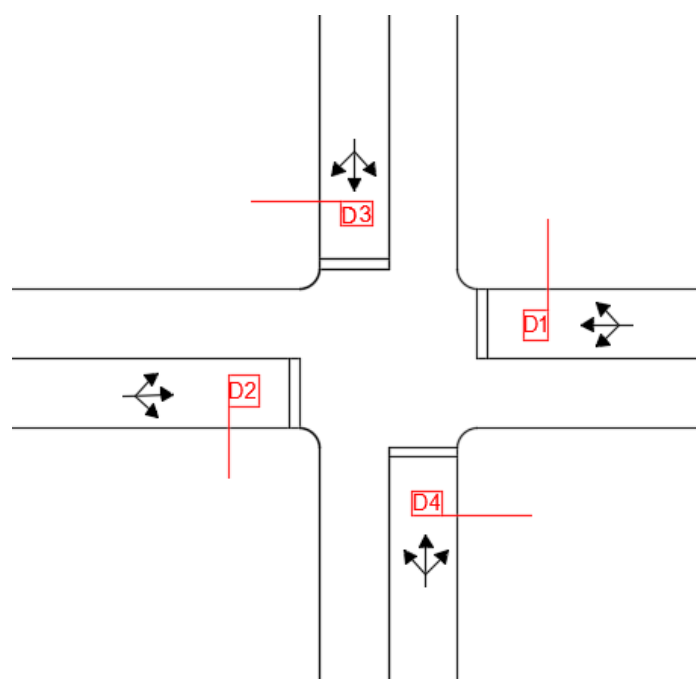


Figura 2. 4 - Solução totalmente atuada com ativação e extensão dinâmica das fases

A instalação de mais sensores permite que na maioria dos casos um único plano de regulação seja o suficiente (ver exemplo no diagrama da figura 2.5) para dar resposta às variações do perfil de procura registados habitualmente ao longo do tempo, quer numa perspectiva ciclica de curto prazo (diária, semanal, mensal), e mesmo de médio prazo, resultante de variações sistemáticas, usualmente de crescimento do tráfego global.

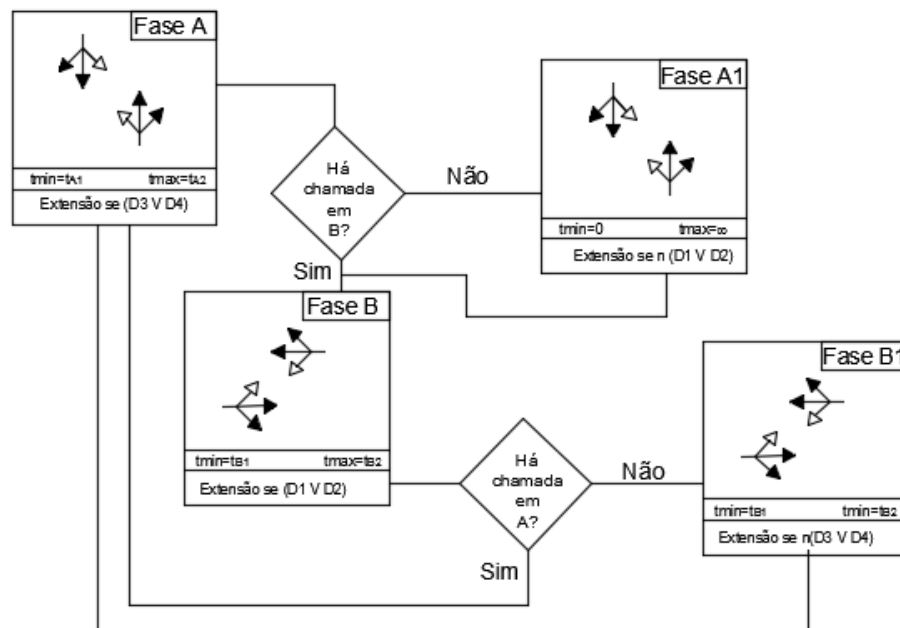


Figura 2. 5 - Lógica de ativação para a solução totalmente atuada do exemplo anterior (adaptado Costa et al, 2008)

Contudo podem surgir períodos em que a importância das correntes de tráfego críticas de cada fase se alteram, por exemplo de manhã pode ser um eixo enquanto que ao fim da tarde já é o outro, o que poderá obrigar ao desenvolvimento de vários sub-planos de modo a que o cruzamento continue a ter um funcionamento eficiente.

2.3.3 Sistemas de Detecção/Detetores

Como já foi referido, os sistemas de comando atuado têm acesso à informação das correntes de tráfego em tempo real através de sistemas de deteção, sendo que genericamente os detetores podem ser configurados em dois modos (Tian e Urbanik, 2006): deteção por impulso ou por presença.

A configuração pelo modo de impulso consiste na emissão de um sinal assim que o veículo passa sobre o detetor, desligando em seguida sendo indiferente a sua presença continuada sobre este, o que faz ativar o *gap-out*. Entende-se por *gap-out* como o intervalo de tempo máximo aceitável entre 2 chamadas consecutivas pelo detetor para que uma fase continue a ser prolongada.

O modo de presença consiste em que o detetor fique ativado sempre que e enquanto o veículo permanece sobre este, ou seja, neste caso o *gap-out* começa só depois de o veículo deixar o detetor.

2.3.4 Recomendações FHWA

A agência FHWA (FHWA,2008), *Federal Highway Administration*, encontra-se inserida no departamento de transportes dos Estados Unidos que apoia o estado e governos locais no dimensionamento, na construção e manutenção do sistema rodoviário, sendo esta responsável por garantir a segurança e o desenvolvimento tecnológico nas estradas americanas.

A temporização dos sinais luminosos afeta diretamente a qualidade e o desempenho das interseções, por isso FHWA define alguns procedimentos de ajuste entre a localização e comprimento do detetor, o tempo de extensão, o tempo de mínimo de verde e as características do cruzamento (geometria, volume de tráfego, velocidade de aproximação, etc.) aplicados nas soluções de comando atuado.

O procedimento definido para os cruzamentos isolados tem como base o intervalo de verde em cada fase necessário para atender a procura da interseção, o tempo mínimo e máximo de verde e o intervalo de extensão (ver figura 2.4).

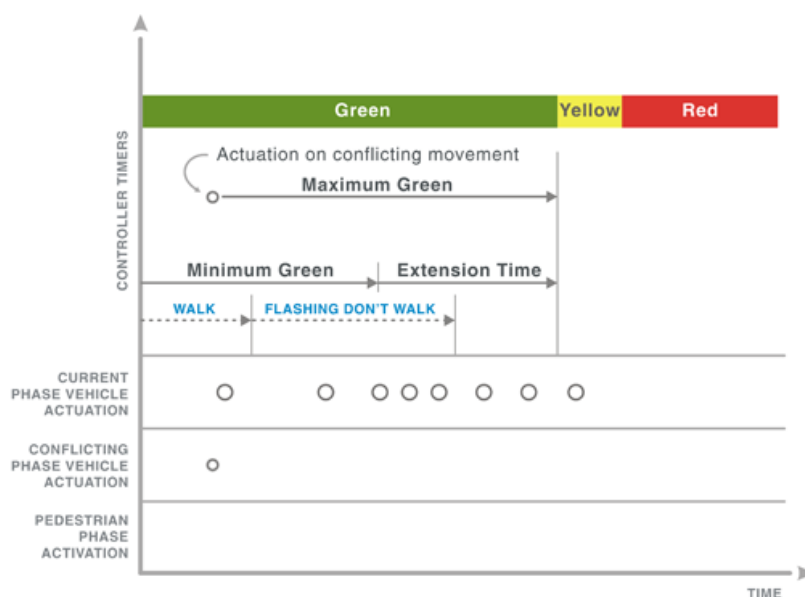


Figura 2. 6 - Parâmetros que definem a duração de cada fase (FHWA, 2008)

a. Tempo Máximo de Verde

Este parâmetro apresenta o tempo de verde máximo que responda de forma eficiente à procura, reduzindo os atrasos no tráfego conflitante e impedindo a existência de tempos de verde muito longos (intervalo padrão na tabela 2.1), que levam por vezes à frustração dos condutores.

Movimento	Tipo de Vias	Tempo máximo de verde, seg.
Em Frente	Via Principal ($v > 64\text{km/h}$)	50 - 70
	Via Principal ($v \leq 64\text{km/h}$)	40 - 60
	Via secundária	30 - 50
	Vias Locais	20 - 40
Viragem à Esq.	Qualquer	15 - 30

Tabela 2. 1 - Intervalo padrão para o tempo máximo de verde (adaptado FHWA, 2008)

b. Tempo Mínimo de Verde

O tempo mínimo de verde, como o próprio nome indica, representa a menor quantidade de tempo de verde a ser exibido para determinado movimento. Este parâmetro tem em consideração o comprimento das filas de espera e a presença de passagens pedonais, para que exista um equilíbrio entre a expectativa do condutor e a segurança dos peões.

b.1. Tempo Mínimo de Verde para satisfazer a expectativa do condutor

O tempo mínimo de verde necessário para satisfazer a expectativa do condutor pode variar consoante o tipo de vias e o tipo de movimento que o condutor vai realizar, como apresentado na tabela 2.2.

Movimento	Tipo de Vias	Tempo mínimo de verde (G_e), seg.
Em Frente	Via Principal ($v > 64\text{km/h}$)	10 - 15
	Via Principal ($v \leq 4\text{km/h}$)	7 - 15
	Via secundária	4 - 10
	Vias Locais	2 - 10
Viragem à Esq.	Qualquer	2 - 5

Tabela 2. 2 - Intervalo padrão para o tempo mínimo de verde que responda à expectativa do condutor (adaptado FHWA, 2008)

b.2. Tempo Mínimo de Verde para atravessamentos pedonais

Este parâmetro é o tempo mínimo de verde necessário para satisfazer as necessidades dos peões ao efetuarem o atravessamento, e encontra-se associado à procura de peões e não à chamada dos peões através das botoneiras.

b.3. Tempo Mínimo de Verde para limpeza das filas de espera

O tempo mínimo de verde também é influenciado pela localização dos detetores, ou seja, é necessário uma duração mínima de tempo verde para “limpar” os veículos em fila de espera entre a linha de paragem e o detetor, sendo este tempo mínimo apresentado na tabela 2.3.

Distância entre a Linha de Paragem e o Detetor (m)	Tempo mínimo de verde (G_q), seg
0 – 8	5
8 – 16	7
16 – 24	9
24 – 32	11
32 – 38	13
38 - 46	15

Tabela 2. 3 - Tempo mínimo de verde para limpar as filas de espera (adaptado FHWA, 2008)

c. Tempo de Passagem (Intervalo de Extensão)

O tempo de passagem geralmente designado por intervalo de extensão tem como objetivo prolongar o tempo de verde de uma fase, ou seja, numa solução de comando atuado quando o detetor é acionado por um veículo o tempo de verde é estendido até ao tempo de verde máximo de modo a não gerar longas filas de espera, como exemplificado na figura 2.4.

Se o intervalo de extensão for muito curto, terminando o tempo de verde relativamente cedo, o movimento não é servido adequadamente, por isso este intervalo pode ser ajustado em tempo real através dos sistemas de deteção para assim reduzir os tempos de atraso.

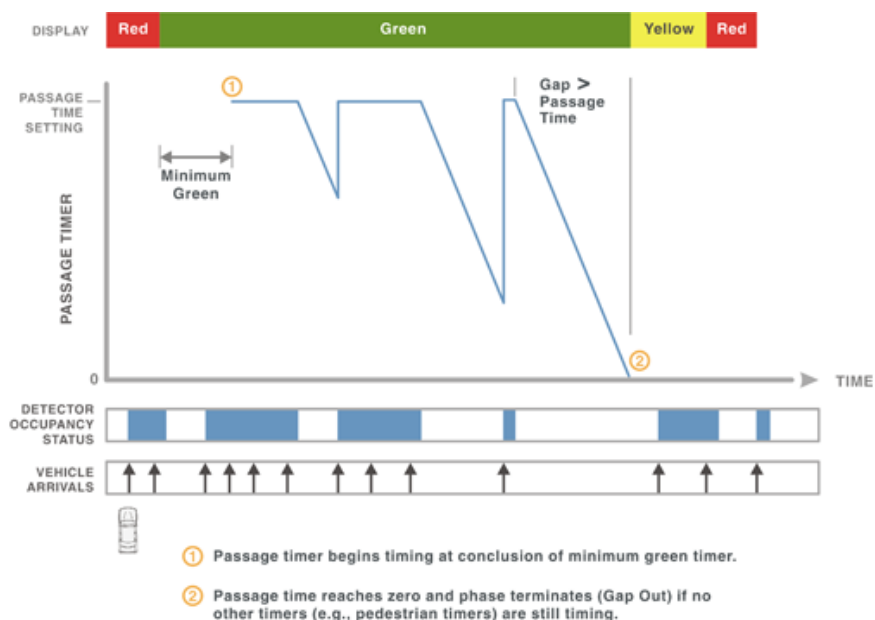


Figura 2. 7 - Exemplo aplicativo do intervalo de extensão (FHWA,2008)

O intervalo de extensão adequado para cada fase depende de alguns fatores como o tipo e número de zonas de deteção por faixa, o modo de deteção, a velocidade de aproximação,

localização e comprimento dos detetores. Para deteção em modo de presença a tabela 2.4 apresenta alguns dos valores padrão apresentados pela FHWA (FHWA,2008).

