

SINAIS LUMINOSOS

TEXTOS DIDÁCTICOS

1ª EDIÇÃO

Américo Henrique Pires da Costa
Professor Associado da Faculdade de Engenharia
da Universidade do Porto

Álvaro Jorge da Maia Seco
Professor Associado da Faculdade de Ciências e Tecnologia
da Universidade de Coimbra

António Luís Pimentel Vasconcelos
Assistente da Escola Superior de Tecnologia
do Instituto Politécnico de Viseu

Dezembro de 2005

I INTRODUÇÃO

I.1 Enquadramento básico

A gestão de tráfego na rede viária assume uma importância especial nos cruzamentos, considerados os elementos críticos de toda a rede viária, quer sob o ponto de vista da segurança rodoviária, quer sob o ponto de vista das condições de escoamento, devido à multiplicidade e complexidade das interações entre todos os seus utilizadores.

À medida que os volumes de tráfego crescem, deixa de ser possível gerir o ordenamento e a disciplina do tráfego em cruzamentos através de medidas simples de carácter espacial, baseadas essencialmente no desenho geométrico, ou em medidas de optimização da regulação das prioridades relativas das diferentes correntes de tráfego. Por outro lado, a adopção de soluções desniveladas requer a mobilização de avultados investimentos financeiros e exigências de espaço que inviabilizam a sua vulgarização.

Deste modo o recurso à sinalização luminosa em cruzamentos de nível aparece como uma medida de gestão de tráfego cujo custo de instalação e manutenção é relativamente baixo e que apresenta níveis de eficácia elevados, não se limitando apenas a intervir na dimensão espacial considerada nas outras soluções, mas também na dimensão temporal ao promover o avanço dos utilizadores em períodos de tempo distintos e, portanto, racionalizando o uso do espaço do cruzamento. Deste modo consegue-se uma substancial redução dos pontos e situações de conflito resultantes da intersecção entre trajectórias das correntes de tráfego do cruzamento.

Os sinais luminosos em cruzamentos surgem pela primeira vez em Londres (Westminster), no ano de 1868, com um comando manual e com os semáforos a funcionarem a gás. Só mais tarde, em 1918 (Nova Iorque), é que aparecem pela primeira vez as lâmpadas de três cores e o comando automático surgirá apenas em 1926 (Wolverhampton, UK).

Daí para cá o avanço tecnológico, em particular das comunicações e da informática, permite dispor de sistemas cada vez mais desenvolvidos eventualmente associados a outros sistemas (estacionamento, transportes públicos, informação ao condutor, etc.), tendo em vista uma gestão integrada do tráfego.

Pondo de parte as primeiras soluções rudimentares de comando manual, considera-se que, inicialmente, apenas se dispunha de sinais luminosos de tempos fixos em que, independentemente das variações aleatórias e cíclicas que os fluxos de tráfego registam

ao longo do tempo, as informações transmitidas pelos sinais demoravam sempre o mesmo intervalo de tempo e repetiam-se ao fim de um certo período de tempo.

A temporização dos sinais é definida em função de valores característicos da solicitação, normalmente correspondentes ao período de maior procura, o que conduz a que nos outros períodos ocorra um funcionamento deficiente, resultando numa solução que, não gerando congestionamento, provoca demoras excessivas aos condutores (ver a Figura 1).

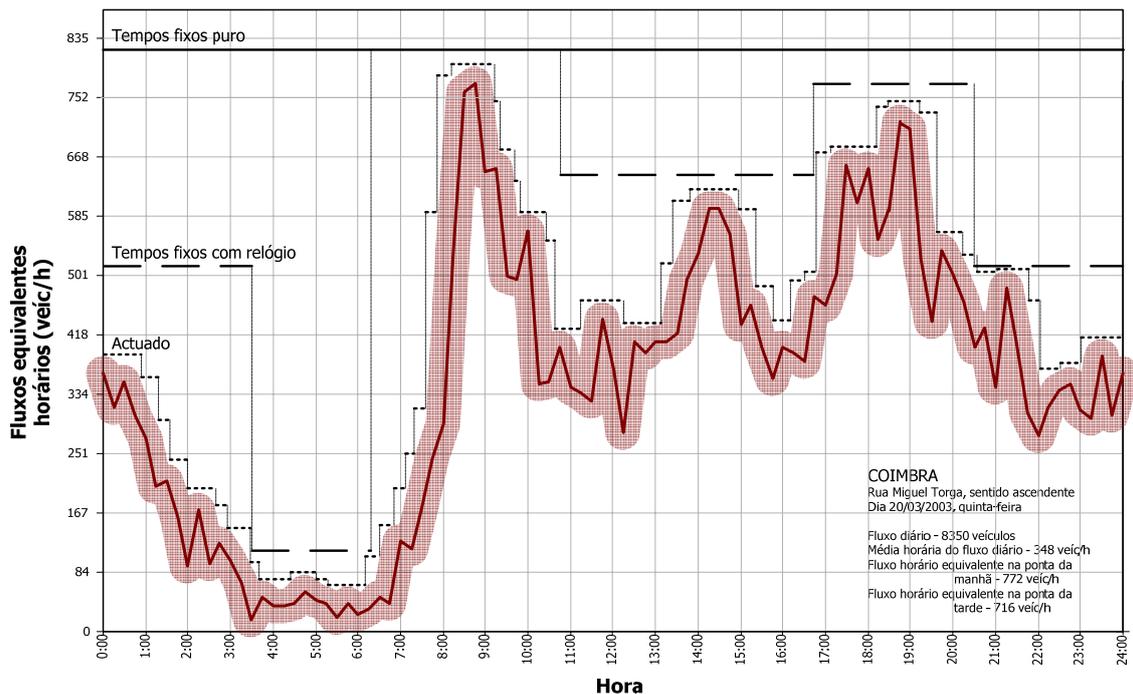


Figura 1 – Perfil temporal Capacidade/Procura vs. tipo de regulação

Neste facto reside a principal desvantagem deste tipo de sinalização luminosa, que pode, em parte, ser ultrapassada se for tida em conta a variação cíclica e previsível do tráfego, que se traduz na possibilidade de se encontrar períodos onde há alguma homogeneidade nos volumes de tráfego, tais como as pontas da manhã e da tarde, os períodos fora das horas de ponta, as horas nocturnas, os acontecimentos especiais, etc.

É, então, possível definir vários programas de regulação dos sinais luminosos especialmente concebidos para cada um dos períodos, de forma a responder satisfatoriamente à procura no período respectivo e que serão colocados em serviço de acordo com um horário previamente fixado, para o que basta incorporar uma carta-relógio no sistema (ver também a Figura 1).

Este último caso representa um significativo avanço no sentido da aproximação da regulação às exigências das condições reais da procura de tráfego, mas continua ainda com a dificuldade de atender às flutuações do tráfego imprevisíveis já que o comando

que regula a semaforização continua a não ter informação em tempo real, nem sobre as características da procura, nem sobre o desempenho do cruzamento.

Tal pode obrigar a que as diversas programações adoptadas tenham incorporada uma significativa margem de segurança nos níveis de capacidade oferecidos relativamente à procura prevista.

Por outro lado, devido ao esforço que lhe estaria associado, não é praticável a adopção de um número elevado de diferentes planos de regulação capazes de funcionar a um nível quase óptimo em todos os períodos de tempo onde, ao longo dos dias e semanas, se verificam níveis e padrões de procura significativamente diferentes.

Estes dois aspectos levam a que também este tipo de soluções tenda a gerar níveis de demora que, embora sejam significativamente melhores do que as do sistema totalmente fixo, são ainda claramente sub-óptimos.

Finalmente, este tipo de solução é também bastante vulnerável às variações sistemáticas da procura que tendem a verificar-se ao longo da vida útil da infra-estrutura, obrigando a um esforço significativo de ajuste periódico das suas características.

Este contínuo ajuste à realidade só é conseguido se houver uma permanente recolha de informação acerca da situação existente e uma resposta, em tempo real, à solicitação encontrada. É nestes princípios que se baseiam os sinais luminosos actuados pelo tráfego, onde os tempos destinados ao avanço dos diferentes movimentos serão constantemente adaptados, dentro de certos limites, aos volumes de tráfego existentes.

Para tal, além do comando que gera os tempos das luzes, há necessidade de dispor de sensores (de peões e/ou veículos) que transmitam a informação recolhida e de um modelo que analise essa informação e adopte as soluções mais aconselháveis em cada momento (ver ainda a Figura 1).

Tudo isto torna o sistema mais caro, não só no investimento inicial, mas também na sua manutenção, com a contrapartida evidente dum sistema mais eficaz. Em capítulo próprio mais adiante serão apresentados com mais desenvolvimento os sistemas actuados de sinalização luminosa.

A escolha entre os dois sistemas precedentes depende de numerosos factores que tornam difícil a apresentação dum conjunto de critérios que conduzisse à solução a adoptar. Como indicação genérica, pode referir-se que, em princípio, os sistemas de tempos fixos são preferíveis para volumes de tráfego ou muito baixos, ou muito elevados, que não registam significativas flutuações de tráfego.

Os cruzamentos podem, ainda, ser estudados isoladamente ou interligados de forma que o funcionamento de cada cruzamento tenha em conta o que se passa nos cruzamentos vizinhos e, assim, optimizando as condições de escoamento numa certa área.

Estão neste caso, por exemplo, os sistemas de controlo de tráfego urbano (UTC), onde a gestão dos cruzamentos é feita a nível central, tendo em conta um conjunto de

estratégias definidas antecipadamente para essa zona. Uma apresentação mais detalhada destes sistemas será também efectuada mais à frente.

I.2 Critérios de instalação de sinais luminosos

Não é fácil encontrar critérios que, numa forma simples, permitam saber em que condições se justifica a instalação de sinais luminosos em cruzamentos, principalmente porque assumem em muitos casos um peso determinante as especificidades locais e um nível elevado de subjectividade.

Por outro lado fazer apenas depender do julgamento da situação feito pelo técnico responsável e do seu bom senso, a decisão de colocação de sinais luminosos não permite uma justificação clara das opções que forem tomadas.

Sendo inquestionável o interesse da existência de critérios que facilitem a escolha da solução, é evidente que estes têm de estar intimamente relacionados com os objectivos que se pretendem atingir, quer ao nível da rede, no domínio da coerência sistémica, quer ao nível da operacionalidade intrínseca do cruzamento, nos domínios da segurança, da fluidez da circulação, dos custos de operação, da poluição etc.

Há uma grande variedade de indicadores que poderiam ser utilizados, mas convirá que o seu número seja reduzido, sem que se perca a representatividade dos objectivos e, por outro lado, estes deverão ser de obtenção fácil e simples. As variáveis geralmente utilizadas na definição dos critérios de instalação são geralmente associadas à segurança rodoviária e às condições de operação traduzidas pelo volume de veículos e peões.

No anexo 1 são apresentados os critérios definidos no Manual of Uniform Traffic Control Devices for Streets and Highways (MUCTD) e que devem ser encarados não tanto como regras rígidas para a implementação de sinais luminosos em cruzamentos, mas como princípios orientadores que podem facilitar a tomada de decisão a este respeito.

II CONCEITOS BÁSICOS PARA DIMENSIONAMENTO DE SINAIS LUMINOSOS

Neste capítulo serão apresentados os conceitos essenciais válidos qualquer que seja o tipo de sinalização luminosa adoptada para o controlo de cruzamentos. Por um lado há que conhecer com rigor a solicitação do cruzamento, constituída pela procura, não apenas relativa ao tráfego automóvel, mas também aos peões. Por outro lado é necessário saber como se processam as partidas dos veículos, que determinam a capacidade de escoamento do cruzamento. Estas não dependem apenas das características geométricas e das condições de circulação mas também da regulação dos sinais luminosos. É deste balanço que é estabelecido entre as chegadas e as partidas de veículos que depende o êxito da solução semafórica.

II.1 Movimentos direccionais vs correntes de tráfego

A procura no cruzamento é caracterizada por um conjunto de correntes de tráfego, onde se agrupam os veículos que apresentam movimentos direccionais que, pelas suas características, possam ser tratados de modo igual e para as quais é necessário dar resposta diferenciada através da regulação. O número de correntes de tráfego determina a dimensão do problema, pelo que será de interesse individualizar o menor número possível.

Em geral uma corrente de tráfego ocupa uma única via dum ramo de entrada, que pode ser exclusiva a um movimento ou partilhada por 2 ou mais movimentos (ver a figura 2).

Contudo, em certos casos pode compreender mais do que uma via adjacente, desde que os veículos recebam simultaneamente as mesmas indicações transmitidas pelo sinal luminoso e possam distribuir-se livremente por cada uma delas, escolhendo a que lhe proporciona um menor atraso.

Deste modo as filas crescem em simultâneo para que a demora esperada seja aproximadamente igual, o que geralmente implica que as filas tenham a mesma extensão.

O tráfego que circula em 2 vias adjacentes que admitem apenas um único movimento, por exemplo, o movimento em frente, constitui uma corrente de tráfego.

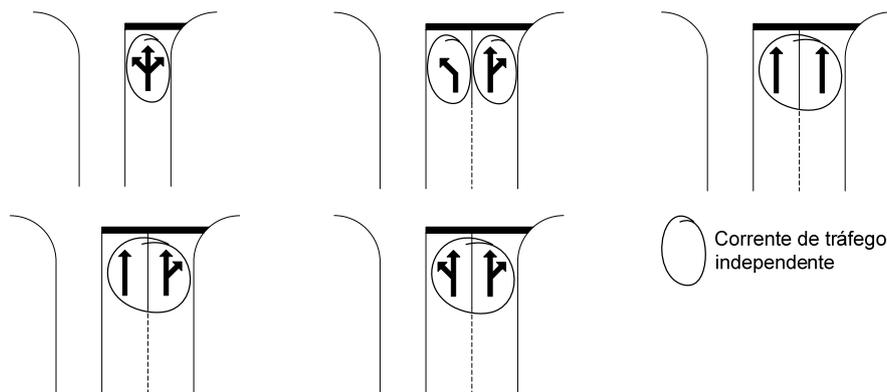


Figura 2 – Exemplos de correntes de tráfego

É possível ainda considerar-se uma única corrente de tráfego se nas vias adjacentes, apesar de terem afectação de tráfego diferente, o comportamento dos condutores é semelhante, como acontece, por exemplo, em que uma delas é exclusiva para os movimentos em frente e a outra é partilhada por movimentos em frente e de viragem à direita, constituindo estes uma percentagem pequena (não superior a 10%) do volume total nessa via.

Sempre que duas ou mais correntes de tráfego recebam simultaneamente a mesma indicação transmitida pelos sinais luminosos é habitual designar-se por grupo semafórico ao seu conjunto, assumindo-se nesse caso que a porta de I/O do controlador que regula os sinais luminosos dessas correntes de tráfego será a mesma.

II.2 Afectação do tráfego às vias dos ramos de entrada

A afectação dos movimentos às vias de tráfego que permitirá efectuar a marcação horizontal rege-se por princípios que tem em conta, por um lado as características geométricas nomeadamente a necessidade de garantir uniformidade no espaço destinada a cada movimento ao longo do trajecto e, por outro lado, às condições do tráfego principalmente no que diz respeito aos volumes envolvidos. Assim, devem ser evitadas soluções onde haja variação, em particular redução, do número de vias destinadas a um movimento entre a entrada e a saída do cruzamento.

Em relação ao tráfego, este deve ser repartido, tanto quanto possível, igualmente pelas vias disponíveis. Assim, designando por q_v o débito médio por via que resulta da divisão do débito total no ramo de entrada pelo número de vias, deverão ser criadas tantas vias quantas vezes o débito relativo a esse movimento for maior do que q_v , com uma margem fixada entre 10 e 20 %.

Seja, por exemplo, o movimento de viragens à esquerda com débito q_e . Se for fixada aquela margem em 20% podem-se identificar as seguintes tipologias de solução diferentes:

$q_e/q_v < 0,80$	uma via partilhada pelos movimentos de ida em frente e esquerda
$0,80 < q_e/q_v < 1,20$	uma via exclusiva para o movimento de viragem à esquerda
$1,20 < q_e/q_v < 1,80$	uma via exclusiva para o movimento de viragem à esquerda + uma via partilhada pelos movimentos de ida em frente e esquerda
$1,80 < q_e/q_v < 2,20$	duas vias exclusivas para o movimento de viragem à esquerda

O procedimento descrito deve ser encarado como uma tentativa simplista de afectar as vias aos volumes de tráfego, só aplicável no caso dos movimentos serem sem oposição. Estudos mais elaborados requerem a adopção de metodologias mais rigorosas que tenham em conta não apenas os volumes de tráfego, mas também os débitos de saturação associados às vias disponíveis.

II.3 Configuração dos sinais luminosos

Na sinalização luminosa o semáforo desempenha um papel fundamental transmitindo as indicações aos condutores e peões que determinam a permissão ou proibição de avançarem, através de uma sequência de cores convencional constituída, no caso dos condutores, pelo verde, amarelo e vermelho, a que correspondem os significados seguintes:

- Luz vermelha – Passagem proibida, pelo que obriga os condutores a pararem
- Luz amarela fixa – Passagem proibida a não ser que os condutores ao se encontrem tão perto da linha de paragem já o não possam fazer em condições de segurança
- Luz verde – Passagem permitida aos condutores
- Luz amarela intermitente – passagem permitida, desde que se faça com precaução e com respeito pelas regras da prioridade

As luzes são circulares e são colocadas na parte superior de colunas verticais ou nas extremidades de báculos, podendo, embora mais raramente, serem suspensas por cabos (ver a Figura 3).

Geralmente apresentam-se verticalmente pela ordem, de baixo para cima, verde, amarelo e vermelho, e, quando as condições locais o justificam, podem dispor-se na

horizontal pela ordem, da esquerda para a direita, vermelho, amarelo e verde. Neste último caso deverá ser deixada uma altura livre de qualquer obstáculo com cerca de cinco metros.



Figura 3 – Fotografias de colunas, báculo e suspensão por cabos

Podem existir setas verticais que reforçam a indicação de permissão ou proibição de seguir em frente e podem ter o seguinte aspecto: seta verde em fundo negro e seta negra em fundo vermelho ou amarelo. A seta verde em fundo preto é também usada como luz suplementar (passando o sinal a ter quatro luzes circulares) para a permissão da realização do movimento de viragem que lhe está associado. Sempre que se pretende assinalar a possibilidade de avanço com prudência deve usar-se uma luz amarela intermitente ou seta negra em fundo amarelo.

Em Portugal os sinais são colocados na entrada do cruzamento, antes de se atingir a zona regulada pelo sinal. Em alguns países existe uma duplicação do sinal junto às saídas a que vulgarmente se designa por sinais secundários. Em geral existe um écran que impede (ou reduz) o encadeamento pelo sol dos sinais luminosos pelos condutores.

No caso dos peões o sistema é composto por duas luzes, com as cores de verde e vermelha, indicando, respectivamente a possibilidade de poderem ou não avançarem.

Nos sistemas mais modernos existe quase sempre o verde intermitente para dar a informação aos peões que está iminente a passagem para luz vermelha. Este sistema de luzes deve estar acompanhado por um sinal sonoro em simultâneo com a luz verde para apoio no atravessamento de invisuais.

A regulação dos sinais luminosos estabelece a duração em que cada uma das cores estará visível.

II.4 O plano de regulação: ciclo, fases e períodos de transição

II.4.1 Fase e ciclo

Uma fase representa uma fracção de tempo durante a qual uma ou várias correntes de tráfego têm direito de avançar, estando as outras impedidas de o fazer.

