

AVALIAÇÃO DO EFEITO DE DIFERENTES ESTRATÉGIAS DE MONITORIZAÇÃO DO TRÁFEGO NO DESEMPENHO DE SOLUÇÕES SEMAFORIZADAS ATUADAS

Chandan. Kancharla¹, Alvaro. M. Seco² e Ana Bastos Silva³

¹Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Coimbra, 3004-516, Coimbra, Portugal. Tel: +351 913319632; Email: kamalkeerthichandan @ymail.com

² Centro de Investigação do Território, Transportes e Ambiente (CITTA), Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Coimbra, 3004-516, Coimbra, Portugal

³ Membro Honorário da AFESP, Centro de Investigação do Território, Transportes e Ambiente (CITTA), Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Coimbra, 3004-516, Coimbra, Portugal.

Sumário

Este artigo centra-se na análise comparativa do desempenho associado a diferentes estratégias de monitorização do tráfego recomendadas pelo Federal Highway Administration (FHWA), propondo-se duas estratégias alternativas assentes na utilização de um ou múltiplos detetores localizados a montante da barra de paragem. As estratégias propostas são aplicadas a um sistema semaforizado atuado, sendo o aumento incremental do tempo de verde avaliado de forma individualizada por via. O uso da plataforma VISSIM 8 comprova que o uso de múltiplos detetores se traduz na redução quer das demoras quer no número de paragens por veículo.

Palavras-chave: Sistemas semaforizados atuados; Detetores por indução; Deteção individualizada por via; Microssimulação; VISSIM

1 INTRODUÇÃO

As interseções semaforizadas afirmam-se no sistema de transporte rodoviário, como uma forma de regulação do tráfego urbano extremamente flexível e eficiente. O uso de sistemas e de estratégias de controlo adequadas tende a traduzir-se na diminuição dos atrasos, do número de paragens e, por inerência, do consumo de combustível para todos os utilizadores do sistema. Os sistemas semaforizados geralmente funcionam a tempos fixos, em modo atuado, ou numa combinação destes dois modos. Os sistemas em tempos fixos assentam num ciclo fixo, que se repete ao longo do tempo. Por outro lado, o controlo atuado consiste na utilização de ciclos de duração variável, em função da distribuição de chegadas dos veículos nas vias de aproximação. Nestes sistemas o tempo de verde é estendido entre um valor mínimo e um máximo pré-definidos, em função das atuações registadas nos detetores de indução. A deteção é utilizada para fornecer ao controlador informações em tempo real, sobre a procura de tráfego em cada uma das vias. O tempo de verde em cada fase é assim determinado em função dos instantes em que o detetor é atuado e dos correspondentes parâmetros de controlo [1].

Nos sistemas atuados, o tempo mínimo de verde é, usualmente, definido de modo a servir, em cada fase, os veículos que se armazenaram em fila de espera durante o período de vermelho. A partir desse instante, o tempo de verde é estendido (por períodos incrementais) enquanto houver deteção de veículos com intervalo inter-veículos abaixo de um valor máximo pré-definido (*gap-out*, ou condição de fecho do tempo de verde) até que seja atingido o verde máximo, ou que deixem de ser detetados novos veículos dentro do *gap-out*. Assim, o tempo de verde, em cada ciclo de sistemas atuados, é variável, sendo compreendido entre um valor máximo e um mínimo determinado em função da distribuição das atuações no detetor. A dimensão e a localização do detetor assumem um papel fundamental na transferência da informação dos detetores para o controlador central do sistema. Sublinhe-se que o desempenho operacional do cruzamento depende, maioritariamente da relação entre o esquema de deteção e a configuração do controlador. Em termos ótimos a dimensão, localização e configuração do detetor devem ser devidamente compatibilizados com a geometria da interseção, com o volume de tráfego envolvido e com a velocidade de aproximação. O processo de otimização consiste no ajustamento da localização

do detetor (a montante da barra paragem), do seu comprimento, da condição de fecho do verde (gap-out) e do tempo mínimo de verde, tendo por base as condições locais prevalentes [1].

Muitos sistemas de controlo atuados apoiam-se em diferentes configurações de detetores para monitorizar o tráfego, em tempo real. O sistema australiano SCATS [2], com dois níveis hierárquicos, usa a informação recebida de múltiplos detetores localizados em cada uma das vias de entrada, imediatamente a montante da barra de paragem. O sistema inglês SCOOT [3] é um método de controlo dinâmico em tempo real que recorre à informação recolhida por detetores localizados no trecho de aproximação. Os detetores são normalmente instalados na proximidade da intersecção anterior, de forma a reduzir os custos de comunicação. Já o sistema integrado de controlo MOVA [4] desenvolvido pelo *Transport Research Laboratory* (TRL), U.K utiliza um detetor de tráfego localizado igualmente a montante da intersecção. Neste sistema, são instalados dois detetores de veículos em cada via: um primeiro a cerca de 100m da barra de paragem e um segundo a cerca de 40m.

O sistema *Adaptive Control Software Lite* (ACS Lite) desenvolvido pelo FHWA dos EUA, usa detetores associados à barra de paragem (de comprimento compreendido entre 1,22 e 21m - 4 e 70 ft) para monitorizar o volume e a utilização do tempo de verde. Em vias estruturantes, onde importa coordenar as temporizações de intersecções adjacentes, o sistema ACS Lite utiliza detetores de avanço (dimensão 1,83 m×1.83m - 6ft×6ft) para monitorar as séries temporais de procura de tráfego e identificar as chegadas em pelotão, de modo a ajustar o desfasamento entre planos de temporização (*offsets*) e por inerência melhorar a fluidez do tráfego [5].