Máximo Headway (s)	Comprimento detetor (m)	Velocidade de aproximação, km/h				
		40	48	56	64	72
		Intervalo de Extensão, T_{ext} (s)				
3	2	2.2	2.3	2.4	2.5	2.6
	5	1.9	2.1	2.2	2.3	2.4
	8	1.6	1.8	2.0	2.1	2.2
	11	1.3	1.6	1.8	1.9	2.1
	14	1.0	1.3	1.6	1.7	1.9
	17	0.7	1.1	1.3	1.6	1.7
	20	0.4	0.8	1.1	1.4	1.5
4.0	23	0.1	0.6	0.9	1.2	1.4
	2	3.2	3.3	3.4	3.5	3.6
	5	2.9	3.1	3.2	3.3	3.4
	8	2.6	2.8	3.0	3.1	3.2
	11	2.3	2.6	2.8	2.9	3.1
	14	2.0	2.3	2.6	2.7	2.9
	17	1.7	2.1	2.3	2.6	2.7
20	1.4	1.8	2.1	2.4	2.5	
23	1.1	1.6	1.9	2.2	2.4	

Tabela 2. 4 - Duração do intervalo de extensão, para soluções de comando atuado com deteção em modo de presença (adaptado FHWA,2008)

2.3.5 O Sistema MOVA

A estratégia de regulação semafórica MOVA (*Microprocessor Optimised Vehicle Actuation*) foi desenvolvida pelo TRL (*Transport Research Laboratory*), por volta dos anos 80 (Department of Transport, 2003), para cruzamentos semafóricos isolados com o objetivo de reduzir os atrasos e assim maximizar a capacidade da interseção (Department of Transport, 1997).

Este sistema de regulação tem a capacidade de se ajustar em tempo real, isto é, na maior parte do tempo tem como função minimizar as demoras, mas para situações de congestionamento da rede este altera a sua lógica de regulação por forma a maximizar a capacidade do cruzamento (López, 2014). Geralmente, é aplicada em cruzamentos complexos, com elevados fluxos, locais de alta velocidade ou com probabilidade de períodos longos de congestionamento.

Em áreas urbanas é utilizada a disposição de detetores apresentada na figura 2.8, onde cada via tem um detetor de veículos a cerca de 100m da linha de paragem e outro a 40m (Department of Transport, 1997), enquanto em áreas interurbanas os detetores podem ser localizados mais junto às entradas, originando 8 a 10 segundos de aviso de chegada dos veículos.

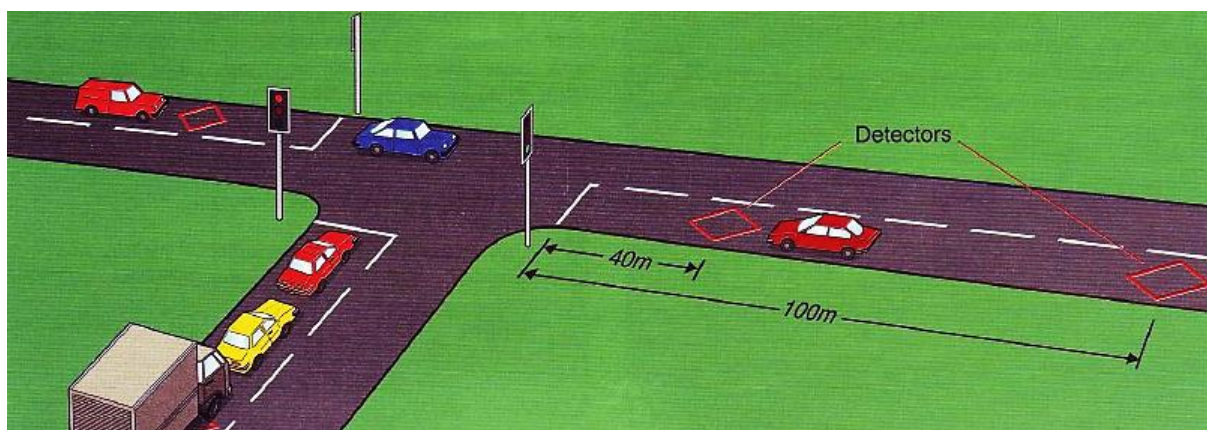


Figura 2. 8 – Localização dos detetores na estratégia de comando atuado MOVA (adaptado Department of Transport, 1997)

2.3.6 Outros sistemas de referência: Soluções coordenadas

Com a evolução do desenvolvimento do meio urbano, mais veículos e maior complexidade da rede viária, houve a necessidade de um aumento de cruzamentos regulados por sinais luminosos, o que levou à adoção de sistemas centralizados de controlo de tráfego por forma a que as interseções funcionassem de forma coordenada entre si.

Soluções de comando atuado SCOOT, SCATS, Utopia, ... são alguns desses sistemas centralizados de controlo de tráfego, tendo como funções principais (Costa et al, 2008): a coordenação dos sinais luminosos para assim melhorar as condições de circulação; a recolha e armazenamento de dados de tráfego através dos sensores em tempo real; a ligação com outros sistemas, tais como transportes públicos, estacionamento, etc; entre outras.

I) SCOOT

O sistema de controlo de tráfego urbano SCOOT, *Split Cycle and Offset Optimisation Technique*, foi desenvolvido pelo TRL (Department of Transport, 1995), em parceria com o sistema de trânsito do Reino Unido com principal objetivo de dar resposta às flutuações de tráfego de forma automática.

O SCOOT foi projetado para dar resposta a redes rodoviárias urbanas densas, como a de Londres e de outras grandes cidades, contudo também pode ser aplicado em redes menos densas. É extremamente eficiente em zonas em que não ocorre um padrão de tráfego regular, como por exemplo em zonas turísticas ou zonas com eventos que provocam mudanças aleatórias no tráfego, este sistema adapta-se a estas condições otimizando os planos de

regulação e controlando as demoras de forma significativamente (Department of Transport, 1995).

O nome deste sistema teve origem na forma como este otimiza o plano de regulação semafórico, isto é, uma solução com base em três processos:

- *The Split Optimiser*, durante cada mudança de fase analisa a fase anterior por forma a determinar se a duração da próxima fase deve permanecer igual, ser diminuída ou aumentada. O otimizador funciona com incrementos ou reduções que variam de 1 a 4 segundos.
- *The Offset Optimiser*, funciona uma vez por ciclo para uma determinada interseção, relacionando-a com as interseções a montante ou a jusante avaliando se o tempo do ciclo deverá ser alterado, através de incrementos de 4 segundos.
- *The Cycle Time Optimiser*, para uma dada zona o sistema, a cada 2,5 ou 5 minutos analisa os tempos de ciclo caso exista alguma interseção crítica, isto é, onde os tempos de ciclo estão a crescer demasiado, irá tentar ajustar o tempo de ciclo dessa para uma taxa de saturação de 90% para cada fase. É analisada a necessidade de alteração do ciclo, se necessário este pode ser incrementado ou reduzido em incrementos de 4, 8 ou 16 segundos.

II) SCATS (Austrália)

O sistema de controlo centralizado SCATS, *Sydney Co-ordinated Adaptive Traffic System*, foi introduzido em Sydney nos meados dos anos 60 para regular cruzamentos em série. A sua aplicação estende-se um pouco por toda a Austrália (Shepherd, 1992) e em países europeus e americanos.

Este sistema necessita de uma base de dados com planos de regulação para cada interseção os quais vai adaptando e otimizando através das condições de tráfego dadas pelos sensores.

III) UTOPIA

Aplicado numa vasta área de Turim desde 1984, UTOPIA (*Urban Traffic Optimization by integrated Automation*), é um sistema hierárquico de controlo de sinais luminosos com o objetivo de dar prioridade a veículos públicos e otimizar as condições de tráfego em geral.

O principal objetivo passa por minimizar o tempo perdido por todos os veículos que circulam na rede com a condição de que os veículos públicos tem sempre prioridade, tentado que nunca parem nos semáforos (Shepherd, 1992)

2.4 Considerações Finais

A decisão entre as soluções de gestão de tráfego reguladas por sinais luminosos depende de vários fatores o que por vezes torna difícil encontrar um grupo de critérios que leve à solução ótima a adotar. Genericamente, os estudos existentes tendem a concluir que as soluções a tempos fixos são as melhores perante volumes de tráfego muito baixos ou muito elevados, que não apresentem flutuações de tráfego significativas.

No entanto para zonas em que sejam registadas significativas flutuações de tráfego, nomeadamente em meio urbano, as soluções preferíveis são as de comando atuado, uma vez que tem a capacidade de se ajustarem em tempo real. A atuação tem como base 2 modos de deteção, por impulso ou modo de presença, contudo o de presença tem se mostrado mais eficiente e conseqüentemente o mais usado, uma vez que por impulso em situações onde a via a jusante se encontra bloqueada, tem um período curto de ativação o que leva a um mau desempenho da solução não atendendo as expectativas do condutor.

Para as soluções de gestão de tráfego reguladas por sinais luminosos de comando atuado o número de estudos é mais reduzido e atendendo à necessidade de a rede viária se tornar mais eficiente cada vez mais é importante estes estudos de tráfego, que possam reproduzir estas soluções o mais próximo da realidade recorrendo a plataformas de microssimulação.

3 Identificação do Problema e METODOLOGIA DE ANÁLISE

3.1 O Problema, os Objetivos e a Metodologia Base de Análise

Atualmente com o aglomerar da população, nomeadamente em meio urbano, as redes viárias têm apresentado uma maior complexidade e dificuldade em conseguir lidar com a maior procura que advém desse crescimento populacional. Por outro lado e tendo em conta a irregularidade dos padrões de tráfego e a dificuldade de os prever torna as soluções semaforizadas a tempos fixos relativamente pouco eficientes, surgindo a necessidade que as soluções de gestão de tráfego reguladas por sinais luminosos tenham a capacidade de se adaptar em tempo real às suas flutuações, por forma a garantir as condições de circulação seguras e fluídas.

Esta procura pelo ajuste à realidade leva à necessidade de monitorização em tempo real do tráfego rodoviário e/ou pedonal (Costa et al, 2008), para o que são instalados sensores nas vias com essa função que viabilizam o desenvolvimento de soluções de gestão de tráfego de comando atuado.

Tendo em conta que os cruzamentos são considerados como os principais pontos críticos do sistema viário, tanto a nível de segurança como sendo um centro de interações entre todos os seus utilizadores, sendo importante que sejam controlados e geridos da forma mais eficiente possível, justifica-se que sejam identificadas as soluções de controlo mais eficientes.

Ao nível dos cruzamentos controlados por sinais luminosos e com funcionamento atuado, a identificação do potencial de desempenho e condições de aplicabilidade de diferentes estratégias e soluções possíveis é de óbvia importância e motivou a realização deste trabalho.

Neste contexto o presente estudo desenvolveu-se em torno de uma análise de sensibilidade para avaliar a resposta de diversas soluções de regulação de sinais luminosos em cruzamentos isolados, tendo em conta a variabilidade das condições dos cenários, apresentados mais à frente.

Um dos principais objetivos foi a análise comparativa de várias estratégias tipo de controlo semaforizado atuado, correspondendo a diferentes lógicas e opções de monitorização do tráfego em tempo real, avaliando a eficiência do seu desempenho em cruzamentos de diferentes geometrias com recurso à microssimulação do seu funcionamento através do uso do *software* de referência internacional AIMSUN.

3.2 Identificação dos Indicadores de Desempenho

Para avaliar o desempenho de cada uma das estratégias de regulação semafórica a testar tem de se ter como base pelo menos um indicador que permita concluir qual a mais eficiente.

Para isso o *software* de microssimulação produz, através dos parâmetros e informação colocada no modelo, vários indicadores tais como, a densidade, o fluxo, a velocidade, o tempo médio de atraso, o comprimento das filas de espera, o número e tempo de paragens, distância total e tempo de viagem, poluição e consumo de combustível.

Nesta avaliação inicialmente aspirava-se ter como base os indicadores tempo médio de atraso e o número de paragens. No entanto, por falta de tempo, apenas foi feita uma análise tendo em conta o primeiro indicador. Esta escolha deveu-se ao facto de o principal objetivo ser a avaliação comparativa do desempenho de cada solução de regulação nos estudos de caso, pois uma solução com tempo de demora mais reduzido tende a ser mais eficiente.

No *software* AIMSUN o tempo médio de atraso é definido como o tempo médio de demora de veículo por quilómetro (TSS,2013a), correspondendo à diferença entre o tempo de viagem em regime livre,isto é o veículo percorre o seu percurso na rede em condições ideais, sem paragens na interseção, e o tempo de viagem real.