O seu início é determinado quando há pelo menos uma corrente de tráfego a ganhar permissão de avançar (sinal verde) e termina sempre que pelo menos uma corrente de tráfego perde esse direito (início do amarelo ou verde intermitente).

Na passagem de uma fase para outra ocorre um período de tempo de transição destinado a alertar os condutores para a mudança que vai ocorrer.

A sequência de fases proporcionando a todas as correntes de tráfego o direito de avançar completa um ciclo que é medido entre instantes homólogos, isto é, vai desde um determinado instante até ao instante onde se retoma a indicação inicial.

A título de exemplo nas figuras 4, 5 e 6 apresentam-se duas representações simbólicas de um plano de regulação relativo ao cruzamento também apresentado, com duas fases principais, cada uma subdivida em duas subfases, e a sequência de cores recebida por cada uma das correntes de tráfego.

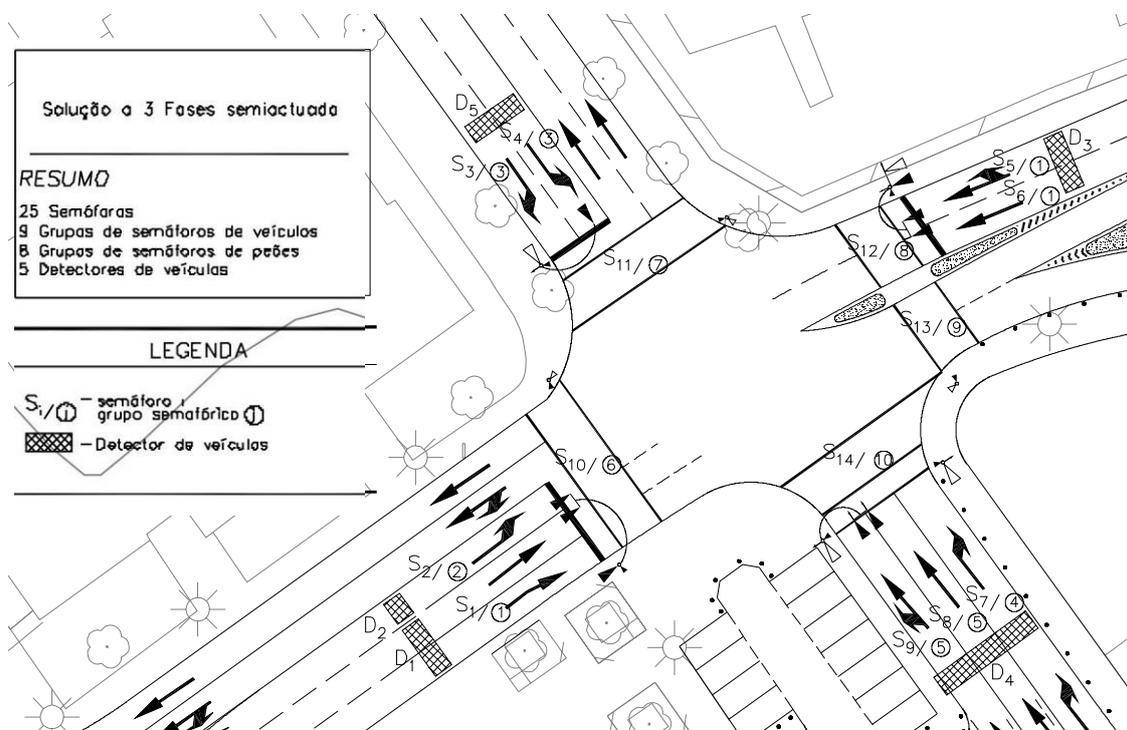


Figura 4 – Configuração de cruzamento de sinais luminosos

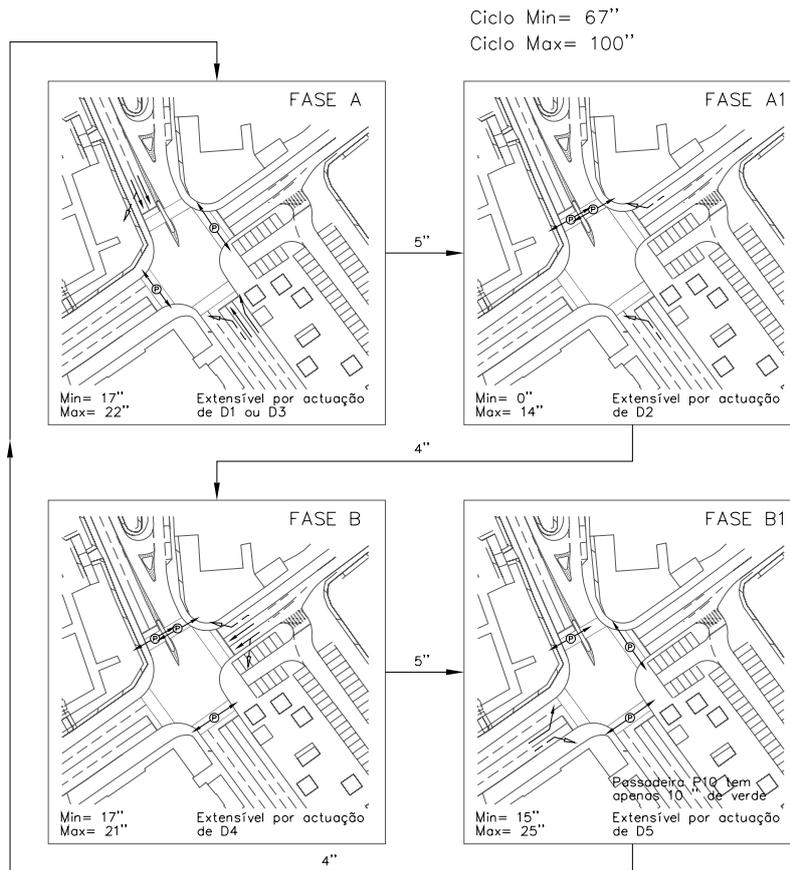


Figura 5 – Fluxograma do plano de regulação do cruzamento

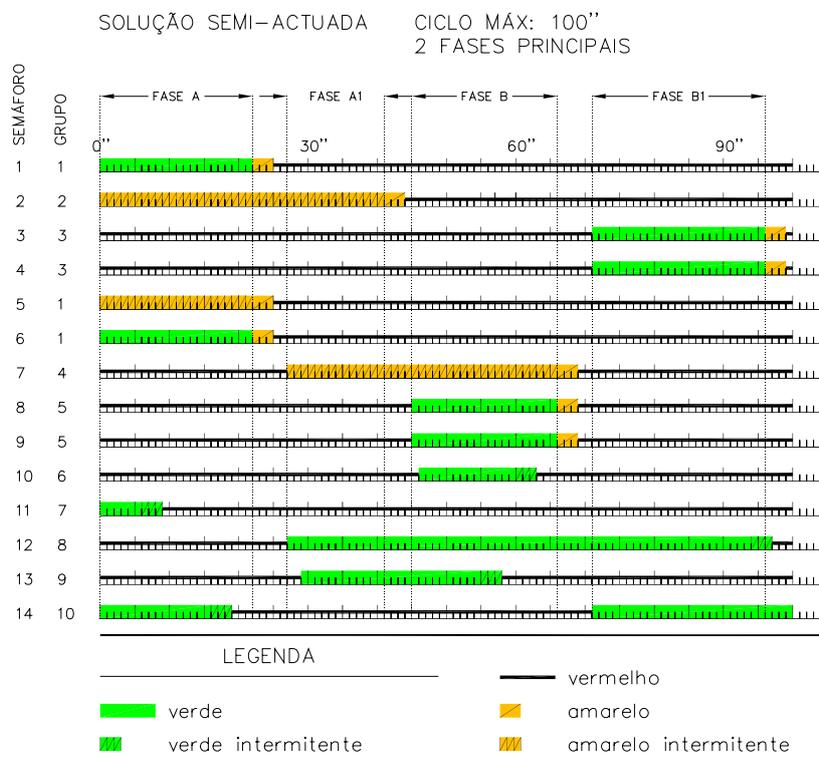


Figura 6 – Diagrama de fases do plano de regulação do cruzamento

II.4.2 Transição entre fases

Após o fim de uma fase e antes do início da fase seguinte, isto é, a separar o fim de um tempo de verde do início do verde seguinte terá de ocorrer um intervalo de tempo de transição imposto por razões de segurança tendo em conta as mudanças de funcionamento do cruzamento que se vão operar. Este período de transição é constituído pelos tempos de amarelo e de vermelho integral cujas características essenciais são descritas nos pontos seguintes.

II.4.2.1 Tempo de amarelo

O tempo de amarelo serve para avisar os condutores que está próxima a mudança para o sinal vermelho, permitindo uma gradual adaptação à nova situação que obriga à paragem dos condutores, já que esta não se pode fazer instantaneamente. A duração do tempo de amarelo deve ser tal que um veículo possa percorrer nesse tempo a distância que o separa da linha de paragem, se não for possível imobilizá-lo em condições de segurança. A situação limite ocorre quando um veículo no instante final do tempo de verde se encontra a uma distância da linha de paragem ligeiramente inferior à distância de paragem e , portanto, a duração do tempo de amarelo deve ser suficiente para que, uma vez tomada a decisão de avançar, o possa fazer sem cair o tempo de vermelho durante o percurso.

Acontece que a decisão do condutor tem características contínuas e probabilísticas e não como seria uma situação idealmente mais favorável em que a decisão seria discreta e determinística. Isto é, para as mesmas condições os condutores não tomam sempre a mesma decisão, como aconteceria numa situação ideal como a representada na Figura 7.

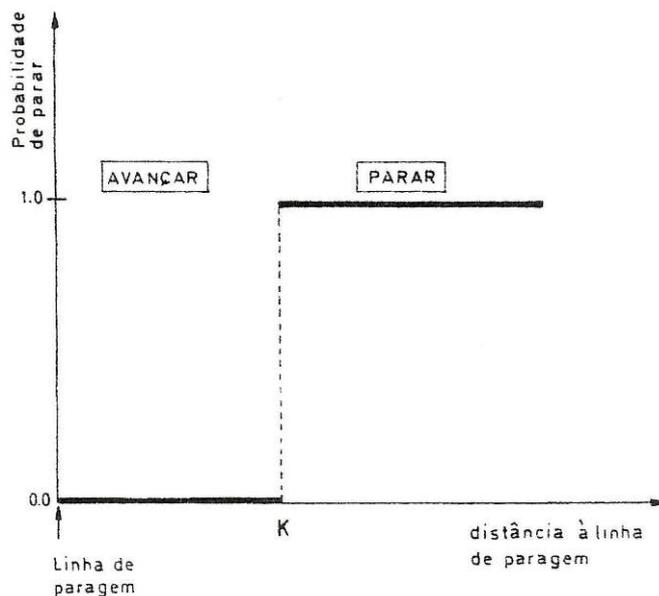


Figura 7 – Probabilidade de parar em função da distância numa situação ideal

Nesta situação ideal se os condutores no momento de aparecer a luz amarelo estivessem a uma distância da linha de paragem inferior à distância de paragem a decisão seria de avançar e, caso contrário, todos os condutores avançariam desde que colocados para lá da distância de paragem no momento do aparecimento da luz amarela.

O valor da distância de paragem pode ser calculado a partir da seguinte expressão obtida considerando valores correntes para o tempo de reacção ($T_r = 1$ s) e desaceleração média na fase de travagem ($a = 3$ m/s²)

$$d_p = t_r v + \frac{v^2}{2a} \quad (1)$$

A situação real é, contudo, distinta, como se mostra na Figura 8, onde é possível observar para uma dada distância à linha de paragem a probabilidade dos condutores tomarem a decisão de paragem, definindo-se, ainda, a zona de incerteza por uma região onde a probabilidade associada a cada uma das respostas é de 10%.

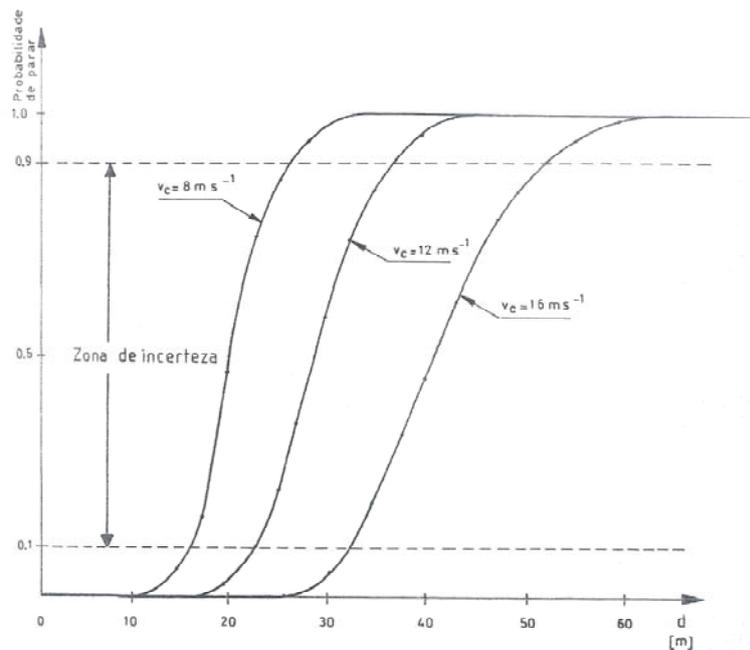


Figura 8 – Probabilidade real de parar em função da velocidade e distância à linha de paragem

Se, num sistema de eixos onde nas ordenadas é marcada a distância percorrida e nas abcissas a velocidade de aproximação do veículo, for representada a curva que relaciona a distância de paragem com a velocidade (usando a relação acima apresentada) e a recta correspondente à distância percorrida a uma dada velocidade durante os três segundos de tempo de amarelo, consegue-se distinguir quatro zonas de decisão no instante do aparecimento do amarelo, com as seguintes características (ver a Figura 9).

- i. Zona de Passagem, compreendida entre o eixo das abcissas e linha mais próxima do eixo, onde a decisão do condutor só poderá ser uma que é a de avançar, pois

encontra-se a uma distância inferior à distância de paragem e passará durante o tempo de amarelo;

- ii. Zona de Opção, compreendida entre as duas linhas, onde os condutores têm espaço para parar mas em que, se decidirem avançar, fá-lo-ão durante o amarelo. Trata-se de uma situação com algum potencial de perigosidade dada a incerteza da opção a tomar pelos condutores, que tenderá a provocar acidentes frente-traseira, mas que é inevitável;
- iii. Zona de Paragem, compreendida entre o eixo das ordenadas e a linha que lhe ficar mais próxima, onde a decisão do condutor será a da paragem, pois tendo espaço para o fazer, uma decisão contrária implicará a passagem com o vermelho.
- iv. Zona de Dilema, compreendida na parte superior entre as duas linhas, correspondente à situação mais perigosa e a eliminar, em que o condutor não tem espaço para parar, mas se avançar passará com o sinal vermelho. Esta situação ocorre porque se fixou o tempo de amarelo em três segundos, podendo ser eliminada através do aumento do tempo de amarelo conforme está indicado na figura.

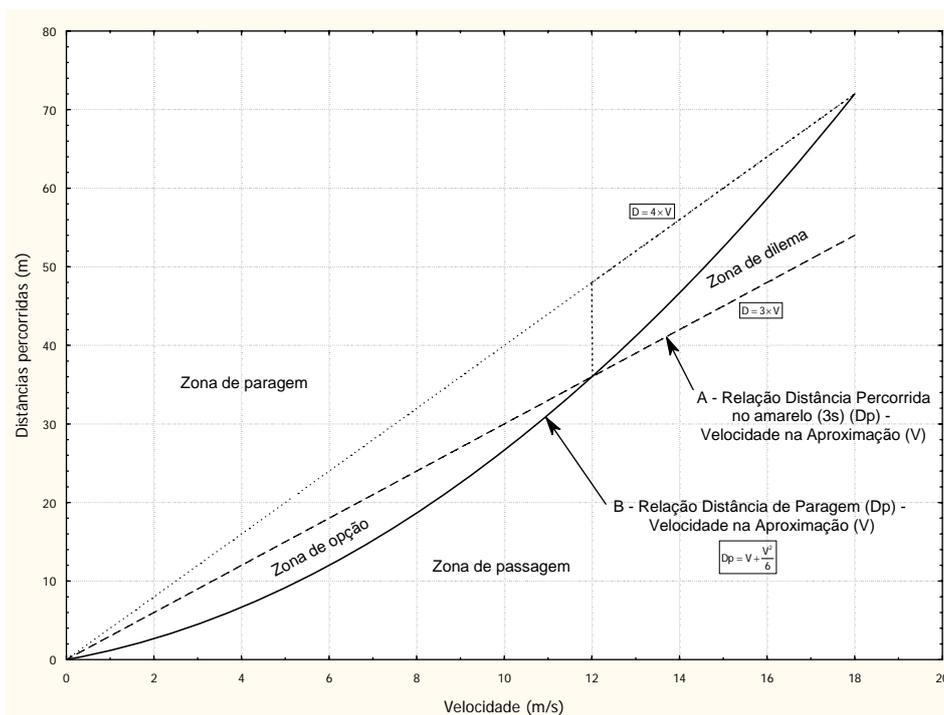


Figura 9 – Zonas de decisão dos condutores em função do tempo de amarelo e da velocidade de aproximação

Em geral, para velocidades correntes é suficiente uma duração de amarelo igual a 3 segundos, com a vantagem de que, utilizando o mesmo valor em todos os cruzamentos,

se facilita a avaliação da situação pelo condutor antes da tomada de decisão. Porém, este valor começa a ser manifestamente insuficiente para velocidades médias da ordem dos 50 km/h para as quais o valor a adoptar deve ser de quatro segundos, que pode mesmo atingir os cinco segundos em situações excepcionais com velocidades médias acima dos 60 km/h.

II.4.2.2 Tempos de limpeza

Os veículos ou peões que estão inseridos numa determinada corrente de tráfego e foram autorizados a avançar numa determinada fase não podem entrar em conflito com outros movimentos que recebam direito de avançar na fase seguinte e relativamente aos quais seja considerado haver um grau de incompatibilidade tal que impede que possam ser servidos simultaneamente.

Note-se que a noção de grau de incompatibilidade está ligada ao grau de perigosidade dos conflitos eventualmente resultantes do cruzamento, ou parcial sobreposição, das trajectórias das correntes de tráfego em análise. Esta questão será mais detalhadamente analisada no Capítulo III.

Assim, para cada par de correntes de tráfego incompatíveis servidas em fases sucessivas, há necessidade de prever um tempo de limpeza que permita que todos os veículos da corrente de tráfego que está a perder o direito de passagem possam ultrapassar todos os pontos onde há conflito de trajectórias com a corrente de tráfego que se está a iniciar antes que os veículos/peões desta lá cheguem (em termos simplistas uma corrente de tráfego abandona o cruzamento antes de a outra lá entrar).

Estes tempos de limpeza iniciam-se imediatamente a seguir ao último instante em que a primeira corrente de tráfego a ser servida pode avançar, o que no caso dos veículos coincide com o instante final do tempo de amarelo e no caso dos peões coincide com o fim do tempo de verde fixo, e terminam com o início do verde (ou amarelo intermitente) da outra corrente de tráfego.