A *Federal Highways Administration* (FHWA), que incorpora o corpo de peritos em matéria de transporte rodoviário do *United States Department of Transportation* (USDOT), tem emanado orientações para o uso de várias configurações de detetores para aplicação em sistemas semaforizados atuados aplicados de forma isolada. Nesse contexto, o presente artigo, centra-se na análise comparativa do desempenho de diferentes configurações de deteção, quando aplicadas a um cruzamento isolado, recorrendo a uma plataforma de microsimulação (VISSIM).

2 ENQUADRAMENTO TEÓRICO

2.1 Configurações de detetores

O objetivo do processo de deteção é reconhecer a presença do veículo e identificar os intervalos entre veículos na corrente de tráfego que, dependendo de sua duração, levarão ao fecho do tempo de verde, ou por oposição, à sua extensão. São vários os autores que, no passado, têm vindo a propor critérios de extensão do tempo de verde, aplicados a sistemas semaforizados atuados [6].

Segundo James *et al* [7] a deteção junto à barra de paragem revela-se extremamente eficaz para garantir o tempo necessário para limpar a fila de espera no cruzamento. Neste tipo de deteção o sistema revela-se sensível à presença de veículos em fila espera e permite minimizar a percentagem de ciclos que termina antes da dissipação total da fila. No entanto, a maior limitação do uso de um único detetor junto à barra de paragem é que a “não deteção de veículos no detetor” apenas é conhecida após o intervalo máximo admissível entre veículos (maximum allowable headway, MAH) ser atingido, o que ocorre após a passagem do último veículo na barra de paragem, tendendo, assim, a provocar a extensão desnecessária do tempo de verde no final de cada fase.

Com vista a ultrapassar este problema FHWA [1] e James *et al* [7] sugeriram orientações para a configuração de esquemas de deteção do tráfego a velocidade baixa (velocidade inferior ou igual 55km/h [35 mph]). O principal objetivo da deteção de movimentos de tráfego em correntes a velocidade baixa é “*ativar a fase, servir a fila, ao mesmo tempo que minimiza as demoras*” [1]. A localização do detetor junto à barra de paragem é habitualmente utilizada para velocidades baixas, já que se tende a dar menor ênfase à proteção da “zona dilema”.

De acordo com Lin [8], o comprimento ideal a dar à zona de deteção junto à barra de paragem é de cerca de 24m (80ft). Este comprimento tende a ser eficiente na deteção do final da fila de espera, ao mesmo tempo que minimiza a ocorrência de um fecho do verde prematuro. No entanto, a instalação e manutenção de detetores longos atingem frequentemente custos proibitivos. Assim FHWA sugeriu que, o comprimento apropriado da zona de deteção junto à barra de paragem não deve ser inferior a 6m (20ft) devendo operar em modo de presença. Neste modo de deteção, a atuação inicia-se quando o veículo chega à zona de deteção e só termina após o veículo abandonar essa zona [7].

Quando adotados detetores de avanço em correntes de tráfego sujeitas a velocidade baixa, de acordo com as diretrizes FHWA deve ser adotado um detetor de 1,83m (6ft) localizado a montante da barra de paragem, que opera em modo por *impulso*. Neste modo, a atuação começa e termina com a chegada do veículo ao detetor (tempos típicos de atuação de impulsos são de cerca de 0,10 a 0.15s) [7]. "A localização do detetor de avanço deve ser tal que o tempo de percurso entre o detetor e a barra de paragem, para um veículo que circula à velocidade igual ao percentil 85 da sua distribuição, é igual ao intervalo máximo admissível entre veículos (MAH)" [1]. Este tipo de deteção comparativamente ao detetor junto à barra paragem permite evitar a extensão desnecessária do tempo de verde já que é conhecida, com antecedência, a distribuição do tráfego, antes de atingir a barra de paragem. Tendo por base este princípio, o Quadro 1 apresenta a localização recomendada para o detetor em função da velocidade de aproximação.

Quadro 1. Distância recomendada (Z) entre o detetor e a barra de paragem [1]

Percentil 85 da distribuição da velocidade de aproximação (km/h)	Distância Z (m) para MAH de 3.0s
32	27
40	33
48	40
56	47

Para interseções sujeitas a velocidade elevadas (superiores 55km/h, ou seja 35 mph), o esquema de deteção deverá ser capaz de servir, no início do tempo de verde, a correspondente fila de espera mas também de encerrar a fase, nas devidas condições de segurança, perante situações de conflito. Segundo as diretrizes da FHWA, o detetor colocado junto à barra de paragem deve ser usado para limpar as filas, enquanto os restantes detetores localizados a montante dessa barra, devem permitir terminar a fase, nas devidas condições de segurança [1].

Nesta linha de ação, este artigo centra-se na apresentação de esquemas de deteção adaptados a correntes de tráfego sujeitas a velocidades baixas. O FHWA não disponibiliza recomendações para o uso de múltiplos detetores de avanço, neste tipo de ambiente de circulação, contudo os autores deste artigo perspetivam que o seu uso, mesmo face a velocidades baixas, tenderá a melhorar o desempenho global do cruzamento.