A avaliação da eficiência de cada estratégia de regulação tinha como base o tempo médio de atraso, fornecido diretamente pelo *software* de microssimulação. No entanto optou-se pela utilização de um indicador composto, constituído por 3 indicadores produzidos pelo *software* sendo eles o atraso médio, a distância percorrida e a quantidade de veículos simulados. Isto deve-se ao fato de o objetivo passar por avaliar o desempenho de apenas um ponto singular da rede, não fazendo sentido o indicador de desempenho estar associado a esta, tornando os resultados dependentes da extensão assumida para os eixos rodoviários. Desta forma o indicador adotado torna a avaliação do desempenho da interseção mais fácil e generalizável, tomando este a seguinte fórmula:

$$t_{\text{Atraso médio}} = \frac{t_{\text{Atraso médio Aimsun}} * d_{\text{percorrida}}}{v_{\text{simulados}}}$$

onde, $t_{\text{Atraso médio}}$ é o indicador para a avaliação final, em s/vei; $t_{\text{Atraso médio Aimsun}}$ é o valor fornecido pelo AIMSUN, em s/km; a $d_{\text{percorrida}}$ é a distância percorrida dada pelo AIMSUN, correspondente ao total de quilómetros percorridos pelos veiculos na rede, em km; $v_{\text{simulados}}$ corresponde ao número de veíulos simulados na rede.

3.3 A ferramenta da Microssimulação

No presente trabalho foi utilizado o *software* de microssimulação AIMSUN, *Advanced Interactive Microscopic Simulator for Urban and Non-Urban Networks* (AIMSUN – versão 7.0.4., Outubro 2012), o qual foi cedido pelo Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Coimbra. A sua escolha teve em conta o facto de ser uma das mais conceituadas plataformas de simulação disponíveis no mercado e conter as ferramentas necessárias para a realização deste exercício.

O *software* AIMSUN é um programa de simulação de tráfego, que teve origem na década de 90 na Universidade Politécnica da Catalunha, Barcelona, Espanha, sendo mais tarde desenvolvido e comercializado pela empresa TSS (*Transport Simulation Systems*). O modelo AIMSUN tem evoluído bastante no tempo e agora inclui três tipos de simulações: microscópica, mesoscópica e macroscópica.

Considerando os objetivos a cumprir utilizou-se a simulação microscópica, ou microssimulação de tráfego, pois estes modelos reproduzem o comportamento de cada veículo, acomodando tanto diferentes tipos de veículos como diferentes estilos de condução, bem como a sua interação com a rede, incluindo a modelação detalhada dos planos de regulação semafórica.

O modelo de simulação microscópica combina a simulação discreta com a contínua, isto é o simulador modela continuamente o comportamento dos elementos existentes, veículos ou detetores, o qual se altera com o tempo de simulação, enquanto a existência de outros elementos, como os sinais luminosos, se alteram de forma discreta em instantes específicos da simulação.

3.4 As Estratégias em Análise

Neste estudo foram consideradas algumas estratégias de regulação semafórica a testar como soluções a tempos fixos, soluções semi-atuadas e completamente atuadas com a aplicação de apenas 1 sensor por via.

Optou-se por definir dois conjuntos de análises: no primeiro são testadas diferentes estratégias de regulação semafórica, variando a velocidade de circulação dos veículos da corrente de tráfego e a localização do sensor nas soluções de comando atuado; no segundo apenas se testa a solução semi-atuada com o objetivo de encontrar a melhor localização do detetor tendo em conta diferentes intervalos de extensão.

3.4.1 Conjunto de Estratégias 1

No 1º conjunto de estratégias vão-se testar as seguintes soluções semafóricas:

- 1) Solução a tempos fixos
- 2) Solução semi-atuada com a colocação de apenas um sensor

- **Localização do detetor**

Esta estratégia de regulação passa pela instalação de um sensor tendo em conta duas situações (ver figura 3.1): junto à entrada do cruzamento ou a uma distância significativa desta, respetivamente a 3m e 42m da linha de paragem. Na primeira situação o sensor tem como função detetar a presença de um veículo na via secundária avisando o sistema para dar início à fase respetiva, realizando as extensões necessárias consoante a chegada de veículos, enquanto na segunda situação o objetivo foi testar soluções de comando atuado em que a localização do sensor relacionava o tempo de extensão de 3s, frequentemente utilizado, e a velocidade média da corrente, por forma a este detetar antecipadamente a passagem do veículo dando sinal para ativação da fase e respetiva extensão.

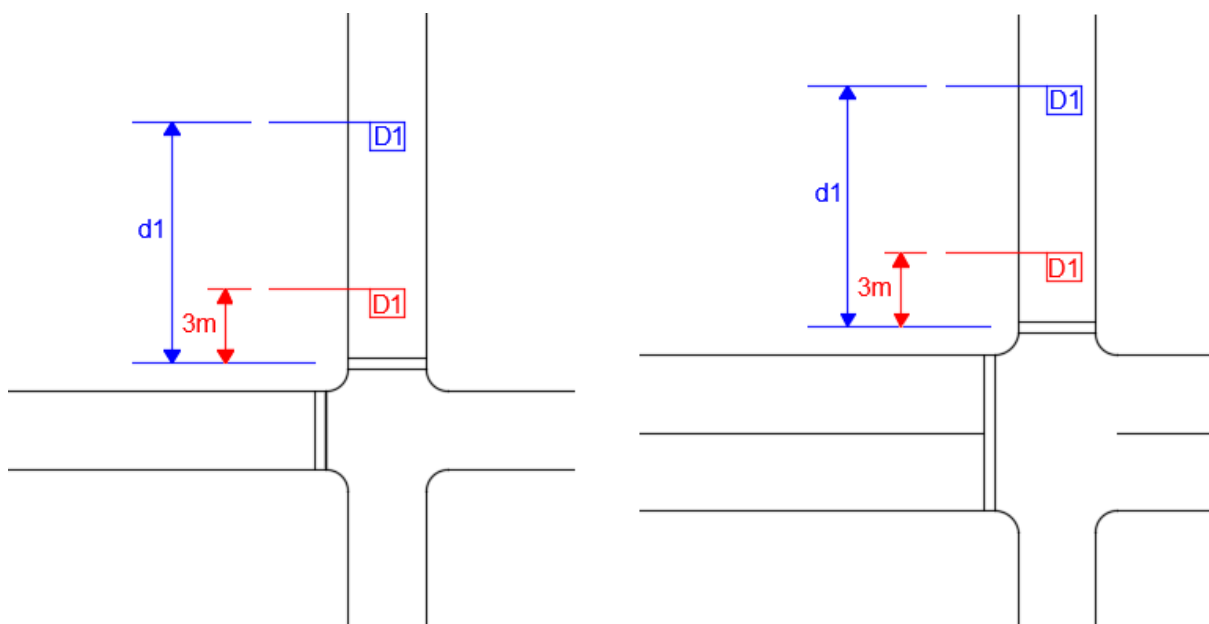


Figura 3. 1 – Localização do detetor nas soluções semi-atuadas nos layouts 1 e 2

- **Tempo mínimo de verde e intervalo de extensão**

Como em soluções de comando atuado é necessário definir a duração do tempo mínimo de verde da fase e a duração do intervalo de extensão que esta pode ser estendida quando ativado o sensor de deteção de veículos, para esta estratégia de regulação optou-se por fixar a duração do tempo mínimo de verde em 8 segundos e o tempo de extensão em 3 segundos.

▪ **Tempo máximo de verde**

O tempo máximo de verde da fase correspondente à via secundária, ou seja, o tempo máximo que esta fase pode ser estendida, tem a duração equivalente ao valor obtido pelo método de Webster.

3) Solução atuada com a instalação de dois sensores, um em cada via.

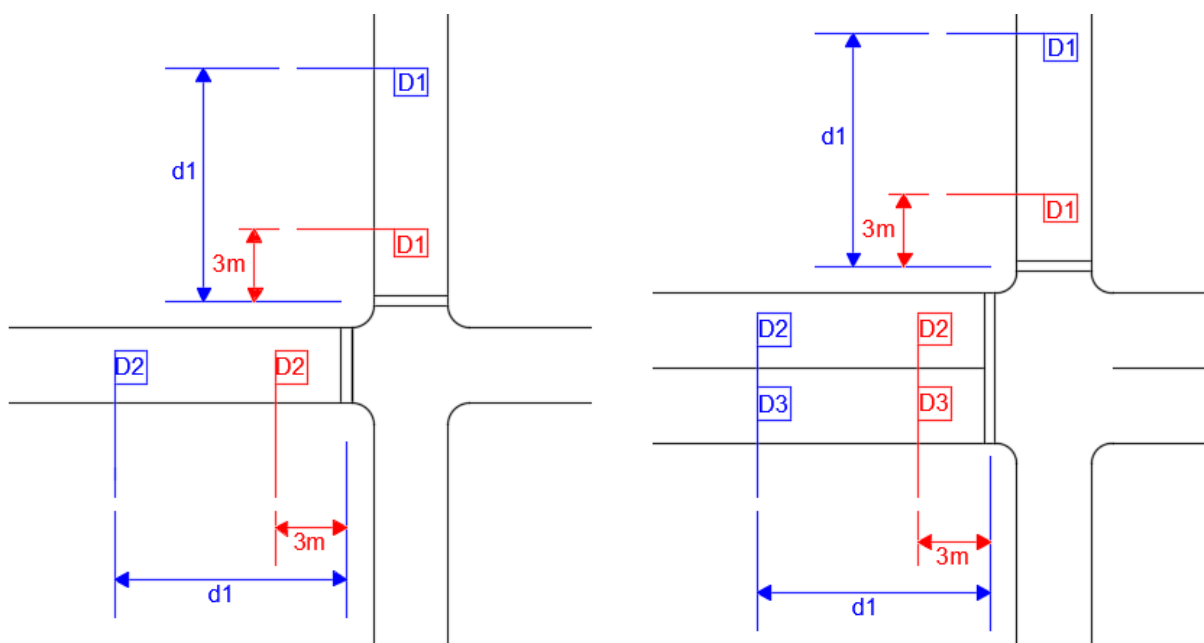


Figura 3. 2 – Localização dos detectores nas soluções totalmente atuadas nos Layouts 1 e 2

As condições estabelecidas para esta estratégia são semelhantes às descritas anteriormente para as soluções semi-atuadas, apenas com a diferença que nestas são aplicadas às duas vias.

No presente exercício optou-se por testar 2 lógicas de Atuação representadas nos fluxogramas das figuras 3.3 e 3.4, para as soluções de comando atuado.

Na lógica de atuação para o caso apresentado na figura 3.3.a), na via principal (Fase A) o tempo máximo de verde é estendido enquanto não for detetado nenhum veículo na via secundária (Fase B), isto é, o sinal apenas fica verde quando houver uma chamada no detetor por parte de um veículo, isto para soluções semi-atuadas.

Por outro lado, a lógica de atuação representada na figura 3.3.b) funciona de maneira diferente, independentemente de haver chamada por parte do detetor na via secundária o sinal é aberto, ou seja, na via principal, a fase A tem a duração do tempo máximo de verde passando para a fase B, esta tem a duração de pelo menos o tempo mínimo de verde que pode ser estendido caso seja detetado um veículo, caso contrário volta a fase A.

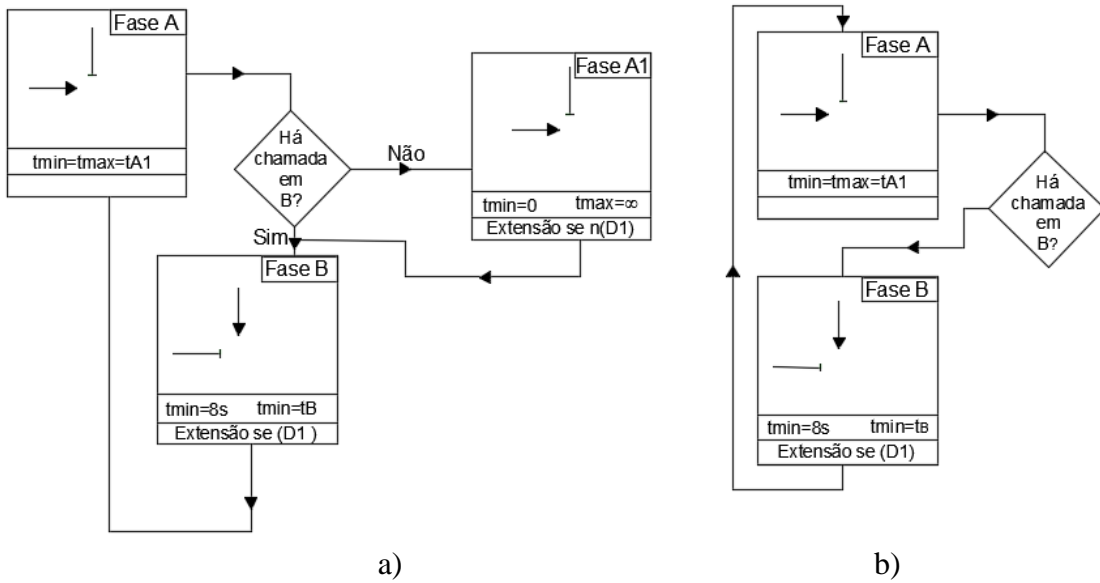


Figura 3.3 – Lógica de atuação para as soluções semi-atuadas

Nas soluções atuadas as lógicas de atuação funcionam de forma análoga às descritas anteriormente, com a diferença em que nestas estão instalados 2 sensores, um em cada via, dando a possibilidade de detecção de veículos em ambas as vias. Por exemplo, no caso apresentado na figura 3.4.b), a fase A tem pelo menos a duração do tempo mínimo de verde, se não for detetado nenhum veículo passa para a fase B, caso contrário o tempo de verde é estendido e assim sucessivamente.