A metodologia a seguir no seu cálculo consta dos seguintes passos:

- a) Procurar o ponto de conflito crítico (local onde há o maior risco de acidente). Trata-se do ponto de confluência do maior trajecto dos movimentos que têm o seu verde a terminar com o menor trajecto (em tempo) daqueles que estão a iniciar o movimento (ver as figuras 10 e 11).
- b) Cálculo do tempo mínimo de limpeza entre as correntes de tráfego através da seguinte expressão:

$$tl_{(T,I)} = \left(\frac{d_T + d_v}{v_T} - \frac{d_I}{v_I} \right) \quad (2)$$

sendo:

- d_T – distância entre a barra de paragem do movimento que termina e o ponto crítico
- d_I – distância entre a barra de paragem do movimento que inicia e o ponto crítico
- v_T – velocidade do veículo / peão que inicia o movimento
- v_I – velocidade do veículo / peão que termina o movimento
- dv – comprimento típico dos veículos (para o peão usa-se $d_v = 0$).

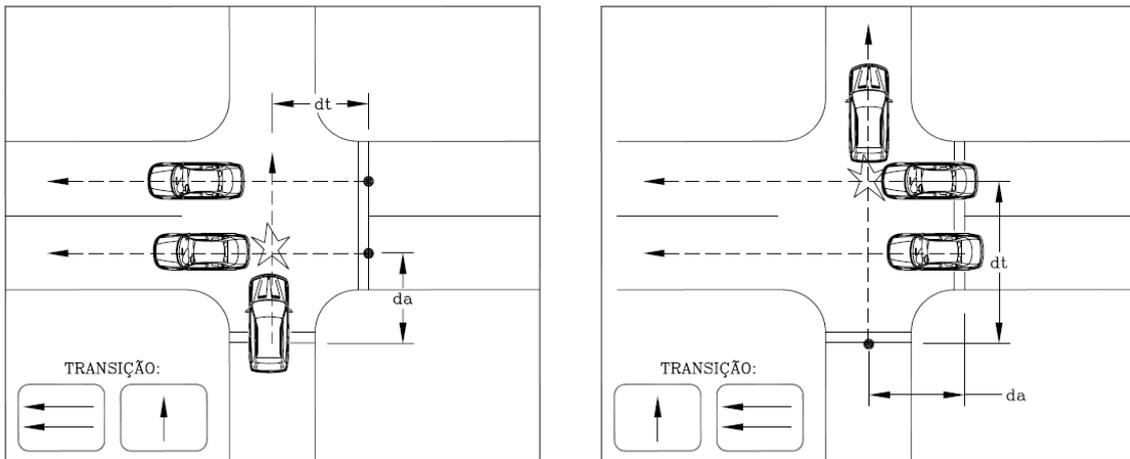


Figura 10 – Pontos críticos de conflito veículos – veículos

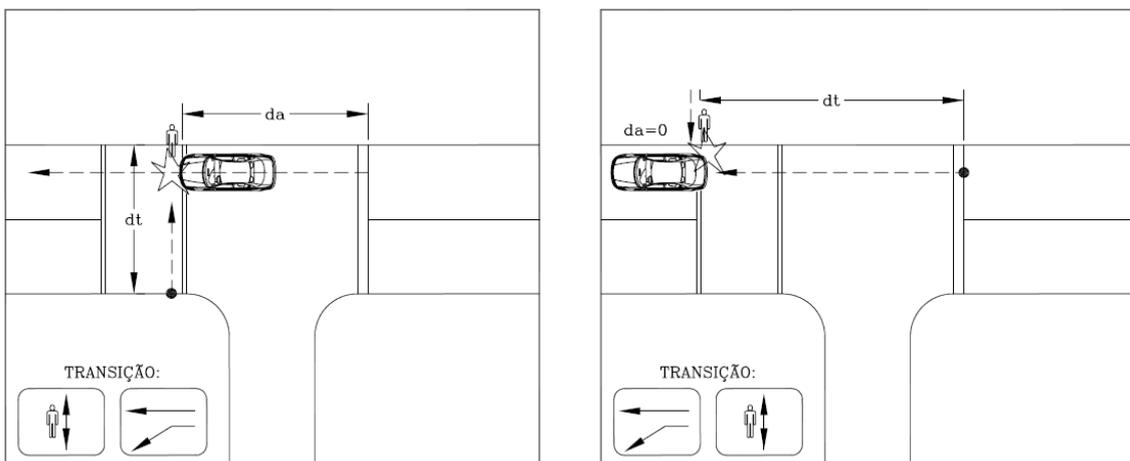


Figura 11 – Pontos críticos de conflito veículos – peões

Em meio urbano, com limitação de velocidades a 50 km/h, é comum a adoção da seguinte combinação de parâmetros, que naturalmente poderá ser modificada após avaliação no local.

- Veículos: $v_T = v_I = 10 \text{ m/s}$, $d_v = 5 \text{ m}$ (eventualmente 12 m , dependendo da proporção de veículos pesados nas correntes de tráfego). Note-se que no caso de (v_T) se assume um arranque instantâneo e imediatamente com velocidade de cruzeiro o que está significativamente do lado da segurança.
- Peões: $v_T = v_I = 1,2 \text{ m/s}$.¹

Se ambas as correntes de tráfego são automóveis, o tempo de limpeza coincide com o tempo de vermelho dado simultaneamente a ambas (tempo de vermelho integral).

No caso de a corrente de tráfego que termina ser de peões então o tempo de limpeza será composto de um período de verde intermitente com uma duração de 3 ou 5 segundos, dependendo se se trata de um atravessamento pedonal sem ou com oposição respectivamente, e um tempo de vermelho correspondente ao período remanescente do tempo de limpeza.

Em qualquer dos casos, para evitar perplexidades dos utentes, assume-se sempre um tempo de vermelho integral mínimo de um segundo, mesmo que tal não se justifique por razões de segurança. É também habitual proceder ao arredondamento por excesso do tempo de vermelho.

O maior dos diferentes tempos de limpeza entre correntes de tráfego incompatíveis servidas em fases sucessivas corresponderá ao “período de limpeza entre fases”, que apresenta habitualmente valores entre dois e quatro segundos quando todas as correntes de tráfego são motorizadas, e valores um pouco superiores quando algumas das correntes de tráfego que terminam são pedonais.

Em planos de regulação simples, durante cada período de limpeza entre fases, ocorre normalmente um período de alguns segundos durante o qual todas as correntes de tráfego servidas na fase que termina e na que se inicia recebem sinal vermelho. Nestes casos designa-se esse período por “período de vermelho integral entre as fases”.

Note-se, no entanto, que este período só existirá se não existir nenhuma corrente de tráfego, motorizado ou pedonal, que seja servida em ambas as fases, situação esta muito comum nos planos mais elaborados.

Em anexo apresenta-se um exemplo detalhado de cálculo dos tempos de limpeza.

¹ O Decreto-Lei nº 123/97 de 22 de Maio no Capítulo 1 – 2.1.4 do Anexo I – Normas Técnicas para Melhoria da Acessibilidade dos Cidadãos com Mobilidade Condicionada..., impõe que “o sinal verde para os peões nos semáforos deve estar aberto o tempo suficiente para permitir a travessia com segurança a uma velocidade de $2\text{m}/5\text{s}$ ”. Esta exigência é conceptualmente errada, já que associa à duração do verde a função de garantir segurança na travessia quando esta, pelo contrário, deve ser antes garantida pelo tempo de limpeza. Note-se por outro lado que caso fosse a intenção do legislador que esta velocidade fosse de facto aplicada ao tempo de limpeza tal implicaria períodos extremamente longos que em muitos casos gerariam condições globais de funcionamento dos cruzamentos extremamente penalizantes para o conjunto dos utentes dos mesmos. Um compromisso possível será o de utilizar este valor da velocidade para calcular um tempo especial de limpeza cujo início coincidiria com o início do verde dos peões e o seu fim coincidiria com o início do verde dos veículos conflituantes na fase seguinte. À frente serão explicados em maior detalhe os critérios adequados ao dimensionamento do tempo de verde para peões.

II.5 Caracterização das correntes de tráfego

Os sinais luminosos destinam-se a fornecer indicações ao tráfego que pretende atravessar o cruzamento, pelo que a sua caracterização cuidada é fundamental e dela dependerá o êxito da solução. Há, assim, que conhecer não só a procura, isto é, os volumes de tráfego que chegam ao cruzamento e que constitui a solicitação, mas também o modo como se processam as partidas durante o tempo que lhes é permitido fazer.

II.5.1 Procura

O volume/débito dos veículos referente a cada uma das correntes de tráfego que chegam ao cruzamento no período para o qual se pretende definir o plano de regulação é obtido, preferencialmente, por contagens locais. O valor usado corresponde à ponta máxima de quinze minutos, pelo que para a sua identificação é necessário dispor de um período de contagem que necessariamente o inclua, o que obriga a efectuar a recolha de dados durante um mínimo de 1,5 horas, preferencialmente duas horas, podendo os registos ser agregados em intervalos de cinco minutos ou, mais habitualmente, em intervalos de quinze minutos. As contagens que devem ser classificadas de modo a obter-se a composição do tráfego, terão de ser corrigidas pela evolução da fila de espera verificada nos extremos inicial e final de cada período de registo, a fim de ser tido em conta a distinção entre o volume que é contado e o número de veículos (procura) que efectivamente pretende passar, cuja determinação é a pretendida.

II.5.2 Partidas dos veículos

Em relação à partida dos veículos, o que só pode acontecer durante o tempo de verde e amarelo, é geralmente aceite que o ritmo de partidas mantém-se praticamente constante, excluindo os períodos inicial e final, conforme se mostra na Figura 12, onde se apresenta o fluxo de partidas de uma corrente de tráfego admitindo que existem permanentemente veículos para avançarem, isto é o tempo de verde está saturado.

No início do tempo de verde o ritmo de partidas é lento, pois os veículos perdem algum tempo na fase de arranque. À medida que o tempo de verde avança o intervalo de tempo entre veículos sucessivos é cada vez menor até estabilizar num valor mínimo, o que acontece com a passagem do quarto / quinto veículo. A este fluxo máximo da passagem de veículos designa-se por débito de saturação (s), sendo um parâmetro fundamental, como a seguir se verá, no dimensionamento do plano de regulação. Com o aparecimento do amarelo o fluxo de partidas vai diminuindo até se anular.

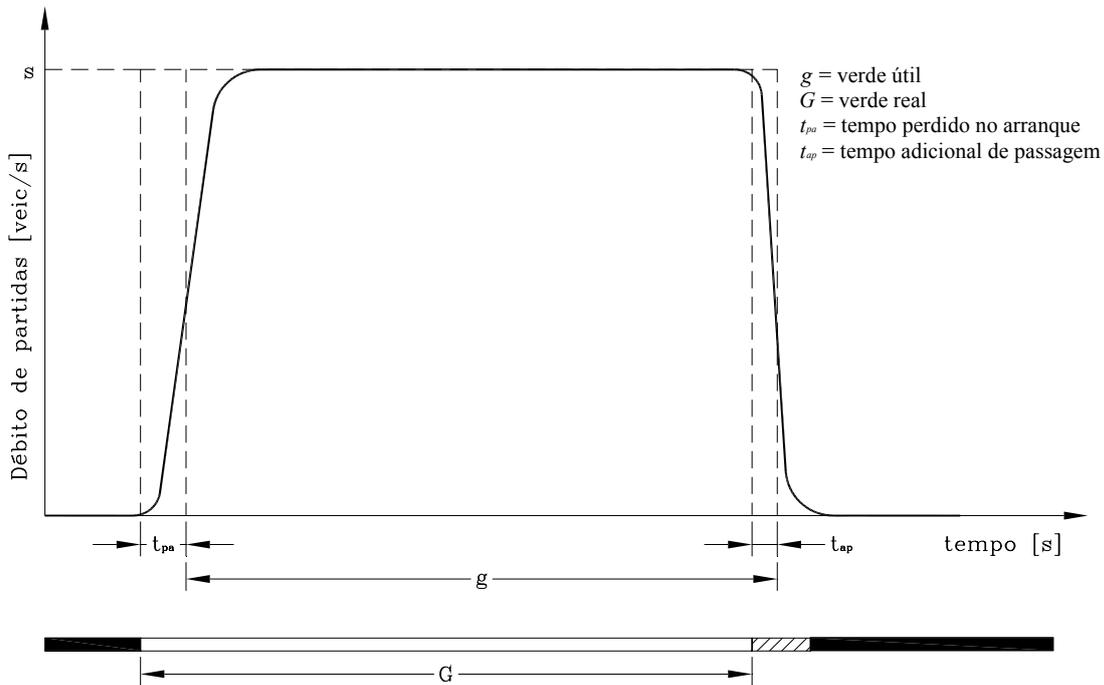


Figura 12 – Padrões reais e conceptuais de partidas de veículos

O rectângulo que se representa na Figura 12 tem uma área igual à da figura limitada pela linha que representa a variação do débito de saturação, sendo a sua altura correspondente ao débito de saturação e o comprimento da base define o tempo de verde útil (g).

Assim, o número máximo de veículos que podem partir durante um ciclo dado pela área acima referida é igual ao produto ($g s$).

O tempo perdido no arranque (t_{pa}) é o tempo compreendido entre os instantes iniciais do verde real e do verde útil. Ao tempo entre os instantes finais do verde real e do verde útil dá-se o nome de tempo adicional de passagem (t_{ap}).

Deste modo o débito de saturação está relacionado com a capacidade do ramo de entrada sendo, por conseguinte um parâmetro fundamental no estudo de cruzamentos regulados por sinais luminosos.

O débito de saturação depende das condições operacionais em que se processam as partidas e, em particular, das características geométricas da entrada. Em geral o débito de saturação é obtido por via, pelo que no caso de existir uma corrente de tráfego a usar mais do que um via, o respectivo débito de saturação é dado pela soma dos débitos de saturação correspondentes a cada uma das vias.

O seu valor deve ser obtido preferencialmente por medições locais, o que nem sempre é possível fazê-lo, pois tal exige que a entrada esteja a funcionar com regulação por sinais luminosos. O recurso a modelos de estimação é a única forma de ultrapassar esta dificuldade.

II.5.3 Medição do débito de saturação

Existem vários métodos para a medição no terreno do débito de saturação. Entre eles, o método proposto em II.5.4, que designaremos por método australiano, é de aplicação simples e apresenta a vantagem de, com um ligeiro esforço adicional, permitir a obtenção de outros parâmetros relevantes na modelação dum cruzamento regulado por sinais luminosos.

Para aplicar o método australiano contam-se, em cada ciclo, os veículos que partindo da situação de parados em fila, atravessam a linha de paragem nos seguintes três períodos de tempo:

- i. Período inicial constituído pelos primeiros dez segundos de verde;
- ii. Período intermédio que decorre após o período inicial e termina no fim do tempo de verde saturado, isto é, no instante de passagem do último veículo que foi obrigado a parar ou no fim do verde real, dependendo do que acontecer primeiro.
- iii. Período final que corresponde ao tempo para além do final do verde, contado desde o início do tempo de amarelo até à passagem do último veículo do ciclo em estudo, que esteve presente na fila de espera.

Para além da contagem dos veículos nos três períodos referidos, deve também ser medido o tempo de verde saturado, bem como a duração do verde real. Estes dois valores serão iguais sempre que a fila de espera permanece para além do fim do tempo de verde. O número de veículos que passam durante o tempo de verde saturado corresponde à soma dos veículos que chegaram durante o tempo de vermelho com os que entretanto foram chegando durante o tempo de verde, mas estão impedidos de avançarem porque à sua frente a fila de espera ainda não se dissipou.

Relativamente às contagens efectuadas podem ocorrer as seguintes situações:

- i. Registo nos três períodos o que significa ter um tempo de verde integralmente saturado;
- ii. Registo nos dois primeiros períodos o que corresponde a um tempo de verde saturado inferior à duração do verde;
- iii. Registo apenas no período inicial, pelo que o tempo de verde saturado é inferior a dez segundos. Tendo em conta que o período inicial é fixado para, com alguma folga, atender às perturbações devidas ao arranque dos veículos, admite-se que nestas condições não se chega a atingir o débito de saturação, pelo que estas contagens serão eliminadas.

O procedimento descrito deve ser repetido cerca de 30 ciclos válidos, a fim de se obterem valores fiáveis.

Na Tabela 1 mostra-se um exemplo de registo das contagens feitas numa via de um ramo de entrada dum cruzamento regulado por sinais luminosos.

Tabela 1 – Medição do débito de saturação

Nº ciclo	Período inicial (veíc.)	Período intermédio (veíc.)	Período final (veíc.)	Tempo de saturação (s)	Tempo de verde (s)
1	3	12	1	35	35
2	3	6	-	24	30
3	3	23	1	52	52
4	2	-	-	-	12
5	4	10	-	34	42
6	3	16	-	43	49
7	3	8	-	28	37
...
Total	X1	X2	X3	X4	X5
Amostra	N1	N2	N3	N4	N5

O débito de saturação (s), bem como o tempo perdido no arranque (t_{pa}) e o tempo adicional de passagem (t_{ap}) podem ser calculados a partir das seguintes expressões:

$$s = \frac{X_2}{X_4 - 10N_4} \quad (2)$$

$$t_{pa} = 10 - \frac{X_1}{s N_1} \quad (3)$$

$$t_{ap} = \frac{X_3}{s N_3} \quad (4)$$

em que,

X_1 - número total de veículos contados no período inicial

X_2 - número total de veículos contados no período intermédio

X_3 - número total de veículos contados no período final

X_4 - tempo total de verde saturado

N_1, N_4 - número de ciclos válidos (c/ tempo de saturação superior a 10 s)

N_3 - número total de períodos finais observados

Sendo sempre preferível medir localmente o débito de saturação, há algumas condições que terão de se verificar para garantir que os valores encontrados são credíveis. Para além da necessidade do cruzamento em estudo dispor de sinalização luminosa, já referida anteriormente, este método de medição exige que sejam encontrados valores

representativos em cada um dos períodos, particularmente nos dois primeiros, o que obriga a alguns cuidados na escolha do período de observação.

II.5.4 Estimação do débito de saturação

Os modelos de estimação do débito de saturação devem reproduzir tanto quanto possível fielmente as partidas dos veículos, sendo estas dependentes de um vasto conjunto de características geométricas e condições de circulação que torna impossível incluírem no modelo. É, assim, necessário seleccionar os factores mais importantes que afectam as partidas dos veículos, para os quais se conheça com suficiente rigor a respectiva influência.

Na bibliografia especializada estão descritos vários modelos de estimação do débito de saturação, tendo-se optado por apresentar um que resulta da combinação de várias propostas.

A estimação do débito de saturação é feita isoladamente para cada via, pelo que no caso da corrente de tráfego ocupar mais do que uma via, o débito de saturação respectivo resulta da soma dos débitos de saturação das vias que lhe estão afectas.

Neste modelo adopta-se a formulação clássica de considerar um valor para o débito de saturação que corresponda ao valor expectável para determinadas condições geométricas e de circulação que, a não serem garantidas, será necessário corrigir com recurso a factores de ajustamento.

Por outro lado considera-se que as correntes de tráfego, para este efeito, podem ser agrupadas em correntes de tráfego sem oposição e correntes de tráfego com oposição, conforme os veículos não tenham ou tenham de dar prioridade a veículos de outras correntes de tráfego. Em qualquer destes grupos ainda se pode considerar se a via é exclusiva ou se é partilhada pela presença de dois ou mais movimentos de veículos.