2.2 Sistema de controlo

Identificam-se dois tipos de esquemas de deteção de tráfego associados ao uso de múltiplos detetores: (i) deteção por ramo de entrada e, (ii) deteção individualizada por via de tráfego de entrada [9, 10]. O método de deteção por ramo de entrada conecta todos os detetores das várias vias de aproximação numa única unidade de deteção e fornece uma única entrada no controlador. Assim, sempre que um dos detetores na aproximação é acionado o controlador repõe o temporizador a zero e estende o tempo de verde dessa fase no valor do período incremental pré-estabelecido. A fase só termina quando o intervalo entre veículos, em todas as vias de aproximação, ultrapassar o valor máximo admissível (MAH). Contudo, tal esquema de deteção pode causar extensões desnecessárias do tempo de verde, particularmente nos ramos que disponibilizam mais de uma via de tráfego. No segundo tipo de esquemas cada uma das vias é monitorizada separadamente com base num detetor individualizado. Segundo este método, a fase de verde só termina quando todas as vias de aproximação registarem intervalos entre veículos superiores ao MAH [13].

Tian e Urbanik em [10] apresentam um exemplo para ajudar a entender as diferenças básicas entre estes dois métodos de deteção. O exemplo aqui apresentado mantém a filosofia, embora aplicado a uma sequência de tempos distinta (ver Quadro 2). É apresentada uma sequência de tempos de deteção de veículos e, por inerência os intervalos entre veículos resultantes, para o caso de serem disponibilizadas uma e duas vias de tráfego. A fase termina sempre que o intervalo entre veículos é superior ao intervalo máximo admissível (MAH) aqui assumido como sendo de 3.0s. No caso do método de deteção por ramo de entrada, a condição para o fecho do verde (e o correspondente tempo de verde resultante), é determinada tendo por base a sequência dos tempos de deteção de veículos em ambas as vias de forma combinada, e os correspondentes tempos entre veículos (ver Quadro 3). Os números em **negrito** representam os tempos de deteção dos veículos na via 2. Para os dados apresentados no Quadro 3, a condição de fecho do verde deveria ocorrer aos 17.2s (14,2 + 3,0) quando é registado o intervalo entre veículos de 3.5s (> 3.0s).

No caso de detecção individualizada por via de tráfego de entrada, os intervalos entre veículos em cada via são monitoradas separadamente, e a fase deverá encerrar quando as duas vias atingirem individualmente a condição de fecho. Assim, a condição de fecho do verde na via 1 é atingida em primeiro lugar, após a passagem do veículo aos 6.8s, atendendo a que o intervalo de passagem do veículo consecutivo se situa a 3.2s do anterior ($> 3.0s$). Por sua vez, na via 2 a condição de fecho é atingida após a passagem do veículo aos 8.9s, já que o veículo consecutivo, apenas passa após 3.8s ($> 3.0s$). Nesse sentido, a condição de fecho deveria ocorrer aos 8.9s e a fase terminaria aos 11.9s ($8,9 + 3,0$). Neste exemplo particular, a detecção por via resulta em menos 5.3s de tempo de verde face à detecção por ramo, o que se poderá traduzir numa diminuição do atraso global de interseção.

Quadro 2. Sequência de tempos de detecção e intervalos entre veículos num ramo com 2 vias de aproximação

VIA 1		VIA 2	
INSTANTE DE DETEÇÃO (SEG.)	INTERVALO ENTRE VEÍCULOS (SEG.)	INSTANTE DE DETEÇÃO (SEG.)	INTERVALO ENTRE VEÍCULOS (SEG.)
1.6		1.9	
3.2	1.6	3.8	1.9
5.2	2.0	5.3	1.5
6.8	1.6	7.3	2.0
10.0	3.2 (>3.0)	8.9	1.6
11.8	1.8	12.7	3.8 (>3.0)
17.7	5.9	14.2	1.5

Quadro 3. Sequência combinada de instantes de detecção de veículos e correspondentes intervalos entre veículos

SEQUENCIA COMBINADA DE INSTANTES DE DETEÇÃO (S)	INTERVALO ENTRE VEÍCULOS (S)	SEQUENCIA COMBINADA DE INSTANTES DE DETEÇÃO (S)	INTERVALO ENTRE VEÍCULOS (S)
1.6		7.3	0.5
1.9	0.3	8.9	1.6
3.2	1.3	10.0	1.1
3.8	0.6	11.8	1.8
5.2	1.4	12.7	0.9
5.3	0.1	14.2	1.5
6.8	1.5	17.7	3.5 (>3.0)

Smaglik *et al* [9] também comparou o método de detecção tradicional, no qual todas as vias de aproximação estão ligadas ao controlador atuado, comparativamente à detecção individualizada por via. Foram testados diversos valores de MAH (2.0, 2.5, 3.0, 3.5 e 4.0s) tendo-se concluído que a adoção do método de detecção individualizada por via de tráfego, com MAH=3.0s era a mais eficiente. No âmbito da recolha bibliográfica não foi encontrado qualquer trabalho de investigação que avalie o desempenho associado a esquemas de localização de múltiplos detetores, baseados no método de detecção individualizada por via. Este artigo pretende assim avaliar o desempenho associado a dois esquemas de detecção recomendados pelo FHWA: (1) detetor junto à barra de paragem; (2) detetor de avanço, localizado a montante da barra de paragem. Em complemento são propostos dois esquemas de detecção alternativos baseados na utilização de dois detetores de avanço localizados a montante da barra de paragem.

3 AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DE DIFERENTES ESQUEMAS DE DETEÇÃO

Esta seção centra-se na avaliação do desempenho associado a diferentes esquemas de detecção recorrendo a um modelo de simulação. Sublinhe-se que todos os esquemas apresentados foram analisados sob as mesmas

condições de base: sistema semaforizado totalmente atuado, com método de detecção individualizado por via, assumindo MAH de 3,0s.