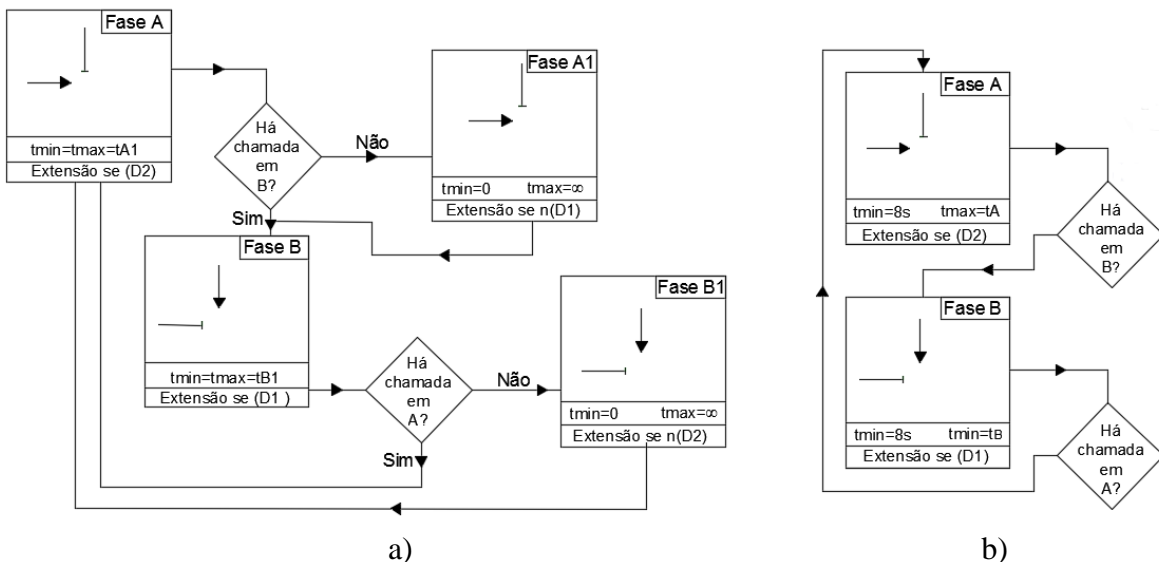


Figura 3.4 – Lógicas de atuação para as soluções totalmente atuadas

3.4.2 Conjunto de Estratégias 2

No 2º conjunto de estratégias o principal objetivo passa por encontrar a localização ótima, d_y ilustrado na figura 3.5, à qual está associado um tempo de extensão. Para tal vai-se testar apenas soluções semi-atuadas, com a instalação de um sensor. A localização deste varia em função da velocidade de aproximação e do tempo de extensão adotado, tomando como referência o valor de extensão médio de 3 segundos (Costa et al, 2008), analisou-se uma gama de valores com intervalo de 0,2 segundos entre eles, os quais representam o seguinte intervalo [2,6; 2,8; 3,0; 3,2; 3,4].

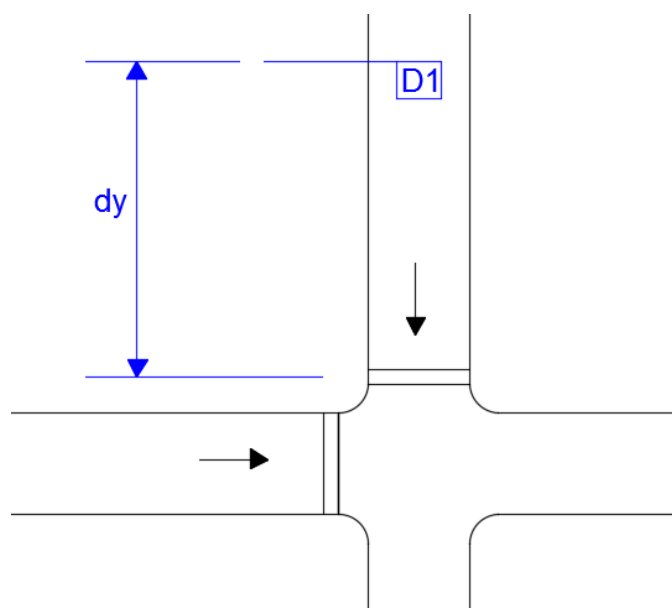


Figura 3. 5 – Esquema representativo da análise da localização ótima do sensor

A expressão que traduz o conceito apresentado anteriormente, isto é a relação velocidade de aproximação e tempo de extensão da fase é a seguinte:

$$d_y = \frac{v_t}{3,6} * T_{ext}$$

onde d_y é a distância a que se encontra o sensor y em metros, v_t é a velocidade do tráfego de aproximação em km/h e, T_{ext} é o tempo de extensão da fase do movimento em segundos.

3.5 Definição dos Cenários

Para se testar a eficiência das estratégias referidas anteriormente é necessário definir um conjunto de cenários a estudar, de forma a que estes representem um conjunto o mais alargado de situações possíveis. Entende-se por cenário como o conjunto de dados que permite a modelação das diferentes estratégias a analisar tais como, a descrição da rede em geral, a intensidade e composição do tráfego e características comportamentais dos utilizadores.

No presente exercício o processo de construção da gama de cenários de teste centrou-se na variação de um conjunto de características dos estudos de caso ligadas à geometria do cruzamento, às características da procura e ao comportamento dos condutores.

3.5.1 Layout/Geometria

Neste estudo são consideradas duas soluções, apresentadas na figura 3.6, na definição da geometria para as interseções em análise.

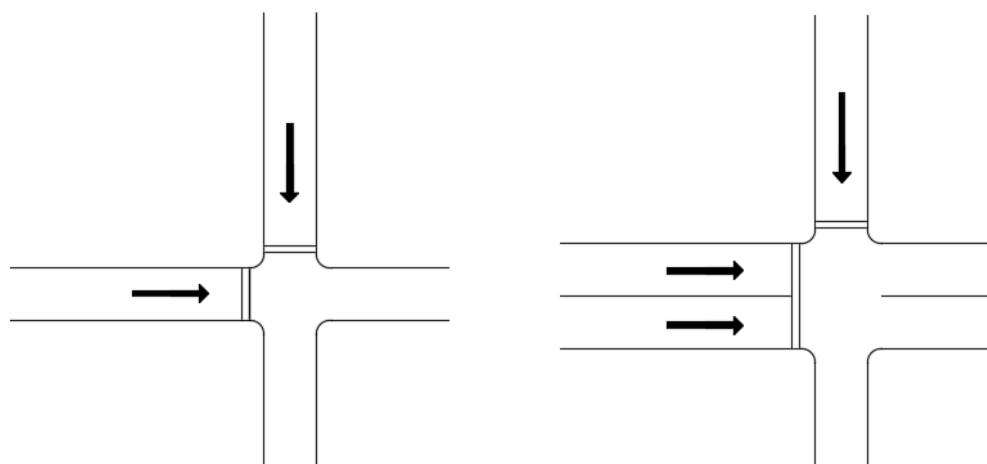


Figura 3. 6 - Geometria do Layout 1 e Layout 2, respetivamente

O *layout 1* é a representação de um cruzamento na sua forma mais simplificada, um cruzamento com faixas de rodagem com apenas uma via e de sentido único. Admitindo que uma via é a predominante, tendo um elevado fluxo de tráfego, definindo-se como via principal e a outra como secundária de menor fluxo.

O *layout 2* é semelhante com o *1*, diferindo na duplicação de vias na definida como principal e a via secundária mantém-se apenas com uma via, todas com apenas um sentido. Neste caso os veículos têm tendência a circular na via da direita, no entanto também podem circular na via da esquerda, caso seja possível efetuar ultrapassagem através de mudança de via, o que significa que as distribuições de intervalos entre veículos sucessivos resultantes neste tipo de *layout*, tenderão a ser significativamente diferentes dos observáveis no primeiro tipo de *layout*.

3.5.2 Características da Procura

No dimensionamento do plano de regulação de sinais luminosos é fundamental uma boa caracterização do tráfego, pois a eficiência da solução adotada depende disso. Inicialmente é

necessário efetuar uma previsão dos volumes de tráfego referentes a cada movimento que chega ao cruzamento num dado período de tempo, para isso define-se um perfil de base da procura.

3.5.2.1 Perfil base da Procura

Para o presente trabalho seguiu-se o perfil base da procura utilizado em dissertação anterior (López, 2014), que consiste num período de 3 horas, entre as 7:00h e as 10:00h da manhã, dividido em intervalos de 15 minutos, a partir de diferentes padrões de intensidade recolhidos em pontos distintos na cidade de Coimbra, apresentado na figura 3.7.

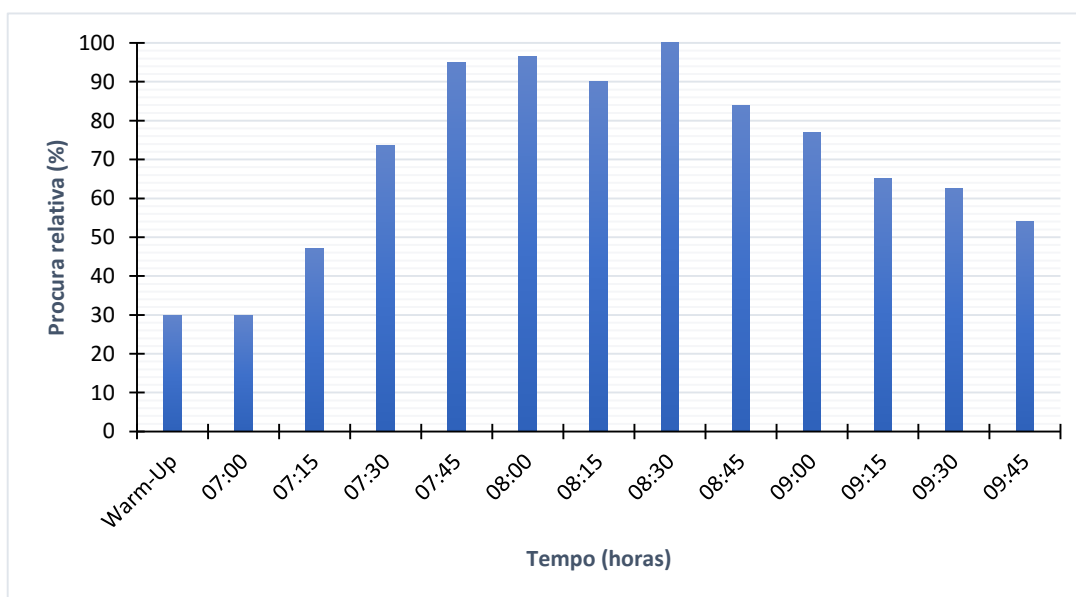


Figura 3. 7 – Gráfico representativo do perfil base da procura (López, 2014)

Como se pode observar na figura 3.7 o primeiro intervalo do perfil foi designado por *warm-up*, o qual é um parâmetro do AIMSUN que é necessário para a inicialização do modelo, ou seja, é um período de aquecimento que tem como função evitar que a simulação se inicie com a rede em vazio.

Uma das vertentes de construção da gama de cenários é a variação da taxa de saturação no intervalo de pico, através do gráfico verifica-se que o pico é atingido no intervalo entre as 8:30h e as 8:45h.

3.5.2.2 Repartição Direcional do Tráfego

Entende-se por repartição direccional como a proporção de tráfego entre os eixos de uma interseção, frequentemente um cruzamento pode experimentar diversas situações de procura durante o dia, devido a diversos fatores como a altura em que ocorre a hora de ponta ou possíveis estrangimentos na rede, levando a diferentes situações de repartição direccional para um mesmo cruzamento.

Por forma a este estudo se tornar mais representativo desta realidade definiram-se três situações diferentes de análise, sendo estas as seguintes:

- 1) Repartição direccional de 50-50%, representando situações em que os eixos apresentam igual importância;
- 2) Repartição direccional de 70-30%, nesta situação um eixo começa a ganhar preponderância em relação ao outro, concentrando em si 70% da procura;
- 3) Repartição direccional de 90-10%, onde a procura se concentra claramente num dos eixos, sendo quase residual o tráfego no outro eixo.

3.5.2.3 Composição do Tráfego

Além de ser importante definir a matriz O/D com o total de veículos que utiliza a rede, é importante saber o tipo de veículos de forma a ter uma simulação do tráfego mais representativa da realidade.