O valor do débito de saturação base é de 1900 uvl/h, que se verifica se forem satisfeitas as seguintes condições:

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

II.5.4.1 Corrente de tráfego sem oposição em via exclusiva

O débito de saturação, s é dado neste caso pela seguinte expressão:

$$s = 1900 f_w f_i f_z f_p f_t f_d \quad (5)$$

em que,

- f_w – factor de ajustamento devido à largura da via
- f_i – factor de ajustamento devido ao declive da via
- f_z – factor de ajustamento devido à localização do cruzamento
- f_p – factor de ajustamento devido à localização da via
- f_t – factor de ajustamento devido à composição da corrente de tráfego
- f_d – factor de ajustamento devido à mudança de direcção

A largura da via w é uma das características geométricas que mais afecta a partida dos veículos. Para vias de largura inferior a 3,3 metros admite-se que por cada metro de redução da largura da via corresponde uma diminuição de cerca de 200 uvl/h do débito de saturação, enquanto que em vias de largura superior a 3,3 metros corresponde, por metro, a uma variação de 100 uvl/h. O factor de ajustamento f_w é, assim, obtido através de:

$$f_w = \begin{cases} 0,105 w + 0,653 & 2,5 < w < 3,3 \\ 0,053 w + 0,826 & 3,3 < w < 5,0 \end{cases} \quad (6)$$

O perfil longitudinal tem um efeito positivo ou negativo no débito de saturação conforme a via esteja a descer, facilitando a partida dos veículos, ou a subir, dificultando-a.

Este efeito traduz-se pela variação do débito de saturação em 2% por cada 1% de variação do declive, pelo que o factor de ajustamento f_i pode ser calculado a partir de:

$$f_i = 1 - 2i \quad (7)$$

onde i é o declive da via (formato decimal), sendo positivo nas subidas e negativo nas descidas.

A influência da localização do cruzamento nos débitos de saturação reflecte a soma de pequenos factores que dificultam a partida dos veículos, tais como a visibilidade, a interferência dos peões, as manobras de estacionamento, a entrada/saída de passageiros dos autocarros ou táxis, etc. Sendo difícil isolar cada um destes factores opta-se por considerar o seu efeito conjunto, tendo em conta a seguinte classificação para a localização do cruzamento, encontrando-se entre parêntesis os respectivos valores para o factor de ajustamento f_z :

- Classe A ($f_z=1,1$) – corresponde a uma zona residencial ou suburbana, onde a visibilidade é boa, sendo nulas ou reduzidas as restrições à liberdade de manobra dos condutores provocadas pela presença de peões, rotatividade do estacionamento ou paragens de autocarros.
- Classe B ($f_z=1,0$) – corresponde a uma zona de características médias onde as perturbações à partida dos veículos são moderadas.
- Classe C ($f_z=0,9$) – corresponde às zonas centrais em que quer o elevado volume de peões, quer as múltiplas manobras de estacionamento, paragem para a entrada e saída de passageiros, bem como para as operações de carga e descarga têm um efeito sensível no escoamento do tráfego.

O efeito acumulado dos factores referidos anteriormente depende da posição da via de tráfego no ramo de entrada do cruzamento, sendo maior para a via de tráfego situada junto ao lancil pelo que, neste caso, adopta-se um factor de ajustamento $f_p = 0,95$.

Como se referiu o valor base do débito de saturação diz respeito a tráfego equivalente expresso em unidades de veículos ligeiros por hora. Para atender à composição do tráfego será necessário usar os coeficientes de equivalência de cada classe de veículos e que representam o número de veículos ligeiros que nas mesmas condições produzem o mesmo efeito na partida dos veículos que um veículo de determinada classe.

Este factor permite, assim, converter os débitos homogeneizados em débitos reais. Assim sendo, o factor de ajustamento f_i será dado pela seguinte expressão:

$$f_i = \frac{1}{1 - \sum p_i + \sum p_i E_i} \quad (8)$$

em que,

p_i – proporção de veículos da classe i (excepto veículos ligeiros)

E_i – coeficiente de equivalência dos veículos de classe i (excepto ligeiros)

Os coeficientes de equivalência a adoptar são:

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

Nas mudanças de direcção os veículos avançam com velocidades mais baixas, sendo este efeito representado pelo factor de ajustamento f_d dado por:

$$f_d = \frac{1}{1 + 1,5/\rho} \quad (9)$$

sendo ρ o raio, em metros, da curva descrita pelo veículo na manobra de viragem.

II.5.4.2 Corrente de tráfego sem oposição em via partilhada

No caso da via ser partilhada por dois ou mais movimentos o respectivo débito de saturação é obtido a partir do cálculo do intervalo médio entre veículos sucessivos desta corrente de tráfego dado pela média, ponderada pelas respectivas proporções, dos valores médios dos intervalos entre veículos sucessivos dos movimentos que ocupam essa via. Tendo em conta que o inverso do débito representa o valor médio do intervalo entre veículos sucessivos, vem:

$$s = \frac{\sum p_i}{\sum p_i/s_i} \quad (10)$$

com s_i e p_i o débito de saturação e a proporção do movimento i , respectivamente mostrando assim que o débito de saturação da via partilhada corresponde à média harmónica dos débitos dos movimentos individuais.

Assim, ter-se-á de começar por estimar o débito de saturação de cada um dos movimentos que integram a corrente de tráfego admitindo que dispunham de via exclusiva, para posteriormente o débito de saturação do conjunto ser dado pela aplicação da expressão (10).

II.5.4.3 Corrente de tráfego com oposição em via exclusiva

A existência de conflito entre correntes de tráfego torna mais complexa a estimação do débito de saturação. A partida dos veículos obedece a regimes diferentes conforme haja ou não veículos presentes prioritários que impeçam as suas manobras. Saliente-se que os veículos não prioritários só avançam se o puderem fazer em condições de segurança, isto é, se existir um intervalo de tempo entre veículos prioritários com amplitude suficiente que permita aos veículos não prioritários realizarem a manobra sem correrem perigo.

A Figura 13 ilustra a partida dos veículos de uma corrente de tráfego que sofre oposição.

Podem distinguir-se três períodos:

- i. Período inicial com uma duração igual ao tempo de verde saturado para a corrente de tráfego prioritária (g_s), em que não ocorrem partidas devido ao tráfego prioritário que circula no sentido oposto o não permitir. De facto os veículos prioritários que aguardavam em fila o tempo de verde para poderem avançar, vão fazê-lo em regime de saturação, isto é, com intervalos de tempo entre eles mínimos o que impede a existência de oportunidades para os veículos

não prioritários poderem avançar. Este período termina no momento em que a fila de espera se esgota.

- ii. Período intermédio que decorre até ao início do tempo de vermelho, caracterizado pelo avanço dos veículos prioritários à medida que chegam. As partidas dos veículos não prioritários só podem acontecer quando se lhes deparam intervalos de tempo entre veículos prioritários de duração aceitável. A duração deste período de tempo de verde não saturado relativamente à corrente de tráfego prioritária (g_u), é dado pela diferença entre o tempo de verde útil e o tempo de verde saturado g_s . Admitindo a existência permanente de fila, o número de veículos que podem passar durante g_u é dado pelo produto g_u e s_u , representando este último parâmetro o débito de saturação da corrente de tráfego não prioritária, durante o tempo g_u , podendo este ser obtido por recurso a modelos de determinação da capacidade em cruzamentos prioritários, tal é a semelhança entre as duas situações.
- iii. Período final que ocorre após o fim do tempo de verde durante o qual os veículos, que tinham ficado retidos no interior do cruzamento por não terem tido oportunidade para avançarem, podem, antes do aparecimento da fase seguinte, completar a sua manobra.

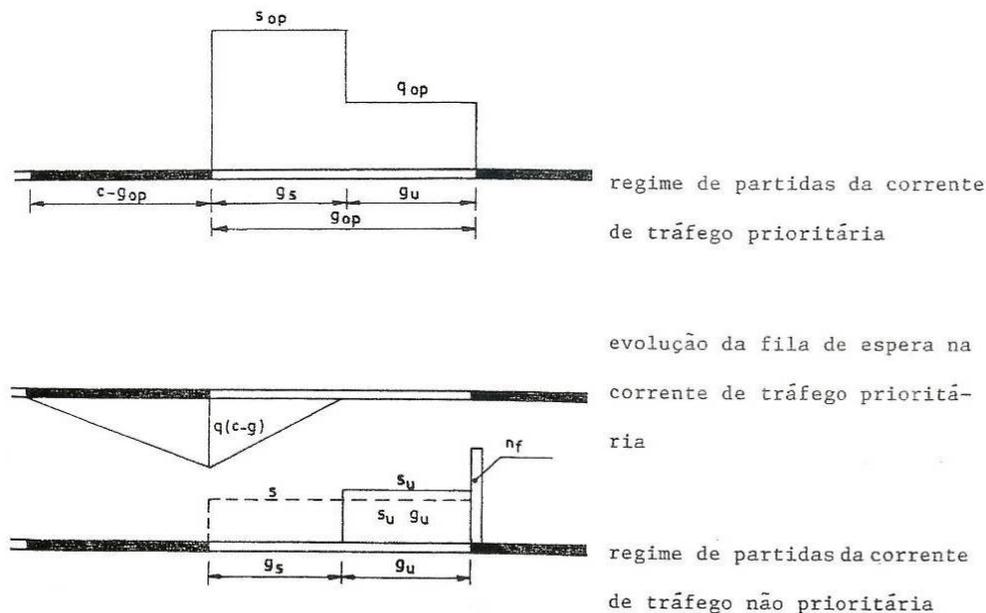


Figura 13 – Débito de saturação do movimento de viragem com oposição

A estimativa do débito de saturação é obtida seguindo idêntico raciocínio ao utilizado na apresentação do conceito de débito de saturação, isto é, através do quociente entre o número total de partidas e o tempo de verde útil disponível para poderem avançar, de modo a que se defina um rectângulo cuja área representa o total de veículos que

passaram, sendo a base dada pelo tempo de verde útil e a altura pelo débito de saturação.

Assim obtém-se:

$$s = \frac{s_u g_u + n_f}{g} \quad (11)$$

sendo,

s_u – débito de saturação da corrente de tráfego não prioritária, durante o tempo g_u

g_u – tempo de verde não saturado da corrente de tráfego prioritária

n_f – número de partidas após o fim do tempo de verde

g – tempo de verde útil da corrente de tráfego não prioritária

O valor de s_u pode ser obtido com recurso aos modelos utilizados no cálculo da capacidade em intersecções prioritárias, dos quais a fórmula de Tanner é uma das mais conhecidas:

$$s_u = \frac{q_{op} (1 - \beta_1 q_{op})}{\exp[q_{op} (\alpha - \beta_1)] [1 - \exp(-\beta_2 q_{op})]} \quad (12)$$

com,

q_{op} – débito de chegadas da corrente de tráfego prioritária

α – intervalo de aceitação crítico dos veículos não prioritários

β_1 – intervalo mínimo entre veículos prioritários

β_2 – intervalo mínimo entre partidas de veículos não prioritários

Poder-se-á, no entanto, utilizar a seguinte expressão simplificada onde as variáveis têm o mesmo significado que na expressão anterior:

$$s_u = q_{op} \frac{\exp(-\alpha q_{op})}{1 - \exp(-\beta_2 q_{op})} \quad (13)$$

Preferencialmente os valores dos parâmetros α , β_1 e β_2 devem ser medidos no local. Se tal não for possível podem adoptar-se-á $\alpha = 5$ s, $\beta_1 = 1,8$ s e $\beta_2 = 3$ s.

O valor de g_u obtém-se, para a corrente de tráfego prioritária, pela diferença entre o tempo de verde útil, g_{op} , e o tempo de verde saturado, g_s , isto é:

$$g_u = g_{op} - g_s \quad (14)$$

Durante o tempo de verde saturado vão partir os veículos que chegaram anteriormente durante o vermelho e os veículos que entretanto foram chegando até que a fila de espera desapareça.

Assim, como se pode ver na Figura 14, no fim do tempo de verde saturado o número de partidas vai ser igual ao número de chegadas.

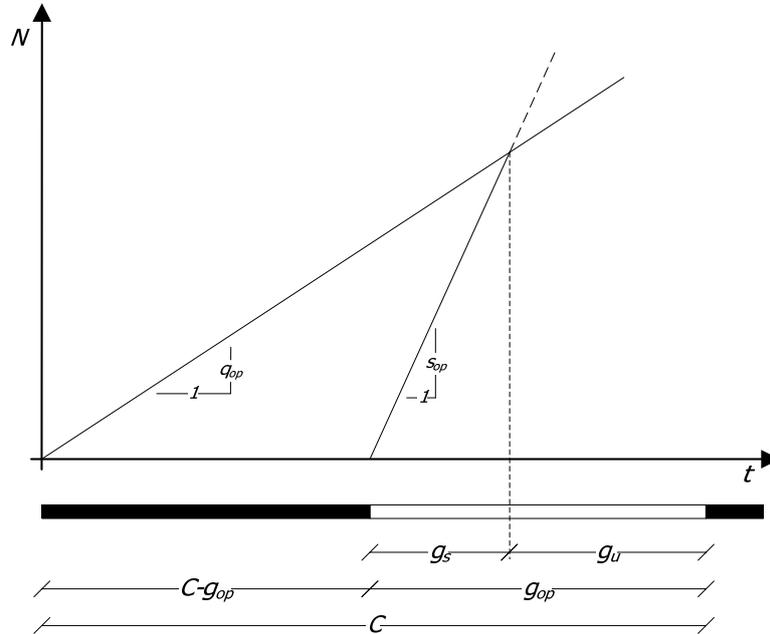


Figura 14 – Evolução das filas do movimento prioritário ao longo do ciclo

Desta igualdade resulta:

$$g_s s_{op} = q_{op} (C - g_{op} + g_s) \quad (15)$$

com,

g_s – tempo de verde saturado para a corrente de tráfego prioritária

s_{op} – débito de saturação da corrente de tráfego prioritária

q_{op} – débito de chegadas da corrente de tráfego prioritária

C – duração do ciclo

g_{op} – tempo de verde útil da corrente de tráfego prioritária

Substituindo o valor de g_s dado por (15) em (14) resulta que o verde útil virá:

$$g_u = (g_{op} s_{op} - q_{op} C) / (s_{op} - q_{op}) \quad (16)$$

O número de veículos n_f que, em média, podem partir após o fim do tempo de verde será significativo no caso de serem escassas as oportunidades de avanço oferecidas na corrente de tráfego prioritária.

O seu valor depende da geometria do cruzamento, recomendando-se a sua medição localmente. Porém, uma sua estimativa pode ser obtida através da expressão (18):

$$n_f = n_s F \quad (17)$$

em que:

n_s – representa o espaço disponível no interior do cruzamento, expresso em veículos, para reter os veículos não prioritários;

F – representa a probabilidade que de existam veículos a ocupar este espaço.

O valor de F é dado por:

$$F = x_{op}^{0,2} \quad (18)$$

com,

$$x_{op} = C \frac{q_{op}}{s_{op} g_{op}} \quad (19)$$

onde x_{op} é um parâmetro que se designa por grau de saturação e será referido adiante no ponto relativo a indicadores de desempenho.

Verifica-se, assim que a determinação do débito de saturação exige o conhecimento prévio da regulação dos sinais luminosos o que obriga a realizar cálculos iterativos, tomando, por exemplo, como valor inicial os débitos de saturação referentes a correntes de tráfego sem oposição.

II.5.4.4 Corrente de tráfego com oposição em via partilhada

Sendo a via partilhada por movimentos com e sem oposição, de que o exemplo mais comum é a combinação do movimento em frente sem oposição com o movimento à esquerda com oposição, deixa de ser possível usar a metodologia atrás descrita, já que, por exemplo, durante o tempo de verde saturado da corrente de tráfego prioritária podem ocorrer partidas da via partilhada dos movimentos sem oposição até que a via fique bloqueada pelos veículos com oposição. Tal poderá acontecer também no tempo de verde não saturado.

Existem vários estudos que tratam especificamente deste tema, alguns deles adoptando desenvolvimentos que ultrapassam claramente o âmbito deste texto. Um dos métodos mais simples é o apresentado por Kimber e al. (1986), que usa um modelo baseado em observações locais e na utilização de programas de simulação para o processo de partidas dos veículos nestas condições. Os resultados conduzem por ajustamento às expressões empíricas que se apresentam de seguida.

O débito de saturação s da corrente de tráfego não prioritária em via partilhada com oposição, admitindo apenas dois movimentos, um com oposição e outro sem oposição, e seguindo os princípios enunciados na alínea anterior, será dado por:

$$s = \frac{s_u g_u + n'_f}{g} \quad (20)$$

com,

s_g – débito de saturação durante o tempo de verde útil g

n'_f – número médio de partidas após o fim do tempo de verde

O valor de s_g é, por sua vez, dado por:

$$s_g = 0,9 \frac{s_f}{1 + p(B-1)} \quad (21)$$

com,

$$B = 1 + \frac{1,5}{\rho} + \frac{t_1}{t_2} \quad (22)$$

$$t_1 = \frac{12 x_{op}^2}{1 + 0,6 n_s (1 - p)} \quad (23)$$

$$t_2 = 1 - (p x_{op})^2 \quad (24)$$

em que,

s_f – débito de saturação do movimento em frente, em via exclusiva sem oposição

ρ – raio de curvatura da trajectória do movimento de viragem

x_{op} – grau de saturação da corrente de tráfego prioritária, dado por (19)

n_s – capacidade de retenção no cruzamento dos veículos que pretendem virar à esquerda

p – proporção de viragens à esquerda

Para determinar n'_f usa-se um procedimento análogo ao apresentado na alínea anterior, fazendo:

$$n'_f = n_s F \quad (25)$$

com,

$$F = (p x_{op})^{0,2} \quad (26)$$

No caso de se dispor de três movimentos, sendo dois deles sem oposição, o valor de s_g vem dado por:

$$s_g = 0,9 \frac{s_f}{1 + p_1 \frac{t_1}{t_2} + 1,5 \frac{p_1}{\rho_1} + 1,5 \frac{p_2}{\rho_2}} \quad (27)$$

em que p_1 e p_2 , ρ_1 e ρ_2 são as proporções e raios de curvatura das trajectórias dos veículos com mudança de direcção com oposição e sem oposição, respectivamente.

Tal como anteriormente a aplicação desta metodologia exige que se façam cálculos iterativos, tendo em conta que a estimação do débito de saturação requer o seu conhecimento para se determinar a repartição do ciclo.

No início do processo pode usar-se para o débito de saturação o valor correspondente à corrente de tráfego sem oposição.

Voltar-se-á a este assunto mais à frente quando se abordar o caso especial das vias curtas, isto é, que não tenham comprimento suficiente para armazenar a totalidade de veículos com possibilidade de partirem em regime de saturação.

II.5.4.5 Exemplo de estimativa de um débito de saturação

Para o cruzamento representado na Figura 15 pretende-se estimar o débito de saturação das correntes de tráfego 1 e 4.