3.1 Método do FHWA com detetor na barra de paragem

De acordo com a FHWA [1] para velocidades de aproximação baixas, o comprimento da zona de detecção junto à barra de paragem, não deve ser inferior a 6m (20ft) (ver Fig. 2a) e o detetor deve funcionar no modo de presença. Para o método de detecção por via individualizada, o critério de fecho do verde é aplicado a cada uma das vias individualmente sempre que o intervalo entre veículos consecutivos é superior ao intervalo máximo admissível entre veículos (3,0s). A principal limitação deste esquema é, que o intervalo entre veículos, apenas é conhecido 3,0 segundos após o veículo ter cruzado a barra de paragem, impondo um atraso de 3,0s por fase.

3.2 Método do FHWA com detetor de avanço (6ft)

De acordo com a FHWA [1], para vias sujeitas a velocidade baixa, o detetor de avanço deve ter 1,83 m (6ft) de comprimento. O detetor deve ser localizado a montante da barra de paragem e, como referido antes, a uma distância que corresponda ao tempo de percurso igual ao MAH, calculado para o percentil 85 da distribuição das velocidades. Na Fig. 1b, o detetor de 1.83m (6ft) foi localizado a uma distância de 40m (ver Quadro 1) antes da barra de paragem, correspondendo ao percentil 85 velocidade de aproximação de 48km/h.

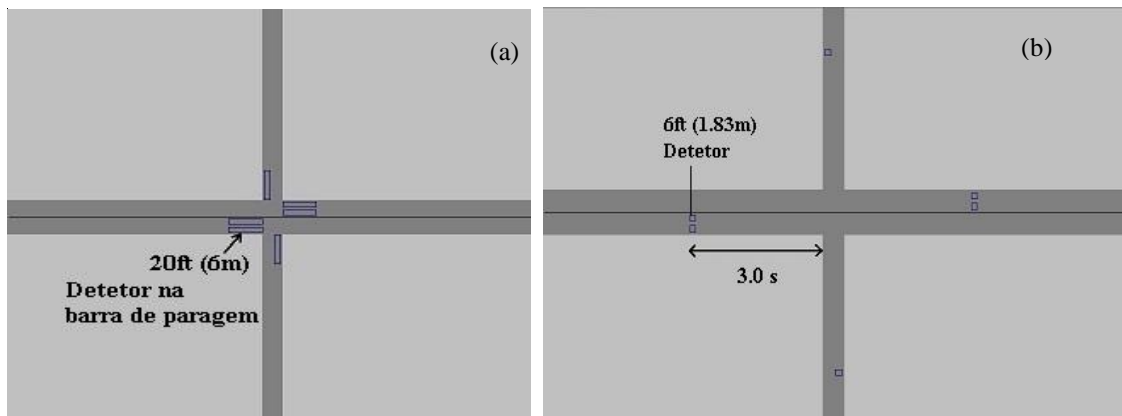


Fig. 1. Esquemas de detecção do FHWA. (a) Detetor na barra de paragem; (b) Detetor de avanço

Neste esquema o tempo de verde mínimo é definido para servir os veículos em fila entre a barra de paragem e o detetor a montante. Por sua vez o tempo de verde é estendido até que a condição de fecho do verde ocorra (para um MAH de 3,0s) em cada uma das vias individualizadas, ou o tempo de verde máximo seja atingido. A vantagem deste sistema relativamente ao detetor na barra de paragem centra-se, como referido acima, no facto de serem conhecidos, com antecedência, os intervalos entre veículos no detetor a montante e portanto permitir que o ultimo veículo da fase cruze a barra de paragem, no instante em que a condição de fecho é atingida, terminando a fase imediatamente. A principal limitação deste esquema de detecção prende-se com o facto de, perante condições saturadas, o prolongamento das filas de espera poder ultrapassar o detetor e provocar condições de fecho prematuro, deixando assim uma parte da fila por servir, resultando no conseqüente aumento do atraso.

3.3 Método Alternativo 1: uso de um detetor de avanço alongado

À semelhança do esquema de detecção proposto pela FHWA (e apresentado na secção 3.2), é proposta uma disposição alternativa, tendo por base um detetor 6m (20ft) de comprimento, a operar em modo de *presença*, colocado a 40m antes da barra de paragem (ver Fig. 2-a). Neste esquema, o tempo de verde mínimo é definido de forma a servir os veículos em fila armazenados entre a barra de paragem e o detetor, sendo a fase de verde estendida até atingir a condição e fecho (MAH 3,0s) em cada uma das vias de forma individualizada, ou até o tempo de verde máximo ser atingido. A vantagem deste sistema relativamente ao proposto pelo FHWA é, proporcionar uma zona de detecção alongada, onde o modo de *presença* por um período de tempo acrescido, permite detetar a presença dos veículos e desta forma reduzir a possibilidade de ocorrências de fecho prematuras.

3.4 Método Alternativo 2: uso de dois detetores de avanço

De modo a potenciar um melhor uso da informação disponibilizável é proposta uma configuração alternativa baseada no uso de dois detetores de avanço: um com 6m (20ft) de comprimento em modo de *presença* e um de 1,83m (6ft) em modo de *impulso*, ambos instalados em cada uma das vias de aproximação.

- (i) Detetor-1 (6m) localizado (com base no Percentil 85 da distribuição das velocidades de aproximação, V85) de modo que, um veículo depois de cruzar o Detetor-1 demore pelo menos 3 segundos para cruzar a barra de paragem;
- (ii) Detetor-2 (1.83m) localizado (com base na V85) de modo que, um veículo depois de cruzar Detetor-2 demore pelo menos 6s para atravessar a barra de paragem (ver Fig. 2b).