No presente estudo os veículos da rede viária em análise classificaram-se apenas em veículos pesados e ligeiros, pois estes representam geralmente a maior percentagem dos utilizadores num sistema, desprezando-se assim os veículos motorizados, os ciclistas, ...uma vez que estes representam uma minoria do tráfego presentes na rodovia.

Definiu-se para a composição do tráfego utilizada como 90% ligeiros e 10% pesados, uma vez que já se concluiu em alguns artigos e dissertações (López, 2014; Chandan et al, 2015) que a percentagem de pesados influencia diretamente o desempenho de qualquer tipo de cruzamento. De forma a simplificar a análise dos presentes estudos de caso e permitir focalizá-la nas questões acima definidas, assumiu-se uma percentagem de veículos pesados constante para todos os cenários, com o valor de 10%.

3.5.3 Comportamento dos condutores

O comportamento do condutor é influenciado pelo tempo de reação que este regista em momentos que exigem uma resposta a uma qualquer alteração das condições de regulação ou

operação da rede. Particularmente relevante é também a velocidade de referência (desejada) em regime livre adotada por cada condutor em diferentes ambientes rodoviários.

Os tempos de reação podem variar consoante a região ou o país em estudo (TSS, 2013a), no entanto na configuração vai-se usar os valores *default* do *software* AIMSUN, adotando a opção variável (diferente para cada tipo de veículo) que o programa apresenta.

A velocidade desejada adotada vai variar consoante o tipo de veículo, ligeiro ou pesado, de forma a observar a sua influência na eficiência do desempenho das interseções isoladas em estudo.

3.5.4 Os cenários de análise

Para o teste do 1º conjunto de estratégias acima identificadas foram considerados os cenários que resultam da seguinte combinação de situações ligadas a estes 3 tipos de características:

- Variação da velocidade desejada:

	Ligeiros	Pesados
Velocidade desejada (km/h)	50	46
	48-52	44-48
	46-54	42-50

Tabela 3. 1 – Velocidade desejada para veículos ligeiros e pesados para diferentes cenários

- Níveis de Saturação (S): 50%, 70% e 90%;
- Proporção via principal/via secundária: 50/50 (%), 70/30 (%) e 90/10 (%).

Para o teste do 2º conjunto de estratégias acima identificadas, foram considerados os cenários que resultam da seguinte combinação de situações ligadas a estes 3 tipos de características:

- Variação da velocidade desejada já apresentada anteriormente na tabela 3.1;
- Nível de Saturação (S): 70%;
- Proporção via principal/via secundária: 70/30 (%)

3.6. Construção do Modelo

O modelo de simulação construído no AIMSUN tenta que os resultados fiquem o mais próximos possíveis da realidade, o que faz com que a sua calibração seja essencial para a obtenção de bons resultados, pelo que a sensibilidade com que é definido o conjunto de parâmetros caracterizadores do comportamento tanto dos condutores como dos veículos é um fator muito importante.

Por outro lado face ao efeito estocástico do tráfego, de modo a garantir resultados coerentes e um tempo de simulação que se ajusta-se ao tempo disponível para a realização do presente trabalho, optou-se pela realização de simulações com pelo menos 10 replicações, sendo os resultados médios destas os representativos. O conceito replicação é definido no AIMSUN como um acontecimento aleatório que simula uma realidade calibrada pelos diversos parâmetros e geometrias fornecidos pelo utilizador.

A construção do modelo inicia-se pela codificação da rede, mais especificamente pela descrição do sistema rodoviário a modelar, onde são necessárias as especificações geométricas e funcionais da rede, bem como o plano de controlo de tráfego.

3.6.1 Estimativa do Fluxo de Saturação e dos Tempos Perdidos

O Fluxo de saturação, um parâmetro fundamental no dimensionamento do plano de regulação, é o fluxo máximo de partidas de uma corrente de tráfego (ver figura 3.8), ou seja considerando que existem sempre veículos a avançar durante o tempo de verde.

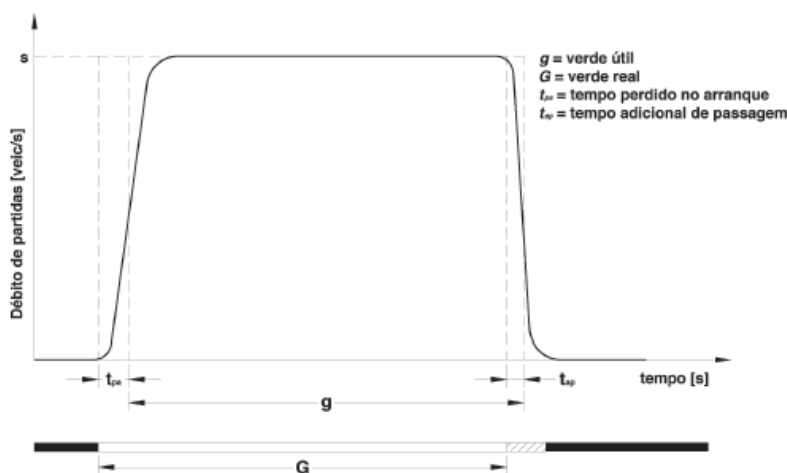


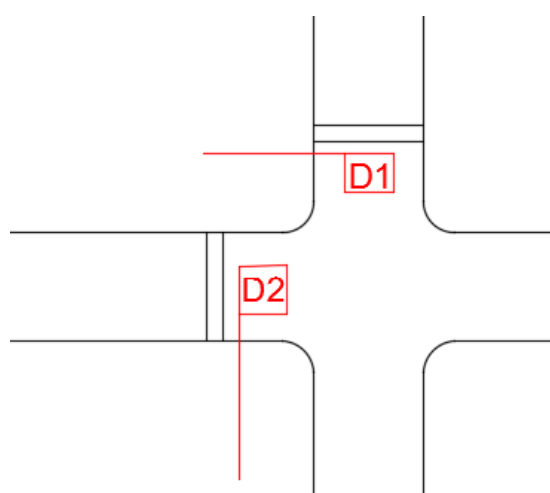
Figura 3. 8 – Padrões reais e conceptuais de partidas de veículos (Costa et al, 2008, pág.20)

Como a ferramenta de microsimulação utilizada não fornece diretamente os valores dos fluxos de saturação teve de se proceder à sua estimativa, uma vez que este parâmetro é necessário para a aplicação do Método de Webster aquando a definição dos diversos planos de regulação semafórica.

Posto isto e com o auxílio do *software* de microsimulação, sobressaturou-se as vias do cruzamento, 3000 veículos por hora e, instalou-se um detetor a jusante de cada entrada obtendo

o número de veículos e o instante da sua passagem, por forma a saber qual o valor do fluxo de saturação resultante da aplicação dos parâmetros de calibração de *default* usados no AIMSUN.

Tendo em conta o enunciado anteriormente adotou-se o esquema do layout 1 com a disposição dos sensores, representado na figura 3.9, e uma duração de ciclo de 120 segundos com um tempo de verde de 55 segundos para cada fase (ver tabela 3.2).



Plano de Regulação		
Ciclo (s)	Tempo Verde Fase A	Tempo Verde Fase B
120	55	55

Tabela 3. 2 – Plano de regulação

Figura 3. 9 – Esquema representativo da disposição dos sensores para o layout1

Tendo em conta os valores retirados das análises realizadas com o AIMSUN e aplicando a expressão seguinte a qual, tenta traduzir o fluxo verificado durante o tempo de verde útil, isto é, período no qual o fluxo se mantém constante atingindo o seu valor máximo, obteve-se os valores para o fluxo de saturação.

$$s = \frac{(n_4 - n_{n-4})}{(t_4 - t_{n-4})} * 3600$$

onde s é o fluxo de saturação em vei/h ; n é o número total de veículos em vei ; t_4 é o instante de passagem do 4º veículo detetado em s ; t_{n-4} , é o instante de passagem do $n-4$ veículo detetado em s .

Também através do Aimsun foi obtida a capacidade em análise, Cap , com base nos resultados obtidos através das simulações e na expressão:

$$Cap = n * 3600 / t_{total}$$

Por fim, sabendo o fluxo de saturação e a capacidade da via pode-se determinar o tempo de verde útil o que possibilita a determinação do tempo perdido, tp , o qual representa o tempo

perdido por fase e é dado pela diferença entre o tempo perdido no arranque, tpa , e o tempo adicional de paragem, tap (ver figura 2.1).

$$g_u = \frac{Cap}{s} * C \quad \Rightarrow \quad tp = G - g_u$$

Para o layout 2 foi feita uma análise de forma análoga, sendo que os resultados obtidos são os apresentados na tabela 3.3 a seguir.

	Ciclo (s)	Pesados (%)	Fluxo Saturação, s (vei/h)	Tempo Perdido, tp (s)
Layout 1	120	0	2372	0.65
	120	10	2038	1.13
Layout 2	120	0	2406	0.58
	120	10	2084	1.02

Tabela 3. 3 – Valores obtidos para o fluxo de saturação e tempo perdido

3.6.2 Capacidade e Taxa de Saturação

Segundo o HCM (2010) a capacidade, Q , é definida como o número máximo de veículos que podem partir por unidade de tempo, geralmente associada às correntes de tráfego e traduzida pela expressão seguinte:

$$Q = s \frac{g}{C}$$

$$Q = \frac{s_A}{C} * g_A + \frac{s_B}{C} * g_B$$

onde Q é a capacidade global do cruzamento em vei/h; s_A e s_B são os fluxos de saturação de cada entrada em vei/h; g_A e g_B são os tempos de verde útil da fase A e da fase B, respetivamente.

Existe a necessidade de estimar a capacidade uma vez que para além do fluxo de saturação este parâmetro também é essencial na aplicação do método de Webster para a definição dos diferentes planos de regulação.

Por outro lado, de forma a que a análise da eficiência das diferentes estratégias apresente uma maior diversidade representativa da realidade, no presente exercício, como ilustrado na figura 3.10, considerou-se um nível de procura variável associada a três taxas de saturação diferentes, 50%, 70% e 90% .

Pelo que, tendo em conta os valores obtidos através da análise das várias simulações realizadas com o AIMSUN, apresentados na tabela 3.3 e afetando a capacidade com as taxas de saturação referidas anteriormente obteve-se o perfil de procura representado na figura 3.10, para o *layout* 1. Para o *layout* 2 efetuou-se o mesmo procedimento para determinação da capacidade.

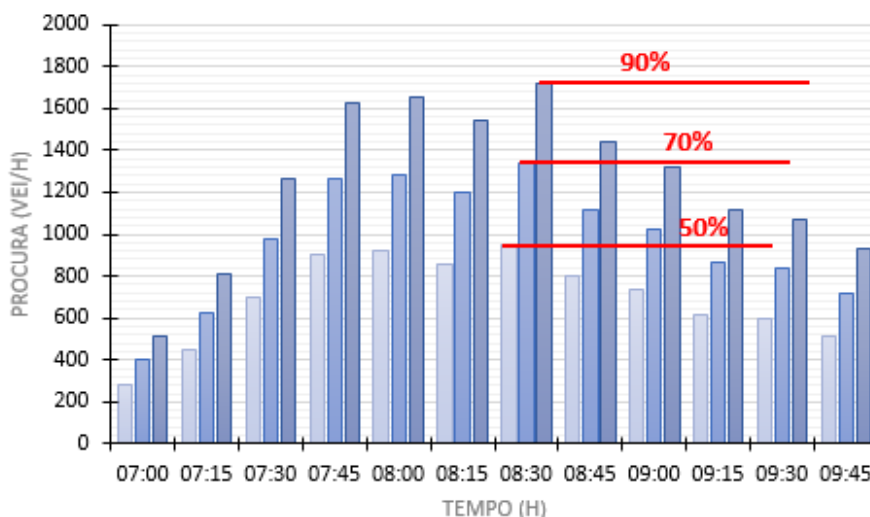


Figura 3. 10 – Gráfico da procura para os diferentes níveis de saturação

3.6.3 Coeficiente de Equivalência

Tendo na análise a composição do tráfego em veículos ligeiros e veículos pesados e, sabendo que o fluxo de saturação é expresso em veículos por hora, pode surgir a necessidade de homogeneizar a composição do tráfego, o que não se verifica durante o processo de microsimulação, pois o AIMSUN permite a introdução de diferentes tipos de veículos (ligeiros, pesados,...) no sistema. Para isso definiu-se o coeficiente de equivalência para converter o tráfego em apenas uma classe de veículos. Na tabela 2, estão apresentados os valores habitualmente usados como referência para o coeficiente de equivalência.

Classe de Veículo	Coeficiente de Equivalência
Veículo Comercial médio	1.5
Veículo Comercial Pesado	2.3
Autocarro	2.0
Veículo de duas rodas com motor	0.4
Bicicleta	0.2

Tabela 3. 4 - Coeficientes de equivalência geralmente adotados (Costa et al, 2008)

No presente estudo, foi feita uma análise com a finalidade de perceber qual o valor do coeficiente de equivalência implícito no AIMSUN, quando aplicados os parâmetros de calibração de *default* do *software* de microsimulação.