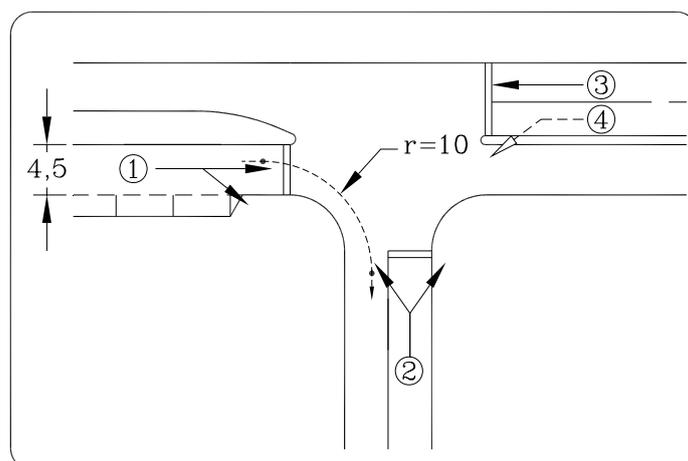


Figura 15 – Aplicação 1: Estimativa de fluxos de saturação

A intersecção encontra-se regulada por um plano semafórico de tempos fixos a duas fases com um ciclo de 90 segundos. A primeira fase disponibiliza 60 segundos de tempo de verde útil às correntes 1 e 3, sem oposição, e à corrente 4, com oposição em via exclusiva. Na segunda fase, com um tempo de verde útil de 20 segundos, é permitido o avanço da corrente 2. São conhecidos os fluxos de chegada à intersecção da corrente 1 ($q_{1,FTE} = 450$ veíc./h, $q_{1,DTA} = 220$ veíc./h), bem como a composição do tráfego nessa corrente (veículos ligeiros de passageiros: 85%, veículos comerciais médios: 7%, veículos comerciais pesados: 3%, autocarros: 2%, veículos de duas rodas com motor: 3%). Verificou-se ainda no local que a elevada rotatividade do estacionamento condiciona significativamente a fluidez da corrente 1. A intersecção situa-se em patamar.

É necessário iniciar a resolução do problema pela corrente 1 já que o seu débito de saturação condiciona o valor da mesma grandeza da corrente 4.

Como a corrente é composta por dois movimentos, a resolução passa pela obtenção dos débitos de saturação individuais para posterior combinação. Assim, recorrendo às expressões (6) a (9), obtêm-se os seguintes factores de ajustamento:

Largura da via	$w = 4,5 \text{ m}$	$f_w = 1,06$
Inclinação dos tráineis	$i = 0\%$	$f_i = 1,00$
Tipo de zona	Classe C	$f_z = 0,90$
Proximidade ao lancil	Adjacente	$f_p = 0,95$
Composição do tráfego		$f_t = 0,93$
Raio de viragem	$\rho > 100 \text{ m (frente)}$	$f_d = 1,00$
	$\rho = 10 \text{ m (direita)}$	$f_d = 0,87$

Resultam, pela expressão (5), para os movimentos de ida em frente e de viragem à direita, os respectivos fluxos de saturação: $s_{FTE} = 1607 \text{ veíc./h}$, $s_{DTA} = 1398 \text{ veíc./h}$. O débito de saturação da corrente de tráfego obtém-se (expressão (10)) ponderando os débitos individuais com as respectivas proporções de chegadas à intersecção (0,672 e 0,328), ficando finalmente $s_1 = 1560 \text{ veíc./h}$

O débito de saturação da corrente 4 depende do programa semafórico ($g_{op} = 60 \text{ s}$, $C = 90 \text{ s}$), dos débitos de chegada e de saturação da corrente prioritária que se lhe opõe: $q_{op} = q_1 = 670 \text{ veíc./h}$ e $s_{op} = s_1 = 1560 \text{ veíc./h}$. O período de verde útil resultante destes valores é $g_u = 37,4 \text{ s}$ (expressão (16)), correspondendo a uma taxa de saturação $x_{op} = 0,64$. Admitindo a disponibilidade de espaço para a espera de um veículo da corrente 4 após a barra de paragem ($n_s = 1$), resulta $n_f = 0,9$. Utilizando a versão simplificada da fórmula de Tanner (13) com $\alpha = 5$ e $\beta_2 = 3$, obtém-se o débito de saturação correspondente ao período de verde não saturado, $s_u = 618 \text{ veíc./h}$. e finalmente, pela expressão (11), o débito de saturação relativo ao período total de verde, $s_4 = 440 \text{ veíc./h}$.

III PRINCÍPIOS BÁSICOS DE SELECÇÃO DOS PLANOS DE REGULAÇÃO

III.1 Regras base

A regulação dos sinais luminosos estabelece a duração de cada um dos tempos a atribuir às correntes de tráfego, constituindo o que geralmente se designa por plano de regulação. Uma das primeiras tarefas para a sua concretização consiste em definir o número, a sequência e as correntes de tráfego que podem avançar em cada fase.

O número de fases e a sua definição dependem da geometria da intersecção e das características das correntes de tráfego existentes, não havendo, portanto, soluções tipo tal a variedade de situações que se podem encontrar, sendo uma intersecção dificilmente reproduzível. No entanto, há alguns princípios gerais que devem estar sempre presentes na definição do plano de regulação de modo a garantir a segurança dos utentes e a eficiência da solução.

Assim, por um lado o número de fases a criar deve ser o menor possível, tendo em conta a facilidade de compreensão do plano de fases e a redução dos tempos perdidos que ocorrem nos períodos de transição entre fases. Obviamente o número menor de fases possível resume-se a dois.

Por outro lado a definição das fases e respectiva sequência deve ter em conta as expectativas dos utilizadores, evitando soluções complexas que conduzam a hesitações por dificuldade de interpretação.

Para a atribuição das correntes de tráfego às fases deve ser tido em conta que numa mesma fase só é possível juntar veículos e/ou peões cujos movimentos direccionais sejam compatíveis, isto é, não se intersectem, ou cujo grau de incompatibilidade seja considerado aceitável devido ao moderado grau de perigosidade envolvido e aos fracos volumes de pelo menos um deles que levam à existência de uma reduzida probabilidade de veículos e peões incompatíveis se apresentarem em simultâneo no ponto de conflito.

Nestes casos as questões ligadas à visibilidade e ao respeito pelas expectativas dos condutores e peões devem ser tidas em particular conta e será necessário recorrer à utilização de sinalização adequada que defina claramente os níveis de prioridade em caso de potencial conflito.

Genericamente considera-se que, tendo em atenção o grau de perigosidade potencial, existem dois tipos principais de conflitos entre movimentos direccionais possuidores de trajectórias conflitantes (ver a Figura 16):

- Os de 1º nível ou Primários, onde o grau de perigosidade é tal que são considerados inaceitáveis em qualquer situação;
- Os de 2º nível ou Secundários, cuja aceitabilidade tem em conta o grau de perigosidade associado ao caso concreto em análise, dependendo dos níveis de tráfego dos movimentos em causa e, também, da carga de tráfego a que o conjunto do cruzamento está sujeito.

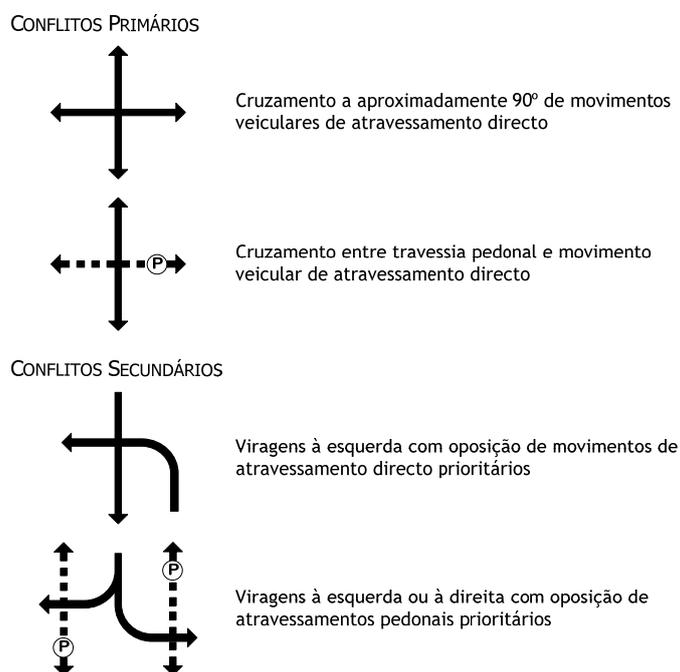


Figura 16 – Tipologias de conflitos entre movimentos direccionais incompatíveis

III.2 Planos de regulação básicos

Da análise dos princípios e regras apresentados no ponto anterior verifica-se a existência de dois tipos de objectivos fundamentais mas algo incompatíveis subjacentes à definição de um plano de regulação: a maximização do potencial de escoamento de tráfego e das condições de segurança e conforto.

O primeiro dos objectivos tenderá a ser atingido nomeadamente através da redução ao mínimo do número de fases, enquanto que a prossecução do segundo depende em grande parte da não-aceitação de conflitos secundários que estão ligados aos movimentos de viragem, particularmente viragem à esquerda, e pedonais.

Daqui resulta que para cruzamentos simples em cruz ou do tipo entroncamento as soluções mais eficientes, desde que sejam viáveis, são os planos de regulação a duas fases com os movimentos de viragem a ser efectuados com oposição quer dos movimentos motorizados de atravessamento no caso das viragens à esquerda, quer dos atravessamentos pedonais existentes nos ramos de destino dos movimentos.

Na Figura 17 apresenta-se um plano de regulação deste tipo aplicável a um cruzamento em cruz, apresentando-se também esquematicamente uma geometria tipo em princípio compatível.

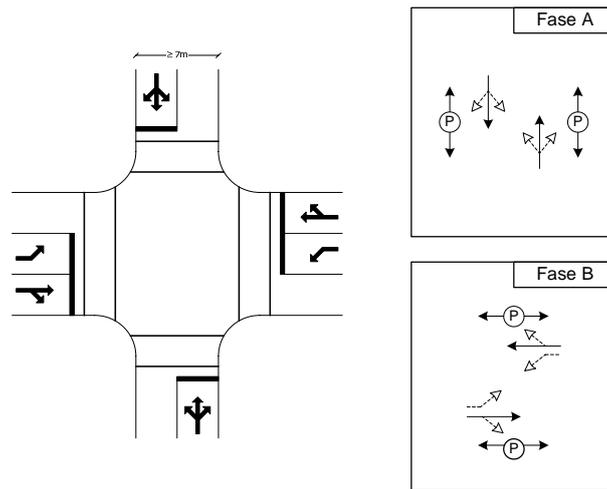


Figura 17 – Exemplo de plano de regulação base para cruzamentos em cruz

Na Figura 18 apresenta-se também um plano de regulação deste tipo mas agora aplicável a um entroncamento, apresentando-se também esquematicamente duas geometrias tipo em princípio compatíveis.

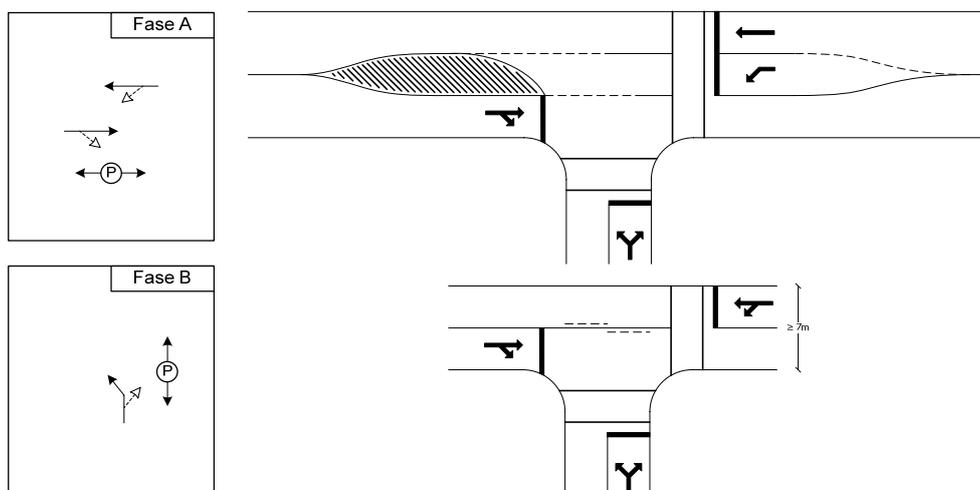


Figura 18 – Exemplo de plano de regulação base para entroncamentos

Note-se que em quaisquer destes casos a viabilidade deste tipo de soluções depende da verificação das seguintes condições:

- Existência de vias segregadas de viragem à esquerda ou, pelo menos, de espaço suficiente no eixo da via para, durante o período de activação da fase que os serve, reter os veículos que pretendem virar à esquerda e que ainda não o conseguiram fazer, sem que tal bloqueie os restantes movimentos direccionais que com eles partilham o eixo de acesso ao cruzamento. Esta última condição normalmente é satisfeita se a largura desse eixo for de pelo menos 7,0 metros;
- Existência de fluxos de viragens à esquerda limitados, podendo usar-se como valores de referência que quase garantem esta exigência valores da ordem dos 50/100 veículos/hora;
- Existência de um número limitado de conflitos entre peões e movimentos de viragem o que implica a existência de fluxos pedonais também não muito significativos;
- Não existência de conflitos entre os movimentos de viragem e os peões de perigosidade real para estes últimos, ou por eles “sentida”, significativos.

O tratamento de situações onde não é possível adoptar este tipo de soluções básicas, nomeadamente o tratamento de situações mais complicadas relativamente às viragens à esquerda e aos peões, mas também quando se verifica a necessidade de tirar partido de geometrias menos habituais ou de apoiar selectivamente diferentes movimentos ou utentes será analisado mais adiante.

IV SINAIS LUMINOSOS DE COMANDO INDEPENDENTE E DE TEMPOS FIXOS

Já atrás foi referido que os sistemas de comando independente e de tempos fixos mantêm sempre a mesma sequência de informação durante períodos de tempo constantes e, portanto, esta rigidez torna-os menos eficientes sempre que a procura existente no cruzamento se afasta dos valores de referência tomados na determinação do plano de regulação.

Porém, tal não significa que o seu estudo seja abandonado já que, como adiante se verá, é útil para a definição de sistemas mais complexos, quer se trate de sistemas actuados pelo tráfego, quer em sistemas de comando coordenado.

IV.1 Determinação do plano de regulação

O plano de regulação só fica completamente definido quando, após a identificação das fases, se determinar o tempo destinado a cada uma delas, os tempos de transição entre as fases e conseqüentemente a duração do ciclo.

Para tal é necessário ter em atenção que a opção pela sinalização luminosa permite que as diferentes correntes de tráfego que constituem a procura da intersecção possam avançar em tempos distintos, havendo como que uma segregação temporal dos veículos que têm de adaptar o seu comportamento à informação transmitida pelo sinal luminoso obrigando-os, pelo menos em parte, a paragens.

Assim, compreende-se que sendo as paragens e os atrasos as conseqüências directas da sinalização luminosa possam ser utilizados para se estabelecerem os critérios de optimização no cálculo dos planos de regulação. Trata-se, então, de encontrar uma solução para um problema clássico em que há determinado critério de optimização estando as variáveis sujeitas a certo tipo de restrições.

O critério de optimização mais comum em modelos simplistas de cálculo dos planos de regulação é a minimização do atraso total, obtido pelo produto do atraso médio por veículo pelo respectivo débito de chegadas, que representa o comprimento médio da fila de espera, expresso em veículos, durante o período de tempo em que se observaram aqueles débitos.

Com o avanço tecnológico verificado no campo da informática os modelos tornaram-se mais complexos, sendo frequente mais recentemente a utilização, para além do atraso total, do número de paragens, o que permite considerar outros critérios de optimização, tais como a minimização do consumo de combustível ou dos custos de operação e, mesmo, de certos parâmetros relacionados com a qualidade ambiental.

Existem, ainda, outros modelos que usam a maximização da capacidade do cruzamento que apresenta como principal vantagem o facto de a solução poder ser encontrada através de técnicas usadas na Programação Linear.

No que se refere a restrições os modelos mais desenvolvidos incorporam um conjunto de restrições que a solução óptima encontrada para o plano de regulação tem de respeitar, tais como limites para a duração do tempo de verde e de vermelho, comprimento máximo da fila de espera, etc.

Existem, contudo, certo tipo de restrições comuns a qualquer modelo e que são impostas por razões de operacionalidade, comodidade e/ou segurança. É o caso da duração do ciclo cujo valor deve estar compreendido no intervalo entre 30 e 120 segundos e a duração mínima do tempo de verde em cada fase normalmente fixada em 8 segundos de forma a garantir a partida de pelo menos três veículos.

Uma duração do ciclo demasiado longa aumenta os tempos de vermelho e, portanto, os períodos de imobilização serão igualmente longos o que pode provocar atravessamentos pelos peões em períodos não autorizados (durante o vermelho) devido a eventual descrédito quanto ao funcionamento do sistema ou à impaciência gerada por esperas prolongadas. Em relação aos condutores conhecedores da situação pode dar origem a violações do tempo de vermelho para evitarem que tenham de esperar pela próxima autorização que demorará um tempo considerado excessivo. Por outro lado em períodos longos é, segundo certos estudos, difícil manter o débito de saturação o que se traduz pela perda de eficiência do cruzamento já que não é possível manter o máximo ritmo de partidas.

Uma duração do ciclo demasiado curta pode aumentar a frustração dos condutores por não terem tido oportunidade de avançarem induzindo-os eventualmente a manobras de maior risco ou mesmo a violações da lei.

O método clássico para a determinação do plano de regulação é devido a Webster que, não obstante a sua simplicidade decorrente da época em que foi desenvolvido com meios limitados de cálculo, ainda hoje é tomado como referência na literatura especializada, e será utilizado no presente documento como metodologia base.

Existem no entanto outras metodologias, uma das quais, aqui designada de Método Australiano Adaptado, será também simplificada apresentada.

IV.2 Método de Webster

IV.2.1 A carga das fases e do cruzamento

A aplicação deste método exige que seja identificada em cada fase a respectiva corrente de tráfego representativa. No caso mais simples em que cada corrente de tráfego avança em apenas uma fase, a corrente de tráfego representativa, ou crítica, em cada fase corresponde ao valor mais elevado do quociente entre o débito de chegadas e o débito de saturação entre as correntes de tráfego com permissão de avançar nessa fase, também designado de índice de carga da corrente de tráfego.

Este quociente é um indicador que traduz o grau de necessidade do verde em percentagem do ciclo, pelo que a corrente de tráfego representativa ou crítica, sendo a mais exigente neste aspecto, é a que condiciona a duração do tempo de verde nessa fase, com a garantia de que todas as outras correntes de tráfego com avanço nessa fase estarão com níveis de saturação inferiores.

Assim, o índice de carga da fase j é dado por:

$$y_i = \max(q_{ji}/s_{ji}) = \max(y_{cj}) \quad (28)$$

sendo,

y_i – índice de carga da fase i

y_{cj} – índice de carga da corrente de tráfego j

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

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

Sempre que existam correntes de tráfego que avancem em mais do que uma fase, a identificação das correntes de tráfego críticas torna-se mais complicada, podendo haver casos extremos que ponham em causa a aplicação do método. Apresentam-se mais adiante duas metodologias que permitem ultrapassar esta dificuldade.