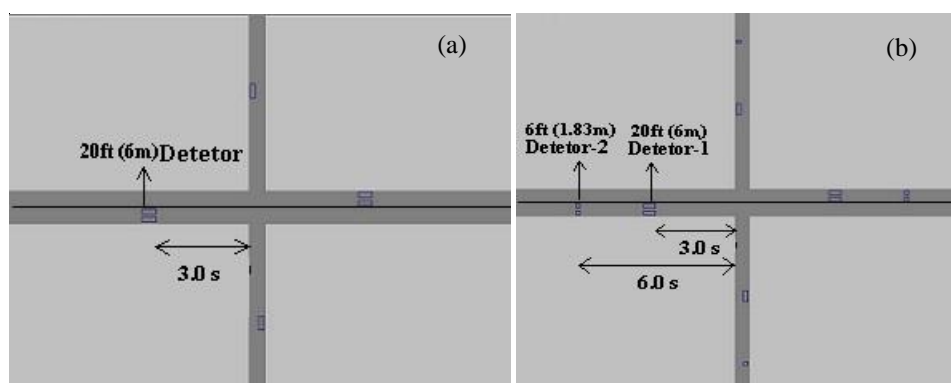


Fig. 2. (a) Proposta de uso um detetor longo de avanço; (b) Proposta de uso de dois detetores de avanço

Neste esquema de detecção (ver lógica na Fig. 3), uma vez expirado o período mínimo de verde, o detetor-1 chama pela extensão de verde até que a condição de fecho ocorra em cada uma das vias de tráfego individualmente. Detetada a condição de fecho do verde no detetor-1, o algoritmo verifica se algum veículo ativou o detetor-2 em cada uma das vias individualmente. Caso não se registre nenhuma atuação, o verde será encerrado. Caso os detetores-2 registem alguma atuação, o verde é prolongado até que a condição de fecho do verde seja registada em cada uma das vias individualmente. Uma vez que a condição de fecho é registada no detetor-2, o algoritmo acrescenta 3,0s ao tempo de verde, de modo que o último veículo que passou sobre esse detetor, seja capaz de atravessar a barra de paragem. Tal como referido anteriormente, um veículo leva 6s para percorrer o espaço entre o detetor-2 e a barra de paragem. Uma vez que são usados vários detetores de avanço, o algoritmo beneficia de informação adicional sobre a distribuição dos veículos sendo portanto expectável, que esta estratégia possa assegurar um nível de desempenho superior aos esquemas de detecção propostos pelo FHWA. Note-se que os critérios de extensão de verde em cada fase se baseia no funcionamento da entrada crítica (mais saturada) de cada fase.

4 ANÁLISE DOS RESULTADOS

4.1 Modelo de simulação

A avaliação do desempenho associado aos diferentes esquemas de detecção, tal como apresentados na seção 3, foi testado num cruzamento simples de 4 ramos. A via principal é constituída por uma faixa de rodagem com duas vias em cada sentido enquanto que a via secundária apenas apresenta uma via em cada sentido. De forma a simplificar o problema, apenas foram considerados os movimentos de ida em frente, sendo que todos os trechos assumiram o comprimento de 1km. Cada via de aproximação assumiu a largura de 3.5m. Os trabalhos de simulação foram suportados pelo *software* de simulação microscópica VISSIM 5,40. Os algoritmos de temporização dos quatro esquemas de detecção foram codificados em linguagem C++ e devidamente integrados com a programação VISSIM COM *Application Interface* (API). Atendendo a que só foram considerados movimentos de ida em frente, o plano de temporização integrou apenas duas fases.

O período de simulação foi de 3900s, onde os primeiros 300s foram rejeitados por corresponderem ao período de carregamento da rede. De forma a minimizar o efeito estocástico do tráfego, os resultados apresentados