Tendo em conta a capacidade máxima de cada via na rede, já analisada anteriormente, e analisando-se as duas situações seguintes:

- i) 100% de ligeiros;
- ii) 90% de ligeiros e 10% de pesados.

Foi aplicada a seguinte expressão:

$$\text{Coef. Eq} = \frac{Q_{100/0} - (1 - x') \cdot Q_i}{x' \cdot Q_i}$$

onde $Q_{100/0}$ representa a capacidade da via para 100% de ligeiros, x' é a percentagem de pesados e Q_i representa a capacidade da via para uma determinada proporção de pesados i .

Isto porque a capacidade total da via, para 100% de veículos ligeiros, é igual à soma da proporção de veículos ligeiros com a proporção de veículos pesados afetados de um coeficiente de equivalência.

Face aos valores obtidos anteriormente chegou-se a um coeficiente de equivalência de aproximadamente 2.5, ou seja, nesta rede a presença de um veículo pesado poderia ser substituída por 2.5 veículos ligeiros.

3.6.4 Geração de Tráfego

A geração de tráfego permite definir a forma como os veículos entram na rede do sistema a partir dos centróides, isto é define o intervalo entre dois veículos consecutivos, designado por *headway* no AIMSUN, lançados para a rede a partir do mesmo centróide. A ferramenta de microsimulação adotada permite escolher um dos seguintes modos de geração entre os quais exponencial, normal, uniforme, estes três seguem as distribuições homónimas, sendo ainda possível escolher entre uma geração constante, ASAP ou externa, como ilustrado na figura 3.11.

No presente exercício e por forma a se refletir numa maior variabilidade da corrente de tráfego adotou-se uma distribuição exponencial para o modo como o *software* de microsimulação gera o tráfego a partir dos centróides.

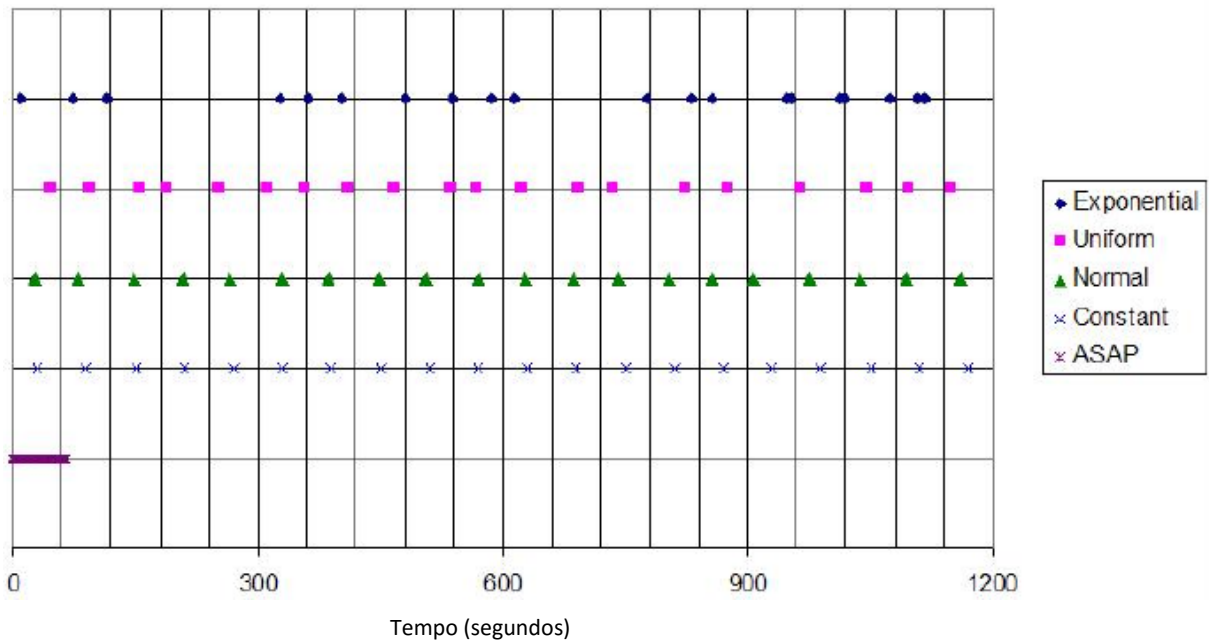


Figura 3. 11 – Diferentes tipos de geração de veículos no AIMSUN (adaptado, TSS, 2013a)

3.6.5 Os Planos de Regulação de referência

Como os cruzamentos em análise eram regulados por sinais luminosos definiram-se os planos de regulação necessários para a modelação dos cenários, tendo-se procurado usar temporizações de referência correspondentes a soluções de tempos fixos que pudessem ser consideradas eficientes.

Recorrendo ao Webster (1958) determinaram se a duração de verde de cada fase e a duração do ciclo para as análises, como descrito a seguir.

Para começar determinaram-se os índices de carga de cada fase e do respetivo cruzamento:

$$\left. \begin{aligned}
 y_A &= \frac{q_A}{s_A} = \frac{x \cdot q}{s_R} \\
 y_B &= \frac{q_B}{s_B} = \frac{(1-x) \cdot q}{k \cdot s_R}
 \end{aligned} \right\} Y = \sum y_i = \frac{x \cdot q}{s_R} + \frac{(1-x) \cdot q}{k \cdot s_R} = \frac{[k \cdot x + (1-x)]}{k \cdot s_R} * q$$

Tendo a carga do cruzamento calculou-se a duração do ciclo ótimo:

$$C_0 = \frac{1.5 * L + 5}{1 - Y}$$

Em seguida determinaram-se os tempos de verde útil para cada fase, com as seguintes expressões:

$$g_i = y_i \frac{C - L}{Y} \left\{ \begin{array}{l} g_A = \frac{x/s_R}{x/s_R * (1-x)/k * s_R} * (C - L) \\ g_B = \frac{(1-x)/k * s_R}{x/s_R * (1-x)/k * s_R} * (C - L) \end{array} \right.$$

As expressões anteriores foram obtidas tendo em conta para além do procedimento de Webster (1958) o seguinte esquema representativo de um layout geral:

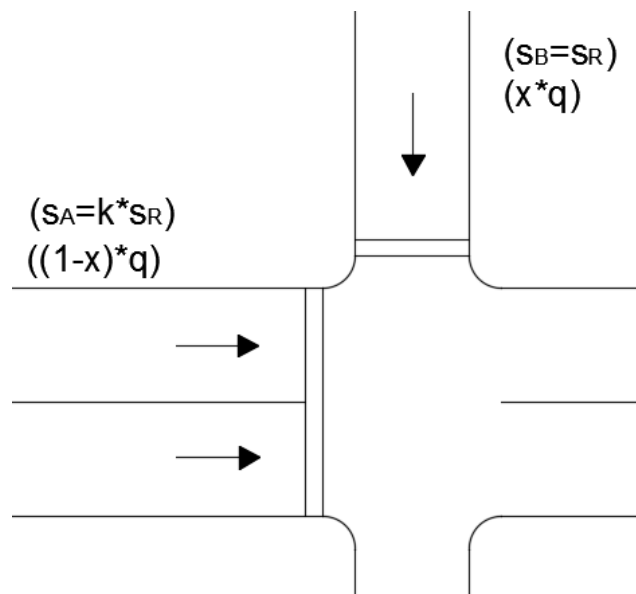


Figura 3. 12 – Esquema representativo do Layout 2

onde s_R é o fluxo de saturação da entrada do cruzamento, em ve/h; q corresponde ao fluxo de cada da entrada, em ve/h; x é a percentagem que corresponde à repartição direccional entre as vias; por fim, k representa o rácio dos fluxos de saturação das vias num mesmo eixo (por simplificação adotou-se o valor de 1 para o layout 1 e de 2 para o layout 2).

Como foi demonstrado na figura 3.10 o intervalo de pico situou-se entre as 8.30h e 8.45h, obtendo-se os seguintes valores apresentados na tabela 3.5, os quais foram utilizados para o dimensionamento dos planos de controlo.

	s (ve/h)	Tax. Sat. (%)	q (ve/h)
Layout 1	2038	50	953
		70	1334
		90	1715
Layout 2	2084	50	974
		70	1363
		90	1752

Tabela 3. 5 – Valores do fluxo de saturação e da capacidade estimados para o intervalo de pico

Posto isto, obtiveram-se os seguintes tempos de verde máximos para cada fase nos diferentes cenários, relacionados com o layout 1:

Taxa de Saturação	Repartição Direcional	Fases	q (ve/h)	yi	Y	C (s)	gi (s)
50	50-50	Fase A	477	0.23	0.5	38	14
		Fase B	477	0.23			14
	70-30	Fase A	667	0.33	0.5	38	19
		Fase B	286	0.14			8
	90-10	Fase A	858	0.42	0.5	41	25
		Fase B	95	0.05			6
70	50-50	Fase A	667	0.33	0.65	58	24
		Fase B	667	0.33			24
	70-30	Fase A	934	0.46	0.65	58	34
		Fase B	400	0.20			14
	90-10	Fase A	1201	0.59	0.65	59	43
		Fase B	133	0.07			6
90	50-50	Fase A	858	0.42	0.84	120	55
		Fase B	858	0.42			55
	70-30	Fase A	1201	0.59	0.84	120	77
		Fase B	515	0.25			33
	90-10	Fase A	1544	0.76	0.84	120	99
		Fase B	172	0.08			11

Tabela 3. 6 – Tempos verdes máximos para cada fase dos diferentes planos de regulação relativos ao layout 1

Alguns dos planos de regulação tiveram de ter pequenos ajustes, de forma a ter em conta alguns dos critérios de dimensionamento adotados, como considerar a duração máxima do ciclo ótimo

de 120 segundos, como foi o caso nos planos de controlo respetivos às taxas de saturação de 90%. Para os cenários com repartição direcional de 90-10 admitiu-se uma duração de 6 segundos, uma vez que geralmente a duração mínima é de 8 segundos e através do procedimento de Webster obteve-se aproximadamente 3 segundos, manifestamente insuficiente para ser realístico em condições reais de operação. Para o *layout 2* as durações de cada fase dos planos de regulação estão apresentadas na tabela 3.7.

Taxa Saturação	Proporção Vias	Layout	Fase	q (veí/h)	Co (s)	g (s)
50	50/50	2	FASE A	974	38	9
			FASE B	487		19
	70/30	2	FASE A	1363	38	15
			FASE B	292		13
	90/10	2	FASE A	1752	38	23
			FASE B	97		5
70	50/50	2	FASE A	1363	58	16
			FASE B	681		32
	70/30	2	FASE A	1908	58	26
			FASE B	409		22
	90/10	2	FASE A	2453	58	39
			FASE B	136		9
90	50/50	2	FASE A	1752	120	37
			FASE B	876		73
	70/30	2	FASE A	2453	120	59
			FASE B	526		51
	90/10	2	FASE A	3154	120	90
			FASE B	175		20

Tabela 3. 7 – Tempos verdes máximos para cada fase dos diferentes planos de regulação relativos ao layout 2

4 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Definidos os cenários, as estratégias e todos os parâmetros necessários na construção do modelo procedeu-se à realização das simulações. Neste capítulo é feita a apresentação dos resultados obtidos nas análises realizadas, valores estes que assentam na avaliação da eficiência no desempenho dos cruzamentos isolados tendo por base os três indicadores escolhidos anteriormente que constituem o indicador de desempenho de referência.

4.1 Conjunto Estratégias 1

Começou-se por fazer uma breve análise dos resultados referentes ao conjunto de estratégias 1, onde eram utilizados os dois layouts adotados e aplicados os diferentes cenários e respetivas estratégias de regulação de sinais luminosos.

Inicialmente foram testadas as duas lógicas de atuação apresentadas na subsecção 3.4.1, contudo e face aos resultados observados expostos na tabela 4.1, optou-se por aplicar nas soluções semi-atuadas com sensor afastado 3m e 42m da linha de paragem, respetivamente as lógicas apresentadas nas figuras 3.3.a) e 3.3.b).

Taxa Saturação	Rep. Direc.	Tempo médio de Atraso [s/vei]	
		Semi-Atuada [42m]	
		Lógica (Fig. 3.a))	Lógica (Fig. 3.b))
50	50-50	23.536	9.516
	70-30	28.156	6.004
	90-10	39.052	3.941
70	50-50	16.669	9.684
	70-30	20.764	8.66
	90-10	42.17	4.885
90	50-50	23.869	18.22
	70-30	22.201	15.003
	90-10	32.363	7.398

Tabela 4. 1 – Resultados dos tempos médios de atraso utilizando as 2 lógicas de atuação aplicadas a soluções semi-atuadas

Para as soluções totalmente atuadas com sensores a 3m e 42m optou-se por adotar também as lógicas de atuação correspondentes às apresentadas nas figuras 3.4.a) e 3.4.b) respetivamente. Isto deveu-se ao fato de se verificarem valores exageradamente elevados de tempos médios de

atraso, quando soluções de comando atuado com sensor afastado a 42m da linha de paragem funcionavam segundo a lógica de atuação ilustrada nos fluxogramas da figuras 3.3.a) e 3.4.a).