O índice de carga do cruzamento Y é dado pela soma dos índices de carga das fases, isto é:

$$Y = \sum y_i \quad (29)$$

IV.2.2 Os tempos de verde útil e perdidos das fases e do ciclo

Tendo em conta a Figura 19 e designando por l_i o tempo perdido por fase dado pela diferença entre o tempo perdido no arranque e o tempo adicional de passagem cujos conceitos foram introduzidos anteriormente, resulta:

$$C = \sum (g_i + l_i) + \sum (r_i + A_i) \quad (30)$$

com,

C – duração do ciclo

g_i – tempo de verde útil da fase i

l_i – tempo perdido da fase i

r_i – tempo de vermelho integral entre a fase i e $i+1$

A_i – tempo de amarelo após a fase i

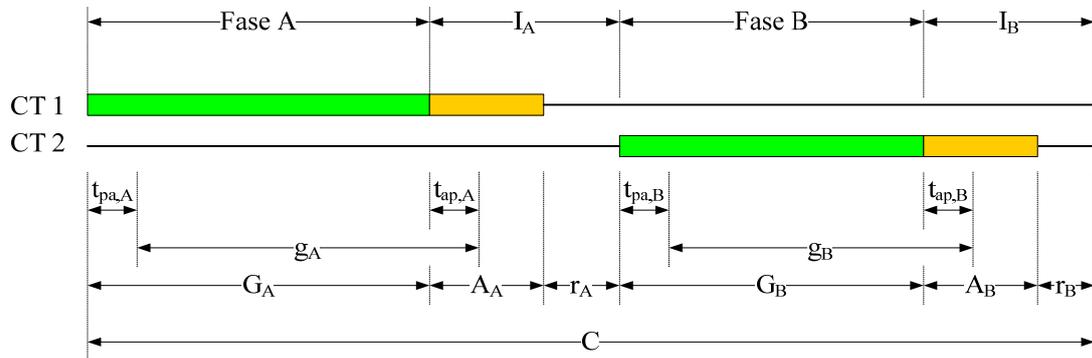


Figura 19 – Evolução temporal dos sinais luminosos das correntes de tráfego características de um cruzamento a duas fases

O tempo perdido por fase aumenta com a velocidade média dos veículos, podendo considerar-se para a gama de velocidades usuais os valores de 0 ou 1 segundo.

Habitualmente designa-se por tempo perdido no ciclo, L , o período de tempo num ciclo que não é utilizado pelos veículos, isto é:

$$L = \sum (l_i + r_i + A_i) \quad (31)$$

Pelo que atendendo a (30) vem,

$$C = \sum g_i + L \quad (32)$$

Por outro lado o tempo de verde real G será dado por:

$$G_i = g_i + l_i \quad (33)$$

IV.2.3 Os conceitos de capacidade e ciclos mínimo, máximo e óptimo

O objectivo do dimensionamento quantitativo dos planos de regulação de qualquer cruzamento é o de definir valores globais para o ciclo a adoptar e para as diferentes fases e períodos de limpeza de modo a minimizar as demoras médias sofridas pelos utentes do cruzamento, o que indirectamente garantirá que, se tal for possível em função

da geometria e plano de regulação pré-definidos, a procura global e as relativas às diferentes correntes de tráfego serão inferiores às respectivas capacidades de escoamento.

IV.2.3.1 Capacidade e grau de saturação

A capacidade define-se como o número máximo de veículos que podem partir por unidade de tempo, sendo geralmente associada às correntes de tráfego. Assim, se for s o débito de saturação, g o tempo de verde útil e C a duração do ciclo, a capacidade Q é dada por:

$$Q = s \frac{g}{C} \quad (34)$$

O valor dado por (34) representa o limite físico de escoamento, isto é a capacidade teoricamente possível.

Note-se por outro lado que da expressão (34) é possível constatar que tendencialmente a capacidade global de um cruzamento cresce à medida que cresce o valor do ciclo adoptado. De facto, não havendo alteração ao nível do faseamento do plano de regulação adoptado, o valor dos tempos perdidos totais é constante independentemente do valor do ciclo, pelo que o rácio g/C tenderá a aumentar quando aumenta o valor de C (ver também a Figura 20).

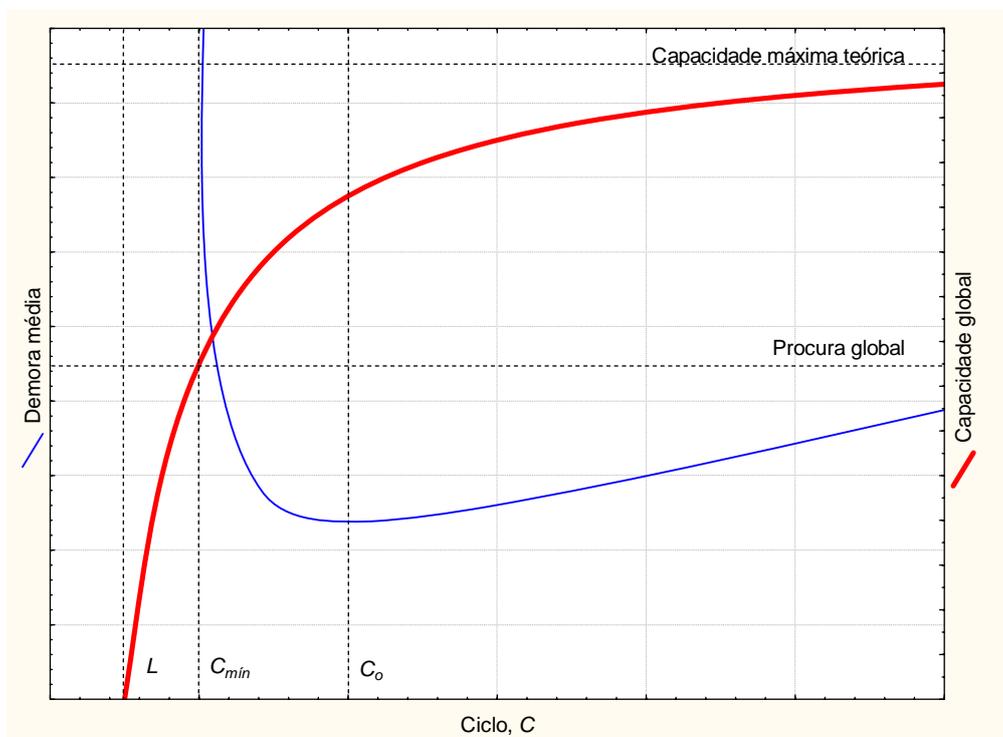


Figura 20 – Relação entre a duração do ciclo, a demora e a capacidade

O grau de saturação, também designado por taxa de saturação, define-se como o rácio entre a procura e a capacidade:

$$x = \frac{q}{Q} \quad (35)$$

Atendendo à expressão (34), resulta

$$x = \frac{qC}{sg} \quad (36)$$

Note-se que este parâmetro corresponde ao conceito de intensidade de tráfego referido nos modelos de filas de espera, que relaciona, para um certo intervalo de tempo, o número de chegadas com a capacidade de atendimento.

Para que se possam atender todos os elementos que chegam ao sistema é necessário que a intensidade de tráfego seja inferior à unidade. No entanto tendo em conta que as condições de escoamento são deficientes quando o débito de chegadas se aproxima da capacidade e, por outro lado, a variabilidade do ritmo de chegadas obriga a manter uma "margem de segurança" que evite situações indesejáveis da capacidade ser frequentemente ultrapassada pelo débito de chegadas, com as implicações que daí resultam. Assim, é desejável que o grau de saturação relativamente a qualquer corrente de tráfego do cruzamento não ultrapasse um determinado valor entre 0,80 e 0,90, genericamente designado grau de saturação máximo admissível.

O grau de saturação máximo verificado no cruzamento quando se utiliza um plano de regulação com ciclo C , pode ser calculado a partir da seguinte expressão:

$$x_{m\acute{a}x} = \frac{YC}{C-L} \quad (37)$$

A expressão (37) resulta do critério usado para a repartição do tempo de verde pelas diferentes fases, como adiante se verá, permitindo determinar o grau de saturação máximo verificado para as correntes de tráfego críticas, sem necessidade de efectuar a repartição do ciclo, o que permitirá, logo após o cálculo do ciclo óptimo, reapreciar a situação no caso do valor limite ser ultrapassado.

IV.2.3.2 Ciclos mínimo e máximo

Em função desta relação entre capacidade e dimensão do ciclo é então possível partir do universo de valores de ciclo admissíveis habitualmente definidos à partida e que, como já foi referido, se considera habitualmente estarem compreendidos entre 30 e 120 segundos.

Para além disso, a duração do ciclo não deverá ser inferior a um determinado limite (C_{min}), sob pena do cruzamento ficar saturado com a procura a exceder a capacidade.

Este valor, que se designa por ciclo mínimo teórico, corresponde ao valor em que a carga máxima do cruzamento é igual à percentagem de verde útil total relativamente ao ciclo (ver a Figura 20) resultando em que:

$$C_{min} = \frac{L}{1-Y} \quad (38)$$

Preferencialmente, no entanto, admite-se uma margem de segurança, já referida anteriormente, para evitar a repetição sucessiva de excesso de procura, fixando uma capacidade prática em 80/90% da capacidade teórica, resultando:

$$C_{min} = \frac{kL}{k-Y} \quad (39)$$

em que k é a proporção utilizada para definir a capacidade prática.

IV.2.3.3 Ciclo óptimo

A partir do universo de ciclos admissíveis há então que identificar o ciclo óptimo aplicando o critério da minimização do atraso total sofrido pelos veículos que integram as correntes de tráfego críticas.

A expressão geral resulta de se anular a derivada da função do atraso relativamente ao valor do ciclo (ver ainda a Figura 20) o que, após algumas simplificações, conduz a:

$$C_o = \frac{1,5L+5}{1-Y} \quad (40)$$

sendo,

- C_o – duração óptima do ciclo
- L – tempo perdido no ciclo
- Y – índice de carga do cruzamento

IV.2.3.4 A escolha do ciclo a adoptar na prática

A análise conjunta dos valores resultantes para o C_{min} e C_o , calculados, e para o $C_{máx}$, pré-definido, pode resultar em diferentes situações ao nível da selecção do ciclo a adoptar na realidade em função do universo dos ciclos admissíveis.

Antes de mais é importante notar que da análise global do andamento das curvas representativas da relação entre a capacidade e a demora em função do valor do ciclo, se pode constatar que se existir um erro na estimação do C_o , o seu impacto negativo será claramente maior se este for por defeito.

De facto pode-se ver que o crescimento da curva relativa às demoras para um e outro lado do seu valor mínimo, tende a ser mais intenso quando o ciclo é inferior ao C_o e que, por outro lado, ao nível das consequências relativamente à capacidade é

normalmente claramente preferível errar por excesso já que relativamente a este indicador de desempenho tal significa estar do lado da segurança.

Em função destas características do problema resulta que quando, como é desejável, o $C_{min} < C_o < C_{máx}$, será normal que seja escolhido para o valor do ciclo o valor correspondente ao ciclo óptimo, havendo alguns autores que, por simplicidade mas também porque como se viu se fica do lado da segurança, sugerem a adopção do múltiplo de cinco imediatamente acima.

Quando, pelo contrário, se verifica uma situação em que $C_{min} < C_{max} < C_o$, situação já menos desejável mas normalmente aceitável, é habitual que, se não for fácil reformular a geometria do cruzamento ou identificar um plano de regulação mais eficiente, se adopte para valor de C o valor correspondente ao $C_{máx}$ já que este garantirá uma capacidade superior à procura, em princípio com demoras impostas aos utentes aceitáveis.

Finalmente, pode ainda acontecer que, ou não é de todo possível estimar um ciclo óptimo, ou que este e o C_{min} sejam tais que se verifique a situação de $C_{max} < C_{min} < C_o$, que será altamente indesejável pois significa que, mesmo adoptando-se o ciclo máximo admissível, o cruzamento vai, previsivelmente, registar fenómenos significativos de congestionamento em alguns períodos do dia. Nestes casos é assim de todo desejável que se proceda ao desenvolvimento de uma nova solução global de regulação do cruzamento, quer através da introdução de alterações à sua geometria e/ou lógica de afectação das vias disponíveis pelos diferentes movimentos direccionais, quer através da selecção de outro plano de regulação.

Considere-se, ainda, que após o cálculo do ciclo se obtinha um $x_{máx}$ superior ao valor máximo admissível. A reapreciação atrás referida terá em conta a estrutura da expressão (37), pelo que as medidas a tomar poderiam, pelo menos em teoria, ser as seguintes:

- i) Diminuir o tempo perdido L o que, em princípio, não é possível pois, atendendo ao seu significado, foi imposto por razões de segurança. Raramente poderá acontecer que com uma nova ordenação de fases possa conduzir a tempos de limpeza inferiores, mas tal situação já foi certamente tido em conta no momento da elaboração do esquema de fases;
- ii) aumento da duração do ciclo C , eventualmente abandonando a duração óptima do ciclo segundo o critério da minimização do atraso. Contudo, este aumento não poderá ultrapassar o valor máximo do ciclo que em geral é fixado em 120 segundos;
- iii) diminuição da carga do cruzamento Y , o que se traduz, na prática, pelo aumento do débito de saturação, o qual pode ser conseguido com uma reafectação do tráfego às vias disponíveis. Se nenhuma destas opções resultar, significa que o esquema de fases proposto deve ser abandonado e

substituído por outro ou, em último caso adoptar-se por uma tipologia alternativa para o cruzamento, sob pena de se ter que aceitar um funcionamento deficiente, sujeito a congestionamentos, durante períodos significativos de tempo.

IV.2.4 A repartição do ciclo pelas fases

A repartição do ciclo pelo tempo de verde destinado a cada uma das fases é obtida admitindo proporcionalidade entre os tempos de verde útil e os índices de carga o que resulta na garantia de existência de iguais graus de saturação para as correntes de tráfego críticas de cada fase. Resulta assim:

$$\frac{g_1}{y_1} = \frac{g_2}{y_2} = \dots = \frac{\sum g_i}{\sum y_i} = \frac{C-L}{Y} \quad (41)$$

o que resulta para o tempo de verde útil da fase i ,

$$g_i = y_i \frac{C-L}{Y} \quad (42)$$

A duração do tempo de verde real, como atrás foi apresentado, é dada por,

$$G_i = g_i + l_i \quad (43)$$

Há, igualmente, uma condição a respeitar pela duração do tempo de verde que impõe que o seu valor não seja normalmente inferior a oito segundos.

No caso de tal acontecer dever-se-á aumentar a duração do ciclo, com o cuidado de que esta operação não conduza à degradação das condições de escoamento das restantes correntes de tráfego.

IV.2.5 Exemplo de aplicação da formulação base do Método de Webster

Considere-se a Figura 21 onde é apresentado um plano de regulação de duas fases de um entroncamento. São também indicados os débitos de chegada e os fluxos de saturação, previamente calculados ou medidos. Admita para cada transição três segundos de amarelo e dois segundos de tempo de limpeza ($I_A = I_B = 5$ s). Pretende-se dimensionar o ciclo e determinar os tempos de verde a atribuir a cada fase.

A resolução do problema passa pela identificação das correntes de tráfego críticas, ou seja, aquelas cujas necessidades de tempo de verde condicionam a duração do ciclo. Quando cada uma das correntes recebe verde numa única fase, como acontece neste problema, as correntes críticas, como atrás se viu, são aquelas que, em cada fase, apresentam o máximo índice de carga.

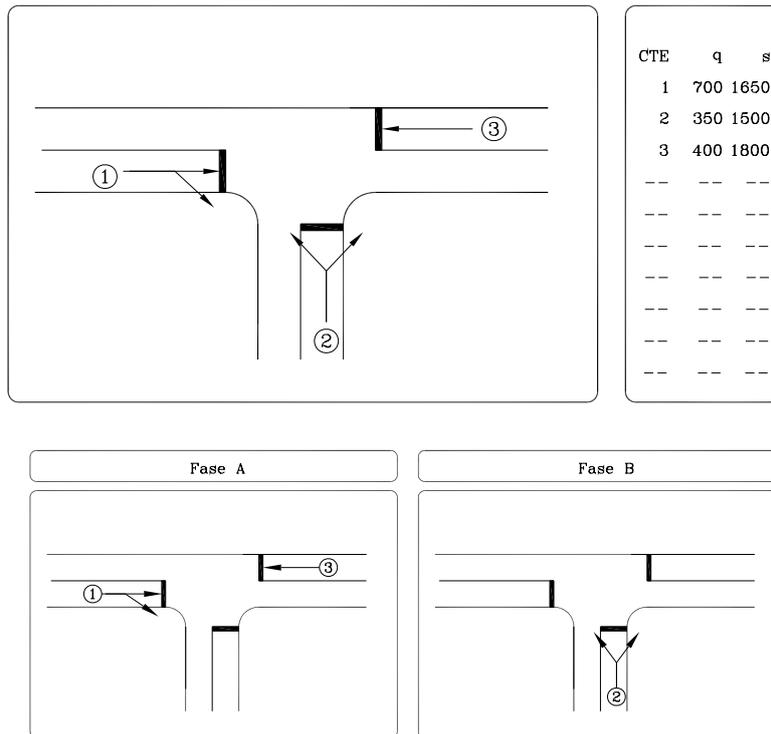


Figura 21 – Exemplo MW 1: sequência de fases

O somatório dos índices de carga das correntes críticas de cada fase dá-nos a *carga da intersecção* (Y), com a qual é possível determinar o ciclo óptimo pela fórmula de Webster. Assim (ver a Tabela 2):

$$Y = y_A + y_B = \max(y_{c1}; y_{c3}) + \max(y_{c2}) = 0,657$$

O tempo perdido total corresponde à soma dos tempos de transição entre fases:

$$L = I_1 + I_2 = 10 \text{ s.}$$

O ciclo óptimo é dado pela fórmula de Webster (40):

$$C_o = (1,5 L + 5) / (1 - Y) = 58,3 \approx 59 \text{ s.}$$

O tempo de verde útil total deverá ser dividido pelas fases em função das respectivas cargas:

$$g_i = y_i / Y \cdot (C - L)$$

obtendo-se, após arredondamento, os seguintes tempos de verde: $g_A = 32 \text{ s}$; $g_B = 17 \text{ s}$.

É agora possível calcular os valores da capacidade – expressão (34) e da taxa de saturação – expressão (35) das diversas correntes de tráfego.

Note-se que, caso não se tivessem arredondado os tempos de verde, as taxas de saturação das correntes críticas teriam resultado iguais (e máximas).

Tabela 2 –Exemplo MW 1: tabela-resumo

	q	s	y_c	g	Q	x
CTE	[Veic/h]	[Veic/h]		[s]	[Veic/h]	
1	700	1650	0,424	32	895	0,78
2	350	1500	0,233	17	432	0,81
3	400	1800	0,222	32	976	0,41

IV.2.6 Identificação das correntes de tráfego críticas em planos de regulação complexos

Como se referiu atrás, a aplicação do método de Webster em esquemas de fases complexos onde há correntes de tráfego a avançarem em mais do que uma fase, tem dificuldades acrescidas, já que não é imediata a identificação das correntes de tráfego críticas de cada fase necessária para a determinação das cargas das fases e, conseqüentemente, da repartição do verde.

Assim, deixa de ser possível efectuar uma comparação simples entre os (q/s) 's das correntes de tráfego que avançam em cada uma das fases, já que algumas delas podem avançar em mais do que uma fase, não sendo correcto efectuar aquela comparação quando há distintos tempos de verde.

Nestes casos sugere a lógica que se proceda ao agrupamento das fases que servem uma mesma corrente de tráfego, procedendo-se depois à comparação do q/s dessa corrente com a soma dos maiores valores de q/s que, em cada fase, são registados entre as correntes de tráfego que apenas são servidas numa delas. Tal justifica-se pelo facto de que, em conjunto, as correntes que são servidas apenas numa das fases, dispõem de tempo de abertura de sinal aproximadamente igual ao atribuído à corrente que se repete (aproximado porque, note-se, o período de transição ou interverde entre as fases agrupadas é também utilizável pela corrente que se repete).