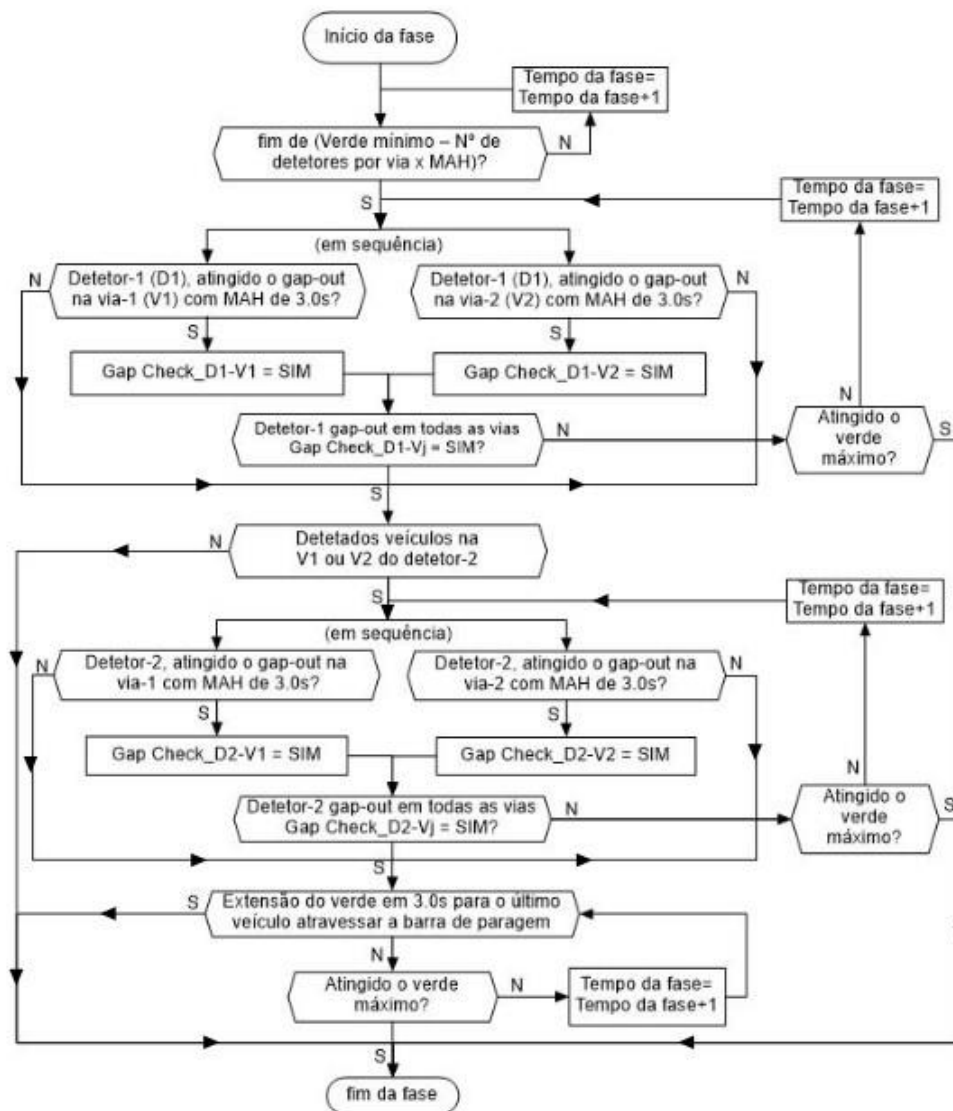


Fig. 3. Funcionamento do esquema de múltiplos detetores de avanço individualizados por via

representam a média de 10 corridas, com sementes aleatórias (mantidas em todos os cenários e métodos analisados). Foram considerados dois tipos de veículos: Ligeiros e Pesados de mercadorias. Durante a simulação experimental, o fluxo de saturação obtido para a interseção simulada foi de 2030 uve/h/via. O ciclo máximo absoluto adotado foi de 120s e o tempo de amarelo e de tudo-vermelho foi de 3 e de 2s por fase, respetivamente. O tempo mínimo de verde considerado para as entradas da via principal (EB e BM) e da via secundária (NB e SB) foi de 15 e 10s, respetivamente [1]. O tempo máximo de verde para as entradas da via principal e da via secundária foi assumido como proporcional ao fluxo das entradas, multiplicado pela duração máxima do ciclo, depois de deduzido o tempo de amarelo e de tudo vermelho. As análises comparativas foram apoiadas pela estimação dos seguintes indicadores de desempenho: demoras e número médio de paragens por veículo.

4.2 Definição dos cenários de estudo

Foram tidos em consideração três conjuntos de cenários, os quais integraram o efeito associado à variação da taxa de saturação (através da variação da relação V/C), à variação da proporção entre veículos ligeiros e pesados e a variação da proporção entre o volume do tráfego na via principal e via secundária. Em todos os cenários, foi considerada a velocidade desejada de 48-58kmph (min-máx) para os veículos ligeiros e de 40-45kmph para os veículos pesados. O Quadro 4 apresenta as gamas de valores considerados para cada parâmetro em análise.

Quadro 4. Definição da gama de variação dos parâmetros em análise

VARIACÃO DO RÁCIO FLUXO/CAPACIDADE				
	Via prioritária (70% fluxo)		Via secundária (30% fluxo)	
V/C	Este (veíc./h)	Oeste (veíc./h)	Norte (veíc./h)	Sul (veíc./h)
0.4	1005	503	215	108
0.5	1257	628	269	135
0.6	1508	754	335	167
0.7	1759	880	391	195
0.8	2010	1005	430	215
0.9	2262	1131	484	242
1.0	2513	1257	538	269
VARIACÃO DA PROPORÇÃO ENTRE VEÍCULOS LIGEIOS E PESADOS				
% de ligeiros % de pesados	Este (veíc./h)	Oeste (veíc./h)	Norte (veíc./h)	Sul (veíc./h)
Lig.(95) Pes.(5)	2060	1030	441	221
Lig.(90) Pes.(10)	2010	1005	430	215
Lig.(85) Pes.(15)	1961	981	420	210
VARIACÃO DO RÁCIO VOLUME DE TRÁFEGO NAS ENTRADAS PRINCIPAL VS SECUNDÁRIA				
Princ/ secund.	Este (veíc./h)	Oeste (veíc./h)	Norte (veíc./h)	Sul (veíc./h)
60% - 40%	1723	862	574	287
70% - 30%	2010	1005	431	215
80% - 20%	2298	1149	287	144
90% - 10%	2585	1292	144	72

Todos estes cenários foram aplicados aos 4 métodos alternativos: *Met. 1*: Detetor na barra de paragem; *Met. 2*: Detetor de avanço com 6ft; *Met. 3*: Detetor de avanço com 20ft; *Met. 4*: Múltiplos detetores de avanço.

4.2.1 Efeito da variação da taxa de saturação

Neste cenário, são atribuídos diferentes fluxos de entrada (Quadro 4) de forma a atingir diferentes taxas de saturação (rácios de V/C). A proporção de veículos ligeiros e pesados é mantida constante (90% e 10%, respetivamente). A análise da Fig. 4 permite concluir que, para relações de V/C de 0,40 a 1,0, o esquema com múltiplos detetores permitiu reduzir as demoras entre 3% e 22,1% e o número médio de paragens entre 3,9% e 24,4% comparativamente ao uso de um detetor de avanço de 6ft.