Posto isto os resultados apresentados de seguida tem em conta a escolha das lógicas de atuação referidas acima.

4.1.1 Resultados referentes ao Layout 1

As tabelas seguintes apresentam os tempos médios de atraso obtidos através das análises realizadas tendo em conta o layout mais simples.

Layout 1 – Velocidade Constante

Taxa de Saturação 50%		Tempo médio de Atraso (s/vei)				
		Tempos Fixos	Semi-Atuada [3m]	Atuada [3m]	Semi-Atuada [42m]	Atuada [42m]
Rep. Direc.	50-50	10.165	9.860	9.163	9.516	9.143
	70-30	6.402	6.559	5.714	6.004	5.474
	90-10	4.253	3.047	2.289	3.941	4.605

Tabela 4. 2 – Tempos médios de atraso para cenários com taxa de saturação 50% e velocidade constante, Layout 1

Taxa de Saturação 70%		Tempo médio de Atraso (s/vei)				
		Tempos Fixos	Semi-Atuada [3m]	Atuada [3m]	Semi-Atuada [42m]	Atuada [42m]
Rep. Direc.	50-50	11.224	12.080	11.765	9.684	7.562
	70-30	9.091	9.004	8.325	8.659	7.674
	90-10	5.147	4.298	3.124	4.885	5.312

Tabela 4. 3 - Tempos médios de atraso para cenários com taxa de saturação 70% e velocidade constante, Layout 1

Taxa de Saturação 90%		Tempo médio de Atraso (s/vei)				
		Tempos Fixos	Semi-Atuada [3m]	Atuada [3m]	Semi-Atuada [42m]	Atuada [42m]
Rep. Direc.	50-50	20.940	21.604	25.825	18.220	8.512
	70-30	17.579	17.810	17.441	15.001	9.385
	90-10	7.590	7.397	6.626	7.398	9.410

Tabela 4. 4 - Tempos médios de atraso para cenários com taxa de saturação 90% e velocidade constante, Layout 1

Layout 1 – Velocidade Variável – Lig:48-52km/h Pes:44-52km/h

Taxa de Saturação 50%		Tempo médio de Atraso (s/vei)				
		Tempos Fixos	Semi-Atuada [3m]	Atuada [3m]	Semi-Atuada [42m]	Atuada [42m]
Rep. Direc.	50-50	7.704	8.173	7.496	6.888	6.661
	70-30	6.362	6.609	5.471	6.002	5.564
	90-10	4.460	3.087	2.345	4.194	4.790

Tabela 4. 5 - Tempos médios de atraso para cenários com taxa de saturação 50% e velocidade variável, Layout 1

Taxa de Saturação 70%		Tempo médio de Atraso (s/vei)				
		Tempos Fixos	Semi-Atuada [3m]	Atuada [3m]	Semi-Atuada [42m]	Atuada [42m]
Rep. Direc.	50-50	11.399	12.446	12.245	9.829	7.623
	70-30	9.286	9.171	8.316	8.650	7.872
	90-10	4.985	4.326	3.209	4.754	5.548

Tabela 4. 6 - Tempos médios de atraso para cenários com taxa de saturação 70% e velocidade variável, Layout 1

Taxa de Saturação 90%		Tempo médio de Atraso (s/vei)				
		Tempos Fixos	Semi-Atuada [3m]	Atuada [3m]	Semi-Atuada [42m]	Atuada [42m]
Rep. Direc.	50-50	21.145	25.669	25.669	18.687	8.673
	70-30	17.238	17.749	17.716	15.374	9.302
	90-10	7.976	7.795	7.066	7.904	9.634

Tabela 4. 7 - Tempos médios de atraso para cenários com taxa de saturação 90% e velocidade variável, Layout 1

Layout 1 – Velocidade Variável – Lig:46-54km/h Pes:42-50km/h

Taxa de Saturação 50%		Tempo médio de Atraso (s/vei)				
		Tempos Fixos	Semi-Atuada [3m]	Atuada [3m]	Semi-Atuada [42m]	Atuada [42m]
Rep. Direc.	50-50	7.873	8.859	8.220	7.065	6.635
	70-30	6.637	6.898	5.786	6.278	5.885
	90-10	4.946	3.472	2.728	4.604	5.185

Tabela 4. 8 - Tempos médios de atraso para cenários com taxa de saturação 50% e velocidade variável, Layout 1

Taxa de Saturação 70%		Tempo médio de Atraso (s/vei)				
		Tempos Fixos	Semi-Atuada [3m]	Atuada [3m]	Semi-Atuada [42m]	Atuada [42m]
Rep. Direc.	50-50	11.746	12.637	12.496	10.121	8.011
	70-30	9.721	9.423	8.628	8.960	8.361
	90-10	5.708	4.956	3.736	5.388	5.938

Tabela 4. 9 - Tempos médios de atraso para cenários com taxa de saturação 70% e velocidade variável, Layout 1

Taxa de Saturação 90%		Tempo médio de Atraso (s/vei)				
		Tempos Fixos	Semi-Atuada [3m]	Atuada [3m]	Semi-Atuada [42m]	Atuada [42m]
Rep. Direc.	50-50	21.416	26.146	26.146	19.138	9.013
	70-30	17.778	18.134	18.106	15.940	9.754
	90-10	8.475	8.372	7.610	8.480	10.227

Tabela 4. 10 - Tempos médios de atraso para cenários com taxa de saturação 90% e velocidade variável, Layout 1

Face aos resultados obtidos verifica-se que à medida que se aumentam as taxas de saturação o tempo médio de atraso aumenta, isto acontece pois ao aumentar a saturação das vias há mais utilizadores da rede o que leva à formação de filas de espera e por conseguinte a tempos médios de atraso mais elevados. Ao passo que enquanto a proporção do tráfego entre as vias se vai concentrando numa delas os atrasos diminuem, como era de esperar.

Quando o tráfego está repartido de forma mais uniforme entre as duas vias (50-50; 70-30) a solução totalmente atuada com sensor a 42m da linha de paragem mostrou-se como a mais adequada, uma vez que apresenta valores médios de tempo de atraso mais reduzidos. Enquanto que a pior solução, para a maior parte das situações é a semi-atuada com sensor a 3m da linha de paragem, com maiores atrasos registados.

Por outro lado, para uma repartição direccional de 90%-10% de veículos por via observa-se claramente um padrão nos resultados, concluindo-se que para estes casos a melhor solução a adotar é uma solução totalmente atuada com um sensor instalado a 3m da linha de paragem em cada via, enquanto que a menos eficiente apresentando valores do tempo médio de atraso mais elevados é a solução totalmente atuada com sensor instalado a 42m da linha de paragem. Tal fato poderá estar diretamente relacionado com a lógica de atuação adotada anteriormente, isto é, numa solução totalmente atuada com com sensores instalados a 3m da linha de paragem, a fase da via predominante estende enquanto não seja detetado um veiculo na via secundária, o que não acontece na solução com sensor instalado a 42m da linha de paragem, onde independentemente da presença de veículos a fase da via secundária é ativada, podendo levar à

fomação de pequenas filas de espera na via principal e assim aumentar os tempos médios de atraso.

Em geral, verifica-se que as soluções totalmente atuadas apresentam tempos médios de atraso relativamente baixos comparativamente com as restantes soluções, pelo que se conclui que estas são as estratégias de regulação tendencialmente com o mais elevado nível de eficiência no desempenho do cruzamento.

4.1.2 Resultados referentes ao Layout 2

Aqui apresentam-se os tempos médios de atraso obtidos através das análises realizadas com base no layout 2 com duplicação de vias num dos eixos rodoviários.

Layout 2 – Velocidade Constante

Taxa de Saturação 50%		Tempo médio de Atraso (s/vei)				
		Tempos Fixos	Semi-Atuada [3m]	Atuada [3m]	Semi-Atuada [42m]	Atuada [42m]
Rep. Direc.	50-50	8.769	6.245	6.245	6.297	6.297
	70-30	6.907	4.595	4.292	5.937	5.936
	90-10	3.216	1.752	1.369	2.937	3.295

Tabela 4. 11 - Tempos médios de atraso para cenários com taxa de saturação 50% e velocidade variável, Layout 2

Taxa de Saturação 70%		Tempo médio de Atraso (s/vei)				
		Tempos Fixos	Semi-Atuada [3m]	Atuada [3m]	Semi-Atuada [42m]	Atuada [42m]
Rep. Direc.	50-50	12.957	9.536	9.507	7.385	10.221
	70-30	10.105	6.624	6.385	6.343	6.581
	90-10	4.013	2.717	2.316	3.779	4.648

Tabela 4. 12 - Tempos médios de atraso para cenários com taxa de saturação 70% e velocidade variável, Layout 2

Taxa de Saturação 90%		Tempo médio de Atraso (s/vei)				
		Tempos Fixos	Semi-Atuada [3m]	Atuada [3m]	Semi-Atuada [42m]	Atuada [42m]
Rep. Direc.	50-50	25.694	19.341	19.341	10.790	8.691
	70-30	19.952	12.200	12.203	8.682	7.512
	90-10	6.975	5.025	4.705	4.730	5.617

Tabela 4. 13 - Tempos médios de atraso para cenários com taxa de saturação 90% e velocidade variável, Layout 2

Layout 2 – Velocidade Variável – Lig:48-52km/h Pes:44-52km/h

Taxa de Saturação 50%		Tempo médio de Atraso (s/vei)				
		Tempos Fixos	Semi-Atuada [3m]	Atuada [3m]	Semi-Atuada [42m]	Atuada [42m]
Rep. Direc.	50-50	8.900	6.391	6.357	6.434	6.434
	70-30	7.001	4.777	4.452	6.022	6.044
	90-10	3.365	1.951	1.566	3.082	3.346

Tabela 4. 14 - Tempos médios de atraso para cenários com taxa de saturação 50% e velocidade variável, Layout 2

Taxa de Saturação 70%		Tempo médio de Atraso (s/vei)				
		Tempos Fixos	Semi-Atuada [3m]	Atuada [3m]	Semi-Atuada [42m]	Atuada [42m]
Rep. Direc.	50-50	13.027	9.627	9.595	7.540	7.288
	70-30	10.123	6.784	6.587	6.549	6.645
	90-10	4.229	2.985	2.537	3.993	4.756

Tabela 4. 15 - Tempos médios de atraso para cenários com taxa de saturação 70% e velocidade variável, Layout 2

Taxa de Saturação 90%		Tempo médio de Atraso (s/vei)				
		Tempos Fixos	Semi-Atuada [3m]	Atuada [3m]	Semi-Atuada [42m]	Atuada [42m]
Rep. Direc.	50-50	25.597	19.667	19.667	10.967	8.896
	70-30	20.060	12.976	12.971	9.107	7.808
	90-10	7.025	5.400	5.140	5.188	5.700

Tabela 4. 16 - Tempos médios de atraso para cenários com taxa de saturação 90% e velocidade variável, Layout 2

Layout 2 – Velocidade Variável – Lig:46-54km/h Pes:42-50km/h

Taxa de Saturação 50%		Tempo médio de Atraso (s/vei)				
		Tempos Fixos	Semi-Atuada [3m]	Atuada [3m]	Semi-Atuada [42m]	Atuada [42m]
Rep. Direc.	50-50	9.050	6.521	6.468	6.684	6.684
	70-30	7.073	4.892	4.545	6.092	6.193
	90-10	3.471	2.054	1.673	3.194	3.472

Tabela 4. 17 - Tempos médios de atraso para cenários com taxa de saturação 50% e velocidade variável, Layout 2

Taxa de Saturação 70%		Tempo médio de Atraso (s/vei)				
		Tempos Fixos	Semi-Atuada [3m]	Atuada [3m]	Semi-Atuada [42m]	Atuada [42m]
Rep. Direc.	50-50	13.224	9.798	9.760	7.726	7.433
	70-30	10.288	6.929	6.714	6.677	6.822
	90-10	4.404	3.099	2.661	4.155	5.004

Tabela 4. 18 - Tempos médios de atraso para cenários com taxa de saturação 70% e velocidade variável, Layout 2

Taxa de Saturação 90%		Tempo médio de Atraso (s/vei)				
		Tempos Fixos	Semi-Atuada [3m]	Atuada [3m]	Semi-Atuada [42m]	Atuada [42m]
Rep. Direc.	50-50	25.872	19.991	19.991	11.322	9.136
	70-30	20.320	13.132	13.128	9.303	8.011
	90-10	7.231	5.623	5.360	5.336	5.935

Tabela 4. 19 - Tempos médios de atraso para cenários com taxa de saturação 90% e velocidade variável, Layout 2

Perante os resultados observados para uma interseção de eixos com igual importância, a estratégia que se revelou mais eficiente com valores médios de atraso de aproximadamente 8 segundos foi uma solução totalmente atuada.

Uma tendência que facilmente se pode observar é o facto de uma solução a tempos fixos se ter revelado sempre a pior alternativa de controlo de tráfego, independentemente do grau de saturação da via e para as repartições direccionais de 50-50 e 70-30.