O índice de carga correspondente às fases agrupadas tenderá a ser o maior valor que resultar desta comparação. Tal não é, no entanto, sempre verdade já que para ser completamente esclarecedora esta comparação, ter-se-ia de subtrair ao valor de q/s da corrente de tráfego com avanço em ambas as fases uma correcção que resulta do facto de continuar, como acima de referiu, a receber verde no período de transição entre fases. Esta situação coloca um problema adicional já que o valor a atribuir a esta correcção, por sua vez, depende da dimensão do ciclo adoptado já que dependerá do peso que o período de transição tem no ciclo. Assim, o seu valor não é, à partida, conhecido, podendo no entanto referir-se que este é, no máximo de 0,09, sendo na maioria dos casos inferior a 0,05, podendo tomar-se este último valor como referência aproximada.

Assim, se é certo que quando o índice de carga da corrente de tráfego com avanço em ambas as fases é inferior à soma dos maiores índices de carga das correntes de tráfego que apenas são servidos em cada uma das fases, estas são, de facto, as correntes críticas,

devendo o dimensionamento dever ser efectuado considerando as fases separadas. Pelo contrário, quando a corrente que se repete apresenta um índice de carga maior, tal não significa sempre que esta seja crítica, podendo em alguns continuar as correntes que não se repetem a ser as críticas.

Esta situação obriga a que no dimensionamento de planos de regulação onde se verifica a existência de uma (ou mais) correntes de tráfego com avanço em mais de uma fase, é necessário recorrer a um processo um pouco mais complexo. Este processo consiste basicamente dos seguintes passos:

1. Nas fases onde não há correntes de tráfego servidas noutras fases a corrente de tráfego crítica é aquela a que corresponde o maior índice de carga de entre as correntes servidas nessa fase;
2. Em fases onde exista uma corrente de tráfego que também é servida noutras fases, será necessário para essa corrente de tráfego comparar o seu índice de carga com os valores somados dos maiores índices de carga das correntes que só são servidas em cada uma das fases que a servem.
3. Se o valor do índice de carga da corrente que se repete for inferior ao do somatório de índices, tal significa que essa corrente de tráfego não é crítica pelo que as cargas de cada fase são determinadas pelos maiores índices de carga das correntes de tráfego que não se repetem, procedendo-se normalmente ao cálculo do ciclo óptimo e à repartição dos tempos de verde pelas fases ficando o processo concluído;
4. Se o valor do índice de carga da corrente que se repete for superior ao do somatório de índices, embora não seja certo, tal pode significar que a corrente de tráfego que se repete será crítica. Neste caso dever-se-á proceder ao agrupamento das fases onde esta corrente é servida, assumindo-se como carga desse agrupamento o seu índice de carga, após o que se procederá à estimação do ciclo óptimo (note-se que neste caso é como se existisse menos uma fase no plano de fases pelo que, neste caso, o valor de L (tempo perdido no ciclo) deve excluir o tempo perdido na transição entre as fases que estão a ser consideradas agrupadas), e à repartição dos tempos de verdes de cada fase, o que, no caso das fases que foram agrupadas, será feito proporcionalmente aos maiores índices de carga das correntes só servidas em cada uma das fases (após subtracção do tempo perdido na transição entre estas fases). Deverão depois ser comparadas as taxas de saturação correspondentes à corrente de tráfego que se repete e às que possuem os maiores índices de entre as que não se repetem. Se a taxa de saturação correspondente à corrente que se repete for a maior, confirma-se que essa é crítica e o processo termina. Caso contrário, verifica-se que as correntes críticas são as que apresentam os maiores índices de entre as

correntes que não se repetem e, portanto, como em 3, procede-se normalmente à estimação do ciclo óptimo e à repartição dos tempos de verde de cada fase.

Note-se que este procedimento é generalizável para o caso em que existe mais de uma corrente de tráfego servida em várias fases, embora reconhece-se que pode haver situações complexas em que não seja fácil estabelecer estas comparações. Porém, o princípio a observar deve manter-se, isto é, o índice de carga de cada corrente de tráfego, eventualmente corrigido atendendo ao referido atrás, deve ser menor ou igual à soma dos índices de carga das fases em que pode avançar.

IV.3 O Método Australiano Adaptado

Como se viu nos pontos anteriores, o aspecto fulcral do processo de dimensionamento de um plano semaforico é a identificação dos movimentos críticos. Essa tarefa não oferece qualquer dificuldade se as correntes de tráfego receberem verde numa única fase, permitindo a aplicação directa do método de Webster, e para casos em que há correntes multifase, foi apresentado um procedimento que permite a resolução de um conjunto diversificado de problemas.

Há, contudo, casos, como foi referido atrás, em que a identificação das correntes críticas é extremamente difícil, o que motivou o desenvolvimento de uma metodologia específica (Akcelic, 1981), por vezes designada Método Australiano.

Na presente secção apresenta-se um método mais expedito mas onde se procura tirar partido de algumas das características mais interessantes dos métodos Webster e Australiano. Especificamente, admitiu-se que os tempos perdidos ($l = t_{pa} - t_{ap}$) são desprezáveis, pelo que os tempos de verde útil e real são equivalentes. Por outro lado, utilizou-se a fórmula de Webster para a duração do ciclo óptimo, em detrimento de uma expressão mais abrangente proposta pelo autor.

A identificação das correntes críticas, aspecto básico do método, assenta no princípio da existência de um “circuito” temporal crítico, mais longo, de entre os diferentes circuitos identificáveis na rede formada pelos diferentes encadeamentos resultantes das aberturas e fechos sucessivos das diferentes correntes de tráfego independentes ao longo das várias fases constitutivas de um determinado plano de regulação, que se designará por “rede de circuitos críticos”.

Um exemplo deste tipo de rede, representando as interdependências temporais entre as correntes de tráfego servidas no plano de regulação com três fases representado na Figura 22, pode ser visualizado Figura 23. Pode-se constatar que se trata de um grafo orientado em que os nós correspondem a mudanças de fases e os arcos a correntes de tráfego (CT).

Note-se que na rede, para melhor visualização das diferentes interdependências e encadeamento das sucessivas activações das diferentes correntes de tráfego, algumas delas são apresentadas mais de uma vez. Tal, no entanto, não é estritamente necessário para efeitos da aplicação prática do método aqui apresentado.

Note-se ainda que por vezes é necessário expandir a rede por adição de nós já que não é possível caminhar para trás

O processo de identificação dos circuitos críticos passa pela determinação do circuito mais demorado, isto é, o circuito mais longo com nós inicial e final coincidentes, o que corresponderá naturalmente ao ciclo do cruzamento. As correntes que integram este circuito são, para o ciclo escolhido, críticas.

Para o desenvolvimento deste processo é essencial a quantificação para cada arco da variável “tempo mínimo de escoamento da corrente de tráfego”, t_m . Essa grandeza, que representa basicamente o tempo de funcionamento activo de cada corrente de tráfego acrescido do tempo necessário para a sua desactivação, é composta por duas parcelas: o tempo de verde efectivo, g , e o tempo de interverde, I , sendo o primeiro o tempo necessário para garantir uma determinada taxa de saturação, e o segundo o tempo entre o fim do verde dessa corrente e o início da fase seguinte, dado portanto pela soma do tempo de amarelo (verde intermitente no caso dos peões) e do tempo de limpeza dessa corrente de tráfego.

$$t_m = g + I \quad (44)$$

Designando-se por $u = g / C$, a proporção do tempo de verde útil a expressão anterior pode escrever-se

$$t = u C + I \quad (45)$$

No entanto, haverá também que garantir que este valor não é inferior a um valor mínimo ($g_m + I$), já definido no presente documento e normalmente correspondente a cerca de oito segundos, que garante condições mínimas de fluidez à corrente de tráfego. Assim pode-se considerar que o tempo mínimo passível de ser atribuído a essa corrente de tráfego será, genericamente, dado por:

$$t = \max(g_m + I; u C + I) \quad (46)$$

Por outro lado o valor de u pode ser obtido fixando um valor máximo admissível para o grau de saturação x_p , de forma a incorporar uma “margem de segurança” permitindo que o plano acomode picos de procura pontuais, e atendendo ao conceito de grau de saturação (ver expressão (36)) resulta:

$$u = y_c / x_p \quad (47)$$

A expressão (46) permite determinar o tempo a atribuir a uma determinada corrente de tráfego para garantir a taxa de saturação x_p para o ciclo C .

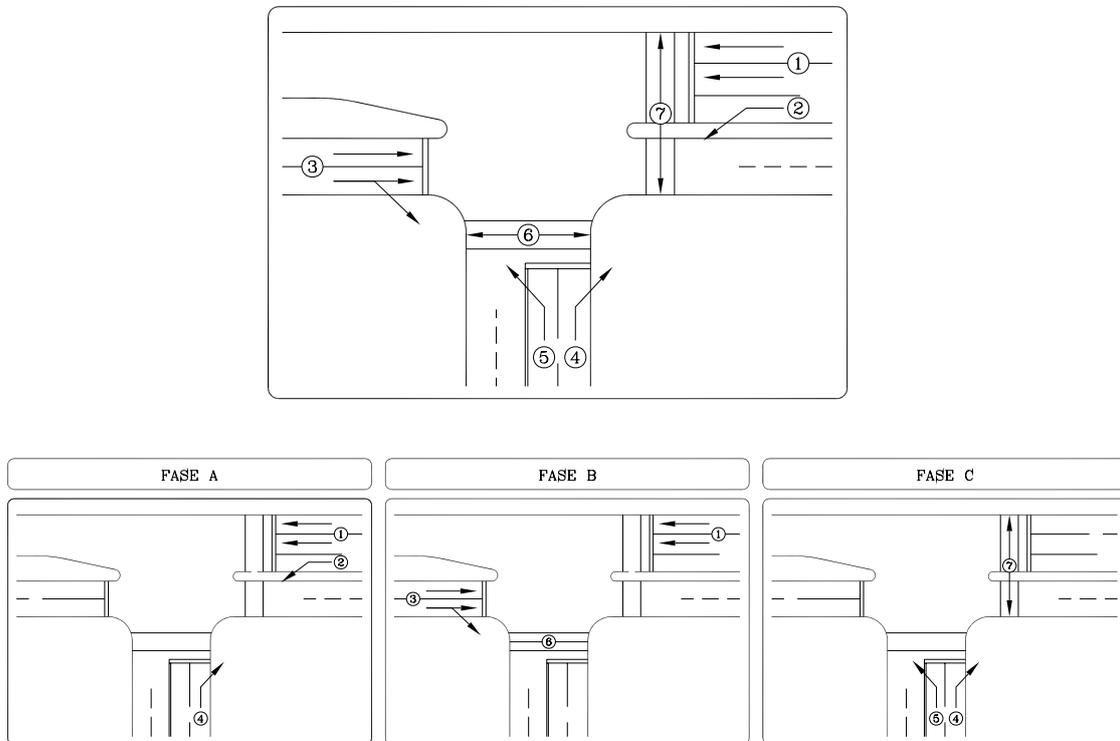


Figura 22 – Exemplo MAA 1: sequência de fases

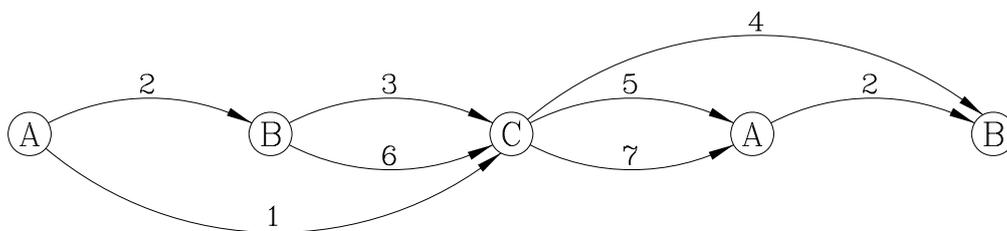


Figura 23 – Exemplo MAA 1: rede de circuitos críticos

O Método Australiano Adaptado resulta da aplicação sucessiva de um conjunto de etapas de cálculo.

Na primeira etapa, depois de construída a rede e efectuada uma primeira caracterização quantitativa desta, para o que como é fácil constatar a partir das expressões anteriores, é necessário arbitrar um valor de ciclo de arranque, de modo a permitir uma primeira estimativa dos tempos mínimos a atribuir a cada corrente, usa-se um método de determinação de circuitos críticos, mais longos, através do que é feita uma primeira estimativa de quais são as correntes de tráfego críticas.

Passa-se então para uma segunda etapa onde se inicia um processo iterativo de confirmação das correntes críticas e de quantificação do ciclo óptimo:

No primeiro passo do processo iterativo usa-se a metodologia Webster para calcular o ciclo óptimo tendo como correntes de tráfego críticas as definidas na etapa anterior;

No segundo passo é feita uma nova identificação das correntes de tráfego críticas através de uma nova estimativa dos tempos mínimos das diversas correntes usando o ciclo óptimo calculado no passo anterior;

No terceiro passo verifica-se se há coincidência entre as duas últimas estimativas do conjunto de correntes críticas. Se não existir volta-se ao primeiro passo do processo iterativo. Se existir, termina-se este processo e passa-se à etapa seguinte do método.

Conhecidas as correntes de tráfego críticas, na terceira etapa do método retoma-se a metodologia Webster no cálculo dos tempos de verde das várias correntes de tráfego.

O método é facilmente compreendido com a ajuda de um exemplo numérico para o que se vai usar o cruzamento e correspondente plano de regulação já apresentado nas figuras 22 e 23. Os dados sobre a procura, débitos de saturação, tempos de verde mínimos e tempos de interverde estão indicados na Tabela 3, onde são também desenvolvidos os cálculos subsequentes. O processo completo é descrito de seguida:

1. Construção da rede de circuitos críticos:
 - a. Desenhar nós desde a fase A até à fase A em sequência (A, B, C, A...)
 - b. Ligar os nós por arcos de acordo com as fases de início e fim de cada corrente tendo em atenção que, como já referido,, muitas vezes, é necessário expandir a rede por adição de nós já que não é possível caminhar para trás
 - c. Continuar a ligar os nós até que todas as correntes estejam indicadas na rede (como referido acima, pode parar-se a construção da rede neste ponto, mas a quantificação dos tempos de verde a partir da repartição do ciclo, é facilitada se forem expostos todos os circuitos possíveis, tal como se fez na Figura 23).
2. Para um ciclo inicial, de arranque, normalmente 100 s, e admitindo um determinado grau de saturação, normalmente 0,85, determinar o tempo necessário para cada uma das correntes:
 - a. Calcular $y_c = q / s$; $u = y_c / 0,85$
 - b. Calcular o tempo mínimo imposto pelo critério de verde mínimo: $g_m + I$
 - c. Determinar o tempo necessário para $x = 0,85$: $u C + I$

d. Atribuir à corrente o tempo $t = \max[(g_m + I), (u C + I)]$

3. Determinar o circuito crítico

- a. Anotar na rede os tempos t obtidos no ponto 1.d
- b. Identificar o circuito mais demorado. Tendo em conta que normalmente a rede apresentada é simples esta determinação não requer a aplicação de algoritmos de circuitos críticos, bastando a simples enumeração por visualização dos circuitos possíveis e a respectiva comparação para se obter o circuito de tempo total máximo.

Neste ponto é conveniente proceder à simplificação da rede, eliminando circuitos garantidamente não críticos. Assim, no presente caso, tanto a CT 3 como a CT 6 estabelecem a ligação entre os nós B e C, mas como a CT 6 requer menos tempo (15 s) do que a CT 3 (38 s), basta admitir esta última como possível crítica. O mesmo se passa entre as CT 5 e 7, sendo neste caso indiferente considerar qualquer uma como possível crítica já que, por coincidência, ambas requerem o mesmo tempo.

Tem-se então, de A para A, as seguintes alternativas: [2-3-5], $t = 25 + 38 + 18 = 81$; [1-5], $t = 28 + 18 = 46$; e de B para B: [3-4], $t = 38 + 60 = 98$. Assim, para o ciclo arbitrado de 100 s, o circuito crítico é formado pelas CT 3 e 4.

4. Calcular o tempo perdido total, a carga da intersecção, e o ciclo óptimo

- a. A carga da intersecção, Y , é dada pelo somatório dos índices de carga das correntes críticas: $Y = Y_{c3} + Y_{c4} = 0,282 + 0,468 = 0,750$. Caso alguma das correntes críticas tivesse o seu tempo $t = t_m$, então o índice de carga dessas correntes seria excluído no cálculo de Y
- b. O tempo perdido total, L , é dado pelo somatório dos tempos de interverde das correntes críticas: $L = I_3 + I_4 = 5 + 5 = 10$ s. Note-se que, caso alguma das correntes críticas tivesse o seu tempo $t = t_m$, então neste cálculo entraria o valor de $t = t_m$ e não apenas de I . O mesmo se passa com as correntes pedonais que, se forem críticas contribuirão com $t = g_m + I$ para o tempo perdido total
- c. O ciclo óptimo é dado pela fórmula de Webster (embora se possa adoptar uma expressão alternativa): $C_o = (1,5 L + 5) / (1 - Y) = 80$ s.

5. Confirmar se o circuito crítico se mantém

- a. Calcular os novos valores de $u C + I$, agora para $C = 80$ s.
- b. Atribuir à corrente o tempo $t' = \max[(g_m + I), (u C + I)]$

- c. Determinar o circuito crítico. Após a exclusão das CT 6 e 5, os possíveis circuitos críticos são: [2-3-7], $t = 21 + 32 + 18 = 71$; [1-7], $t = 24 + 18 = 42$; e de B para B: [3-4], $t = 32 + 49 = 81$. Confirma-se portanto que as CT 3 e 4, ao formarem o circuito mais demorado, são críticas.
- d. Se o circuito crítico for diferente daquele que foi identificado em 3.b, é necessário voltar ao ponto 4 e recalculer os parâmetros da intersecção (L , Y e C_0)

6. Determinar os tempos de verde

- a. Correntes críticas – atribuir o tempo de verde em função do índice de carga:

$$g_3 = (C - L) \times y_{c3} / Y = (80 - 10) \times 0,282 / 0,750 \approx 26 \text{ s};$$

$$g_4 = (C - L) \times y_{c4} / Y = (80 - 10) \times 0,468 / 0,750 \approx 44 \text{ s};$$

- b. Correntes não-críticas

$$g_6 = g_3 + I_3 - I_6 = 26 + 5 - 10 = 21 \text{ s}$$

Para o cálculo do tempo de verde das CT 5 e 2 é aconselhável representar na rede a ligação que a CT 2 estabelece entre os dois últimos nós (que não foi necessária para identificar as correntes críticas). Verifica-se que:

$$g_5 + I_5 + g_2 + I_2 = g_4 + I_4 \Leftrightarrow g_5 + 5 + g_2 + 6 = 44 + 5 \Leftrightarrow g_5 + g_2 = 38 \text{ s}.$$

A repartição de verde por estas duas correntes deverá ser feita em função do índice de carga, para que fiquem com a mesma taxa de saturação:

$$g_5 = g_{5,2} \times y_{c5} / (y_{c5} + y_{c2}) = 38 \times 0,114 / (0,114 + 0,159) = 16 \text{ s}$$

$$g_2 = g_{5,2} \times y_{c2} / (y_{c5} + y_{c2}) = 38 \times 0,159 / (0,114 + 0,159) = 22 \text{ s}$$

É agora possível determinar o tempo de verde disponível para as CT 1 e 7:

$$g_1 = g_2 + I_2 + g_3 + I_3 - I_1 = 22 + 6 + 26 + 5 - 6 = 53 \text{ s}$$

$$g_7 = g_5 + I_5 - I_7 = 16 + 5 - 13 = 8 \text{ s}$$

Tabela 3 - Exemplo MAA 1: tabela-resumo

Dados								C = 100		C = 80			
CT	g_M	I	q	s	y_c	u	$g_M + I$	$c.u + I$	t	$c.u + I$	t'	g	x
1	8	6	650	3480	0.187	0.220	14	28	28	24	24	54	0.28
2	8	6	240	1510	0.159	0.187	14	25	25	21	21	22	0.58
3	8	5	920	3260	0.282	0.332	13	38	38	32	32	26	0.87
4	8	5	580	1240	0.468	0.550	13	60	60	49	49	44	0.85
5	8	5	170	1490	0.114	0.134	13	18	18	16	16	16	0.57
6	5	10					15		15	10	15	21	
7	5	13					18		18	13	18	8	

IV.4 Indicadores de desempenho

A qualidade das condições de funcionamento de um cruzamento (ou ramo de entrada) regulado por sinais luminosos pode ser avaliada com recurso a vários indicadores de desempenho, dos quais se destacam a capacidade de reserva e o atraso que a seguir serão apresentados.