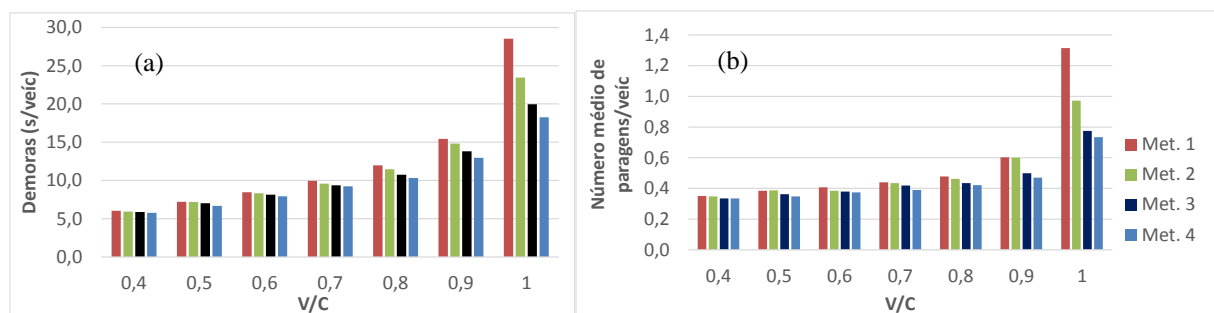


Fig. 4. Efeito da variação da taxa de saturação (a) Demoras; (b) Número médio de paragens por veículo

Quando comparado com o detetor de avanço alongado (de 20ft), o esquema de detecção múltipla revelou-se capaz de reduzir as demoras entre 1,5% a 8,5%, sendo os benefícios mais evidentes para relações V/C elevadas.

Este nível de desempenho deve-se claramente à presença dos dois detetores de avanço que permitiu detectar os veículos em fila durante rácios V/C elevados, ou face a situações de congestionamento, ativando assim a extensão do tempo de verde. Para baixos valores da relação V/C (exemplo, 0,4, 0,5), o detector-2 raramente ativa a extensão do tempo de verde (face ao baixo volume de tráfego), sendo que, na maioria dos ciclos, o tempo de verde será fechado quando atingida a condição de fecho nos detetores-1 em vias individuais.

4.2.2 Efeito da variação do tipo de veículos

Neste cenário, a relação V/C foi mantida igual a 0,8, e o rácio entre os volumes de tráfego nas entradas principais e secundárias mantido constante (70 vs 30% nas entradas prioritária e secundária, respetivamente), enquanto se fez variar a proporção de veículos ligeiros e de pesados (Quadro 4).

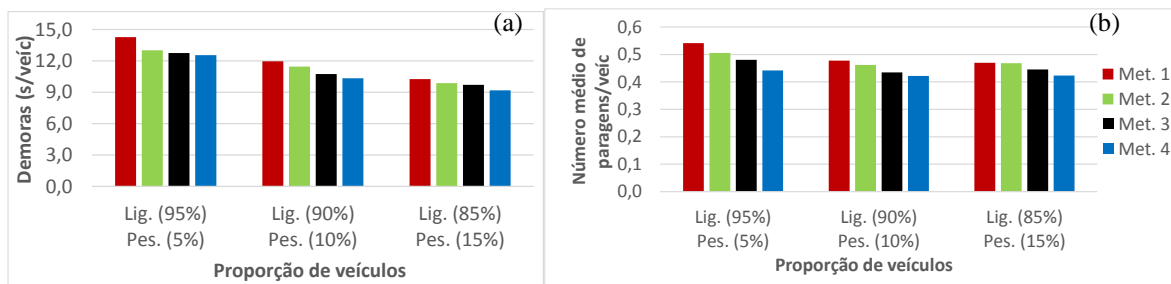


Fig. 5. Efeito da proporção do tipo de veículos (a) Demoras; (b) Número médio de paragens por veículo

A Fig. 5 mostra de forma evidente que quanto maior for a proporção de veículos ligeiros, maiores são as demoras e o número médio de paragens por veículo. Este resultado deve-se ao facto de que para manter constante o V/C, o aumento da percentagem de veículos ligeiros se traduz num aumento significativo do número de veículos na rede (ver Quadro 4), e por consequência no aumento dos indicadores de desempenho. Neste cenário o esquema de deteção associado ao uso de múltiplos detetores volta a demonstrar um melhor desempenho comparativamente aos esquemas propostos pela FHWA. Para uma proporção de veículos ligeiros de 85%, o esquema de deteção múltipla resultou na redução de cerca de 6,9% das demoras e de cerca de 9,6% no número médio de paragens por veículo comparativamente ao uso de um detetor de avanço isolado de 6ft. Para o mesmo caso, quando comparado com o uso de um detetor de avanço isolado com 20ft, o esquema de deteção múltipla atingiu uma redução de cerca de 5,3% nas demoras e de 5% no número médio de paragens por veículo.

4.2.3 Efeito da variação da proporção entre os volumes de tráfego nas entradas Principal e Secundária

Neste cenário procura-se avaliar o efeito associado à proporção do fluxo entre a estrada principal e a secundária para as gamas de variação apresentadas no Quadro 4. O rácio entre o volume e a capacidade foi mantido constante e igual a 0,8, assim como a proporção de veículos ligeiros e pesados (90% e 10%, respetivamente). Os resultados da simulação são apresentados na Fig. 6.