Na análise dos cenários com repartição direccional 70-30 sobressai um padrão para a melhor solução de regulação de sinais luminosos, ao aumentar a taxa de saturação de 50% para 70% e posteriormente para 90%, a estratégia que melhor se adequa para cada uma destas situações é, respetivamente a solução totalmente atuada com sensores a 3m, a solução semi-atuada com sensor a 42m e solução totalmente atuada com sensores a 42m da linha de paragem. Este padrão verifica-se independentemente da velocidade dos veículos se manter constante ou variar.

Tendo em conta os resultados obtidos conclui-se que para uma distribuição de tráfego 90-10 entre as vias é apresentado um padrão semelhante ao visualizado no layout anterior para a mesma situação, isto é, a solução que revela um melhor desempenho do cruzamento em análise é a solução totalmente atuada, com sensores a 3m da linha de paragem, sendo que a pior solução está entre a totalmente atuada com sensores a 42m da linha de paragem e a solução a tempos fixos.

4.1.3 Análise Comparativa entre o Layout 1 e o Layout 2

Em suma, de uma forma geral as soluções totalmente atuadas são as mais eficientes, demonstrando valores médios de atraso mais reduzidos, o que era expectável uma vez que estas, à partida têm um potencial maior de ajustamento em tempo real às variações registadas na procura. Por outro lado, com era também esperado, as soluções a tempos fixos geralmente são as que revelam elevados tempos médios de atraso, muitas das vezes valores superiores a 20 segundos, o que faz com que estas sejam as que apresentam pior desempenho na regulação dos sinais luminosos nestas interseções.

Contudo as soluções semi-atuadas também se demonstram uma alternativa relativamente eficiente quando estamos perante cruzamentos de geometria semelhante ao layout 2, uma vez que este apresenta um eixo que pode claramente se designar como predominante, ao qual esta solução vai dar prioridade face ao menor volume de tráfego na outra via. Contrariamente no caso do layout 1 esta solução revela-se ineficaz, sendo até a pior alternativa na maior parte das análises.

4.2 Conjunto Estratégias 2

Em seguida analisam-se os resultados presentes na tabela 4.19 referentes ao conjunto de estratégias 2, onde se teve em conta o layout 1 aplicando os respetivos cenários.

	% Pesados	Taxa de Saturação	Proporção vias	Velocidade Desejada		Tempo de Extensão	Tempo médio de atraso (s/vei)	Distância a sensor (m)	
				Lig.	Pes.				
Conjunto Estratégias 2	10	70	70/30	50	46	2.6	8.409	36	Caso 1
						2.8	8.728	39	
						3.0	8.660	42	
						3.2	8.407	44	
						3.4	8.715	47	
				48-52	44-48	2.6	8.582	36	Caso 2
						2.8	8.846	39	
						3.0	8.649	42	
						3.2	8.526	44	
				46-54	42-50	2.6	8.800	36	Caso 3
						2.8	9.103	39	
						3.0	8.960	42	
3.2	8.702	44							

						3.4	8.897	47	
--	--	--	--	--	--	-----	-------	----	--

Tabela 4. 20 – Resultados obtidos quando aplicado o Conjunto de Estratégias 2

Face aos resultados obtidos conclui-se que independentemente da variação da velocidade dos veículos e para as seguintes condições: 10 % de pesados, uma taxa de saturação de 70% e uma distribuição de 70-30 do tráfego entre as duas vias, a localização ótima para o sensor associado a uma solução semi-atuada é a 44m da linha de paragem e com um tempo de extensão de 3,2 segundos, apesar de uma solução com sensor localizado a 36m da linha de paragem e com um tempo de extensão de 2,6 segundos apresentar resultados muito próximos dessa alternativa. O que sugere que os valores do tempo médio de atraso obtidos em função do tempo de extensão podem ser expressos por uma curva próxima de uma função senoidal como ilustrado no gráfico da figura 4.1, isto é periódica, não monótona com pelo menos 2 mínimos locais.

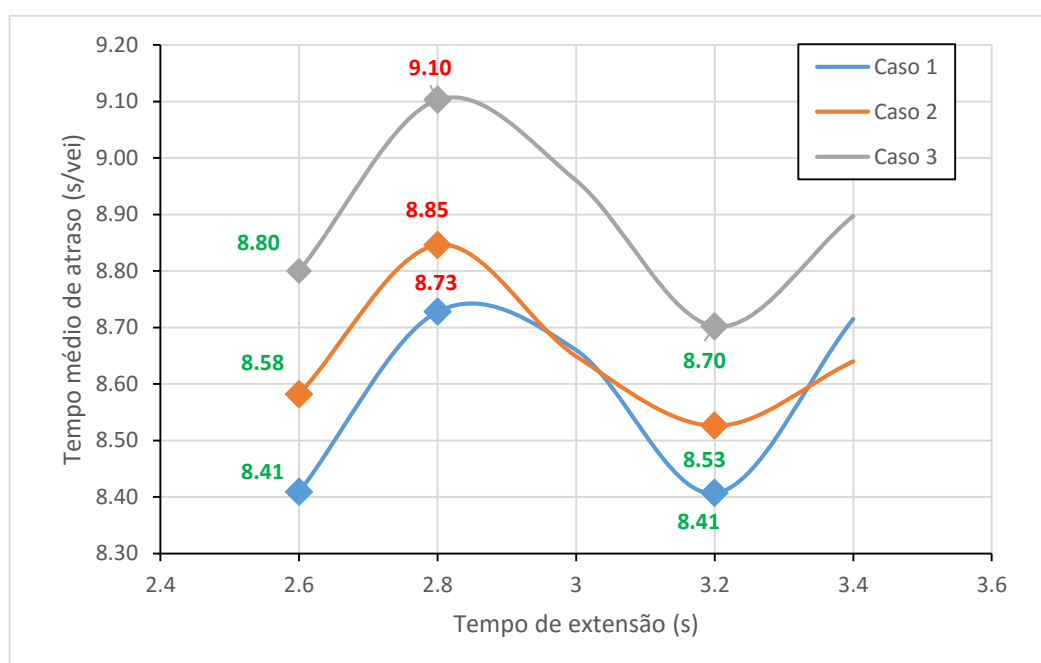


Figura 4. 1 – Relação entre o tempo de extensão e o tempo médio de atraso

Apesar de os valores para o tempo médio de atraso serem muito semelhantes, a solução com o sensor localizado a 44m da linha de paragem regista o menor atraso médio, valor este na ordem dos 4.0% inferior à alternativa com pior tempo médio de atraso.

É importante realçar que os desempenhos relativos das várias alternativas são bastante similares, isto é, apresentam uma variação máxima de aproximadamente 4%, pelo que estes resultados sugerem que não é muito importante a otimização tão precisa desta especificação.

5 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

5.1 Conclusões

O objetivo principal deste estudo era a avaliação comparativa do desempenho relativo de diferentes estratégias de gestão de tráfego reguladas por sinais luminosos e diferentes arquiteturas de detecção. Para tal recorreu-se a uma das mais conceituadas ferramentas de microsimulação, o software AIMSUN, a qual se mostrou muito versátil e completa durante todo este trabalho.

Esta avaliação centrou-se em analisar o impacto sobre o desempenho das interseções da variação de um conjunto de características dos estudos de caso ligadas à geometria do cruzamento, às características da procura e ao comportamento dos condutores quando aplicadas às diversas estratégias de regulação. A análise comparativa dos diversos cenários baseou-se no tempo de atraso médio por veículo determinado para estes, sendo o indicador de desempenho adotado.

Face às análises realizadas e aos resultados obtidos, como era de esperar, confirmou-se que o aumento da taxa de saturação tem um efeito negativo sobre o desempenho da interseção, aumentando o tempo médio de atraso.

Outra tendência, mais relevante, que se verificou na análise dos resultados foi o facto de que a concentração do tráfego numa das vias leva à diminuição do tempo médio de atraso, isto é, para repartições direccionais de tráfego desiguais, em que uma das vias é claramente predominante sobre a outra, e na presença de soluções de comando atuado estas mostraram-se particularmente eficientes, como era expectável.

Esta última tendência é mais acentuada no caso do layout 2, onde um dos eixos se apresenta claramente como predominante, em que as soluções totalmente atuadas se mantiveram em geral como as mais eficazes, sendo que as semi-atuadas também se mostraram uma alternativa relativamente eficiente.

Resumidamente da análise aos resultados do conjunto de estratégias 1 conclui-se que, como era esperado, as soluções totalmente atuadas revelam um melhor desempenho em interseções isoladas devido à capacidade que estas apresentam de se ajustar, em tempo real, às variações que ocorrem nas correntes de tráfego por elas reguladas. Por outro lado, como era também esperado, as soluções a tempos fixos tendem a ser claramente as que revelam elevados tempos médios de atraso.

A análise de sensibilidade em relação à variação do tempo de extensão e consequente localização do sensor não apresentou um impacto significativo na redução dos tempos médios de atraso, tendo-se determinado variações da ordem dos 4% entre resultados extremos, indiciando que há um potencial limitado associado à otimização deste parâmetro de regulação das soluções de sinais luminosos, parecendo aceitável que em casos correntes se apliquem os valores de referência recomendados na bibliografia especializada.

5.2 Trabalhos Futuros

Tendo em conta os resultados obtidos e face à variedade de soluções e opções que podem ser tomadas para a resolução dos problemas analisados neste trabalho, este apresenta múltiplas possibilidades de desenvolvimento e continuação.

Uma primeira hipótese seria a de alargar os cenários de teste, através da consideração de uma gama mais alargada de funções e parâmetros de distribuição das velocidades desejadas por parte dos condutores. De facto, esta característica comportamental tem um potencial significativo de condicionamento das distribuições dos intervalos entre veículos sucessivos, que, por sua vez, tendem a ser determinantes no desempenho potencial de soluções atuadas de sinais luminosos que se baseiem em heurísticas adaptativas.

Com base nos resultados obtidos para o conjunto de estratégias 2 parece, também, interessante a realização de uma análise semelhante à do conjunto de estratégias 1, mas considerando um tempo de extensão de 3,2 segundos, por forma a averiguar se esta seria uma solução ótima relativamente ao conjunto de estratégias 1 abordada neste trabalho, e, deste modo, avaliar o grau de robustez das tendências identificadas a este nível no presente estudo.

Um outro estudo interessante, para testar a hipótese levantada de tendência senoidal dos resultados obtidos para o tempo médio de atraso no conjunto de estratégias 2, poderá ser alargar o intervalo dos tempos de extensão a testar.

O presente estudo focou-se na análise de cruzamentos isolados, pelo que tendo em conta o ambiente urbano seria deveras interessante aplicar esta metodologia a casos de interseções com geometrias e planos de regulação mais típicos da realidade, por forma a melhor testar a robustez das tendências identificadas.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Chandan, K., Seco, Á., Bastos Silva, A. (2015). “Evaluating lane-by-lane gap-out based signal control for isolated intersection under stop-line, single and multiple advance detection systems”. Department of Civil Engineering, University of Coimbra. Coimbra, Portugal
- Costa, A., Seco, Á. e Vasconcelos, A. (2008). “Manual de Planeamento das Acessibilidades e da Gestão Viária”, Vol. 7 “Sinais Luminosos”. CCDRN: Comissão de Coordenação e Desenvolvimento Regional do Norte, Portugal
- Department for Transport (1995). “The “SCOOT” Urban Traffic Control System”. Traffic Advisory Leaflet 4/95. London, United Kingdom
- Department for Transport (1997), “The MOVA signal control system”, Traffic Advisory Leaflet 3/97. London, United Kingdom
- Department for Transport (2003), “Signal-control at Junctions on High-speed Roads”, Traffic Advisory Leaflet 2/03. London, United Kingdom
- FHWA. (2008) “Traffic Signal Timing Manual”, FHWA – Federal Highway Administration, United States
- HCM. (2000). “Highway Capacity Manual”, TRB – Transportation Research Board – National Research Council, Washington D.C., United States
- López, C. (2014), “Anàlisi del control semafòric actuat en interseccions aïllades”, Treball Final de Grau, Departament d’Infraestructura del Transport i del Territori, Universitat Politècnica de Catalunya. Barcelona, Espanha
- RMS (2002). “An introduction to SATS”. RMS – Roads and Maritime Services. Sydney, Australia
- Shepherd, S.P. (1992) “A review of traffic signal control”. ITS – Institute of Transport Studies, University of Leeds. Working paper 349. Leeds, United Kingdom
- Tian, Z. & Urbanik, T. (2006). “Green extension and traffic detection schemes at signalized intersections”. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, No 1978, pp.16-24. Washington, D.C., United States
- TSS (2013a). Aimsun 7 Dynamic Simulators User’s Manual. TSS – Transport Simulation Systems. Barcelona, Espanha
- TSS (2013b). Aimsun 7 User’s Manual. TSS – Transport Simulation Systems. Barcelona, Espanha
- Webster, F.V. (1958). “Traffic signal settings”. London, United Kingdom

SITES CONSULTADOS:

AIMSUN@2015 – Transport Simulation Systems (TSS) <www.aimsun.com>