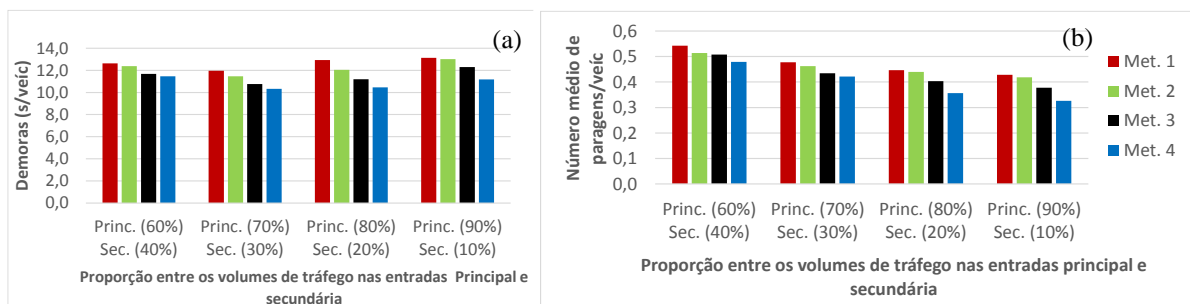


Fig. 6. Efeito da proporção do tráfego nas entradas Principal e Secundária (a) Demoras (b) Número médio de paragens por veículo

Neste cenário, o esquema de múltipla deteção também demonstrou atingir o melhor desempenho sendo os benefícios crescentes à medida que aumenta a proporção do tráfego na via principal. Para proporções de fluxo na

via principal de 90%, o esquema de múltipla detecção revelou-se capaz de reduzir as demoras em 14,1% e o número médio de paragens por veículo em 21,9% comparativamente ao uso do detetor de avanço de 6ft. Quando comparado com o uso do detetor de avanço de 20ft, a múltipla detecção resultou num abaixamento de 9,1% nas demoras e de 13,5% no número médio de paragens por veículo, o que comprova a vantagem de utilizar os detetores de 6ft a anteceder os detetores de 20ft. No entanto, quando a proporção do fluxo na via principal é de 60%, o esquema de múltipla detecção apenas se revelou capaz de reduzir as demoras em cerca de 1,76% do comparativamente ao uso do detetor de 20ft, provando assim a ser um esquema antieconómico.

5 CONCLUSÕES

Este artigo apresentou dois esquemas de detecção alternativos baseados na aplicação de detetores de avanço, com detecção por via individualizada, adaptados a estradas sujeitas a velocidades baixas. Na primeira alternativa, foi considerado um detetor de avanço alongado colocado a montante da barra de paragem e, na segunda alternativa, um esquema de múltiplos detetores de avanço, constituído por um detetor de 20ft (6m) e um de 6ft (1,83m) colocados a montante da barra de paragem. O desempenho dos esquemas de detecção propostos pelo FHWA e dos esquemas de detecção múltipla baseadas foram avaliados numa lógica de via individualizada. Foram testados diferentes cenários, procurando avaliar o efeito associado à variação da proporção do rácio V/C, da proporção entre veículos ligeiros e pesados, e à proporção do volume de tráfego entre a via principal e via secundária. Face a níveis elevados de procura de tráfego a múltipla detecção revelou-se claramente a mais eficiente, revelando-se capaz de reduzir as demoras e o número médio de paragens por veículo. O esquema de detecção múltipla usufruiu da vantagem de dispor de uma zona de detecção longa que lhe permite detetar mais veículos, o qual juntamente com o detetor de 6ft permite ativar a extensão do tempo de verde, evitando assim situações de fecho prematuro.

Face a baixos níveis de procura, a detecção múltipla também resultou em melhores níveis de desempenho comparativamente aos restantes esquemas. No entanto, os benefícios são modestos quando comparados com o detetor de avanço alongado proposto. Assim, sob condições de baixo volume, um detetor de avanço alongado tende a revelar-se economicamente mais atrativo comparativamente à múltipla detecção.

6 REFERÊNCIAS

1. FHWA (2008) Traffic Signal Timing Manual. Publication number: FHWA-HOP-08-024, U.S Department of Transportation, Washington DC, USA.
2. Sims, A. G., and K. W. Dobinson. (1980) The Sydney Coordinated Adaptive Traffic (SCAT) system philosophy and benefits. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, v.29, n. 2, p.130-137.
3. Hunt, P.B., R. D. Bretherton, D. I. Robertson, and M. C. Royal. (1982) SCOOT online traffic signal optimization technique. *Traffic Engineering and Control*, v. 23, p.190-192
4. DfT (1997) The "MOVA" signal control system. Traffic advisory leaflet 3/97, Department of Transport, UK.
5. Stevanovic, A. (2010) Adaptive Traffic Control Systems: Domestic and Foreign State of Practice – A Synthesis of Highway Practice. NCHRP Synthesis 403, USA.
6. Hulscher, F.R., (1976) Selection of Vehicle Detectors for Traffic Management. *Traffic Engineering and Control*.
7. James, B., S. Srinivasa, P. Michael. (2009) Traffic Signal Operations Handbook. Report No. FHWA/TX-09/0-5629-P1, Texas Department of Transportation, Texas, USA.
8. Lin, F.B. (1985) Optimal Timing Settings and Detector Lengths of Presence Mode Full-Actuated Control. *Transportation Research Record No. 1010*, Transportation Research Board, National Research Council, Washington, D.C., p. 37-45
9. Smaglik, E., D. Bullock and T. Urbanik. (2005) Evaluation of lane by lane vehicle detection for actuated controllers serving multi-lane approaches. *Transportation Research Record 1925*, p. 123–133.
10. Tian, Z. and T. Urbanik. (2006). Green extension and traffic detection schemes at signalized intersections, *Transportation Research Record 1978*, p. 16-24.