IV.4.1 Capacidade de reserva ou margem de crescimento

Frequentemente é igualmente usado o conceito de capacidade de reserva ou margem de crescimento que corresponde à percentagem de aumento de tráfego que uma determinada corrente de tráfego pode ainda sofrer, sendo, portanto, para um débito de chegada q e a respectiva capacidade Q , dada por:

$$Q_r = \frac{Q - q}{q} \quad (48)$$

Admitindo que a taxa de crescimento de tráfego é igual em todas as correntes de tráfego mantendo-se, portanto, a proporcionalidade entre os débitos, a capacidade de reserva ou margem de crescimento do tráfego do cruzamento pode ser calculada através de:

$$Q_r = \frac{Y_{máx} - Y}{Y} \quad (49)$$

Sendo Y o índice de carga do cruzamento e $Y_{máx}$ o valor máximo que pode tomar Y , o que acontecerá quando para cada ramo de entrada o número de veículos que chega durante um ciclo é igual ao número máximo de veículos que podem partir nesse período, isto é, $qC = sg$, e atendendo ao critério de repartição do tempo de verde resulta,

$$Y_{máx} = \frac{C - L}{C} \quad (50)$$

ou, pretendendo-se adotar a margem de segurança, ficando um pouco aquém (90%) do número máximo de partidas virá,

$$Y_{máx} = 0,9 \frac{C - L}{C} \quad (51)$$

IV.4.2 Atraso

Existem vários modelos propostos na bibliografia especializada para a determinação do atraso, recorrendo a métodos diversos entre os quais se salientam a utilização da simulação em computador ou os modelos de filas de espera.

No caso do modelo desenvolvido por Webster obtida por simulação em computador o valor do atraso médio por veículo é dada por:

$$d = \frac{C \left(1 - \frac{g}{C}\right)^2}{2 \left(1 - x \frac{g}{C}\right)} + \frac{x^2}{2q(1-x)} - 0,65x \left(\frac{C}{q^2}\right)^{\frac{1}{3}} \left(2 + 5 \frac{g}{C}\right) \quad (52)$$

com,

d – atraso médio por veículo

C – duração do ciclo

g – tempo de verde útil

x – grau de saturação

q – débito de chegadas

ou, através da expressão simplificada,

$$d = 0,9 \frac{C \left(1 - \frac{g}{C}\right)^2}{2 \left(1 - x \frac{g}{C}\right)} + \frac{x^2}{2q(1-x)} \quad (53)$$

Tal como referido anteriormente o atraso serve directa ou indirectamente através da sua combinação com outros parâmetros para fixar os critérios de optimização em certos programas de cálculo do plano de regulação por sinais luminosos. A edição de 2000 do Highway Capacity Manual usa o atraso médio por veículo para definir os níveis de serviço em cruzamentos regulados por sinalização luminosa, conforme se mostra na Tabela 4.

Tabela 4 – Critérios do nível de serviço

Níveis de Serviço	Atraso médio (s)
A	≤10
B	>10-20
C	>20-35
D	>35-55
E	>55-80
F	>80

IV.4.3 Fila de espera

O estudo da fila de espera em ramos de entrada regulados por sinais luminosos tem sido intensivamente tratado teoricamente através da aplicação de modelos estocásticos de filas de espera, cuja descrição ultrapassa o âmbito deste texto.

Em sua substituição podem usar-se modelos mais simples que admitem um comportamento determinista do tráfego, quer no que se refere ao processo de chegadas, quer às partidas.

Assim, admitindo que o ciclo é não saturado, isto é a fila de espera extingue-se antes de terminar o tempo de verde, a fila de espera máxima N_u que ocorrerá no início do verde é igual ao número de veículos que chegam durante o tempo em que não pode haver partidas, isto é,

$$N_u = q(C - g) \quad (54)$$

onde,

q – débito de chegadas

C – duração do ciclo

G – tempo de verde útil

No caso de haver ciclos saturados e não saturados, ao valor de N_u dado por (54) ter-se-á de somar o número médio de veículos, N_o , presentes no início do verde, cujo valor pode ser calculado recorrendo-se à seguinte expressão:

$$N_o = \frac{QT_f}{4} \left(z + \sqrt{z^2 + \frac{12(x - x_o)}{QT_f}} \right) \quad (55)$$

sendo,

N_o número total de veículos retidos em fila de espera após o verde

Q capacidade [veíc./h]

T_f período de tempo [h] em que se existe o débito q

x grau de saturação

$z = x - 1$

$x_o = 0,67 + s \cdot g / 600$

Admite-se que para valores do grau de saturação inferiores a x_o será nulo o valor de N_o . Por outro lado o valor de T_f não tem um efeito significativo para valores de $x < 0,9$. Pelo contrário, com valores de $x > 1$, isto é, quando o débito excede a capacidade, a influência do tempo T_f em que esta situação ocorre é grande.

Por vezes mais importante do que saber-se o número máximo de veículos na fila de espera é conhecer qual a distância da linha de paragem ficará o último veículo a ficar retido na fila de espera.

Isto é, atendendo a que durante a partida dos veículos continuam a chegar veículos que se juntam na parte de trás da fila, esta, embora diminuindo, em condições abaixo da saturação, fica a uma distância cada vez maior da linha de paragem, pelo que a fila máxima não coincidirá com a extensão máxima de via onde termina a fila de espera.

O valor da distância máxima da linha de paragem em que há fila pode ser obtido a partir da determinação do número de veículos N que chegam durante o tempo de vermelho e o tempo de verde saturado, ou seja, com fila de espera, dado por:

$$N = q(C - g + g_s) \quad (56)$$

com,

q – débito de chegadas

C – duração do ciclo

g – tempo de verde útil

g_s – tempo de verde útil saturado

Substituindo o valor de g_s dado por (15) vem,

$$N = q \left(C - g + y \frac{C - g}{1 - y} \right) \quad (57)$$

ou designando por d_j o espaçamento médio dos veículos enfileirados, a distância máxima d_m à linha de paragem é,

$$d_m = q d_j \left(C - g + y \frac{C - g}{1 - y} \right) \quad (58)$$

É de notar que a expressão (57) e consequentemente (58) diz respeito ao total de veículos, pelo que se a corrente de tráfego dispõe de n vias é necessário dividir as expressões anteriores por n .

IV.5 O Tratamento das viragens à esquerda

Os movimentos de viragem à esquerda justificam frequentemente um tratamento especial, já que o seu avanço conflitua com o tráfego que circula no ramo de entrada do sentido oposto. A gama de soluções disponível depende não só dos volumes de tráfego envolvidos, mas também da geometria do cruzamento.

As manobras de viragem à esquerda só podem ser realizadas ou durante o período de limpeza no caso dos veículos terem entrado para o interior do cruzamento, ou se lhes for proporcionado um intervalo de tempo aceitável entre veículos sucessivos da corrente de

tráfego que lhes faz oposição, ou, ainda, criando uma fase específica para o avanço dos movimentos de viragem à esquerda. Assim, as soluções propostas podem reunir-se em três grupos:

- Integração dos movimentos de viragem à esquerda nas fases destinadas a outros movimentos (solução já acima apresentada);
- Criação de uma sub-fase antecipando o fim do tempo de verde do movimento que faz oposição ou retardando o seu início;
- Criação de uma fase especial.

Cada um destes grupos de soluções será analisado de seguida.

IV.5.1 Viragens à esquerda sem tratamento especial

Se os débitos de tráfego das viragens à esquerda não forem significativos, como já foi referido acima, é possível integrar estes movimentos no esquema de fases proposto para o cruzamento, sem qualquer tratamento diferenciado.

Isto acontece porque se admite que as viragens à esquerda serão efectuadas quer durante o tempo de verde não saturado (vide II.5.4.3) aceitando os intervalos entre veículos prioritários superiores ao intervalo crítico, quer durante o tempo de vermelho integral.

Assim, admitindo uma capacidade de "stockagem" no interior do cruzamento de n_s veículos e sendo n_u o número de veículos que em cada ciclo podem beneficiar dos intervalos de tempo aceitáveis na corrente de tráfego oposta, a procura será satisfeita caso se respeite a seguinte expressão

$$n_e = q_e C < n_u + n_s \quad (59)$$

sendo n_e o número de veículos que em cada ciclo pretende virar à esquerda.

Tal significa que, mesmo em condições desfavoráveis em que não chega a haver um período de verde não saturado e portanto $n_u = 0$, e considerando que, em princípio, um cruzamento de geometria normal tem no seu interior espaço para dois veículos, isto é, $n_s = 2$, o débito das viragens à esquerda não poderá ultrapassar $2 \times 3600/C$.

Este resultado justifica o valor de 100 veic/h, já acima referido, normalmente tomado como referência relativamente à capacidade mínima das viragens à esquerda sem necessidade de adopção de quaisquer medidas que protejam as viragens à esquerda.

Esta solução requer ainda que os movimentos de peões sejam devidamente acautelados, pois que a criação de apenas duas fases pode criar situações de perigo potencial, em particular quando se autoriza o avanço simultâneo das viragens à esquerda com o movimento de peões conflituante. Uma forma de ultrapassar este problema poderá ser a adopção de uma fase especial exclusiva para o avanço de todos os movimentos de peões.

IV.5.2 Viragens à esquerda com redução do tempo de verde do ramo de entrada oposto

Se não forem suficientes as oportunidades oferecidas aos veículos das viragens à esquerda, particularmente se tal acontece num único ramo de entrada, deve ser encarada a hipótese de ser reduzido o tempo de verde destinado aos veículos prioritários que com eles conflituam, permitindo, assim, que as viragens à esquerda possam, durante um período de tempo significativo, ser efectuadas sem conflito.

O valor desta redução h pode ser obtido tendo em conta que este tempo vai ser utilizado pelo excesso de veículos de viragens à esquerda que não tiveram possibilidade de avançarem, partindo com um intervalo médio de cerca de 2,5 segundos, isto é,

$$h = 2,5(n_e - n_u - n_s) \quad (60)$$

em que n_e , n_u e n_s se referem ao número de veículos que pretendem virar à esquerda que chegam durante um ciclo, que avançam nos intervalos de tempo aceitáveis da corrente de tráfego oposta e que podem ficar retidos no interior do cruzamento, respectivamente.

Para que esta redução seja possível efectuar-se, sem penalizar a corrente de tráfego do sentido oposto é necessário garantir que o tempo de verde que lhe resta é suficiente para escoar estes veículos, isto é,

$$\frac{(q/s)_{op}}{Y} < \frac{g - h}{C - L} \quad (61)$$

sendo,

$(q/s)_{op}$ – quociente entre o débito de chegadas e o débito de saturação da corrente de tráfego oposta

Y – índice de carga do cruzamento

g – tempo de verde útil inicial da corrente de tráfego oposta

h – redução do tempo de verde para atender às viragens à esquerda

C – duração do ciclo

L – tempo perdido por ciclo

A redução do tempo de verde oposto pode fazer-se por antecipação do fim do verde ou por retardamento do início do verde, o que na literatura especializada é designado por *early cut-off* ou *late release*, respectivamente.

No caso do *early cut-off* que se mostra esquematicamente na Figura 24, onde se representam apenas as correntes de tráfego e as fases relevantes, verifica-se que as viragens à esquerda podem avançar no tempo de verde da fase B, quando se interrompeu a passagem dos veículos provenientes do ramo oposto.

Tal obriga a que no cruzamento haja espaço suficiente para a espera dos veículos que pretendam efectuar a manobra de viragem à esquerda.

Note-se que esta estratégia também é consistente com a eventual existência de amarelo intermitente para corrente de tráfego 2 durante a fase A.

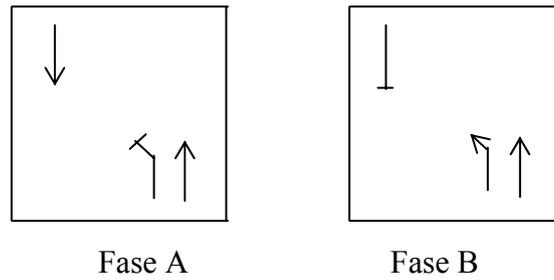


Figura 24 – *Early cut-off*

Pelo contrário, no caso de late-release (Figura 19) as viragens à esquerda são permitidas no início do verde, adiando-se a permissão de avanço para a corrente de tráfego oposta.

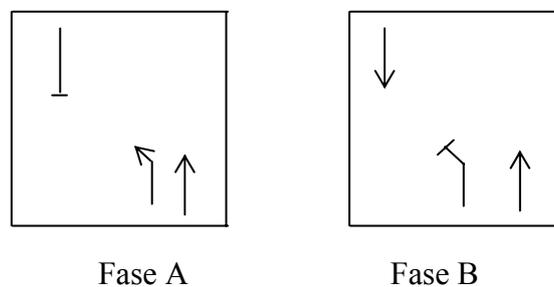


Figura 25 – *Late release*

Desta forma a exigência de espaço para a permanência de veículos de viragem à esquerda não é tão necessária como no caso anterior. No entanto, o *late-release* é, sob o ponto de vista da segurança, uma solução pior, já que o avanço das viragens à esquerda (corrente de tráfego 2) ocorre simultaneamente com a corrente de tráfego 3 mas tem o seu fim antecipado ou a sua continuação mas com oposição da corrente de tráfego oposta entretanto aberta, o que pode provocar confusão nos condutores, o mesmo não acontecendo com o *early cut-off*. Pode também com o *late-release* os atrasos médios serem superiores, devido a não haver veículos de viragem à esquerda no início do tempo de verde, por estarem impedidos de chegar à via segregada pelo restante tráfego que segue em frente fechando a entrada para esta via.

Em qualquer destes casos para a identificação das correntes de tráfego críticas, uma vez que há correntes de tráfego com avanço em mais do que uma fase, deve usar-se o procedimento descrito em IV.2.6 ou o descrito em IV.3

IV.5.3 Viragens à esquerda com fase exclusiva

A fase exclusiva para as viragens à esquerda só pode ser criada se o ramo de entrada que lhe diz respeito tiver espaço suficiente para ser adoptada uma via exclusiva para as

viragens à esquerda, cujo comprimento deverá permitir a espera dos veículos que têm de aguardar pela permissão de avanço.

Admitindo ser q_e , em veíc/h, o débito das viragens à esquerda, o número médio dos veículos n_e que chegam durante um ciclo C será igual a:

$$n_e = q_e \frac{C}{3600} \quad (62)$$

e o número máximo de veículos na fila de espera admitindo chegadas aleatórias (distribuição de Poisson) e para o percentil de 95% é:

$$n_{máx} = n_e + 1,7\sqrt{n_e} \quad (63)$$

É este último valor que, juntamente com o comprimento médio de um veículo, determinará a extensão total da via exclusiva.

Para além da condição expressa anteriormente, existem outros critérios relacionados com os volumes de tráfego, atrasos e sinistralidade para a criação de fases especiais para as correntes de tráfego de viragem à esquerda. Em certos países são usados os seguintes critérios:

- Volumes de tráfego (hora de ponta)

Em ramos de quatro vias: $q_e \times q_p > 100.000$ (veíc/h)²

Em ramos de duas vias: $q_e \times q_p > 50.000$ (veíc/h)² e $n_e > 2$ veíc/ciclo

com q_e e q_p os débitos das viragens à esquerda e da corrente de tráfego prioritária, respectivamente e n_e o número médio de veículos que chegam durante um ciclo.

- Atrasos (hora de ponta)

$D_e > 2$ veic \times h e $d_e > 35$ s/veic e $n_e > 2$ veíc./ciclo

com D_e e d_e o atraso total e o atraso médio das viragens à esquerda, respectivamente

- Sinistralidade (viragens à esquerda)

4 acidentes por ano ou 6 acidentes em 2 anos

No caso de em dois ramos de entrada opostos serem verificadas condições que obriguem a tratamento especial das viragens à esquerda, existem duas soluções possíveis:

Agrupar as viragens à esquerda numa mesma fase (Figura 26), o que exige um cruzamento com dimensões que permitam o avanço simultâneo destes movimentos separados fisicamente;

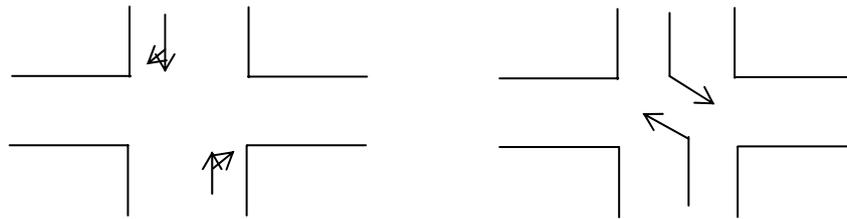


Figura 26 – Tratamento das viragens à esquerda – solução i

Fazer avançar à vez os veículos provenientes de cada uma das entradas, conforme se ilustra na Figura 27, o que geralmente obriga ao atravessamento pedonal dos ramos em duas fases com a criação de um placa central de refúgio além de que a capacidade global de escoamento do tráfego do cruzamento pode ser bastante afectada.

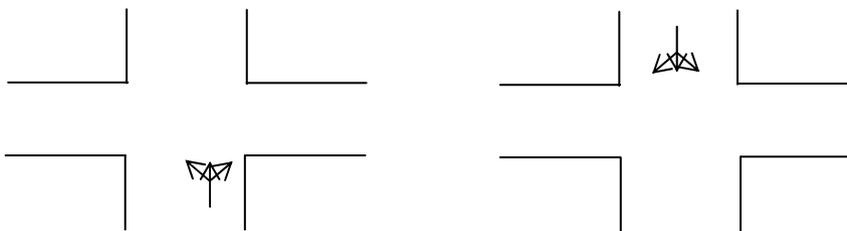


Figura 27 – Tratamento das viragens à esquerda – solução ii

A escolha da solução depende, para além das questões geométricas referidas anteriormente, dos volumes de tráfego envolvidos, sendo necessário, portanto, compará-las através de um cálculo expedito.

IV.6 O Tratamento das Vias curtas

Uma via curta (Figura 28) existe sempre que a via não tenha comprimento suficiente para alimentar as partidas de veículos durante o tempo de verde ao ritmo definido pelo débito de saturação, isto é, a via curta apenas vai contribuir para a partida de veículos na parte inicial do verde, enquanto não se esgotar a fila de veículos presente.

Assim, o efeito da via curta existe apenas quando a extensão da via disponível for inferior à distância máxima a que o último veículo retido na fila fica, cujo valor d_m é dado por (58)

O desconhecimento deste fenómeno leva muitas vezes a usar-se na definição do plano de regulação um débito de saturação superior ao que na realidade existe, conduzindo a soluções desajustadas.

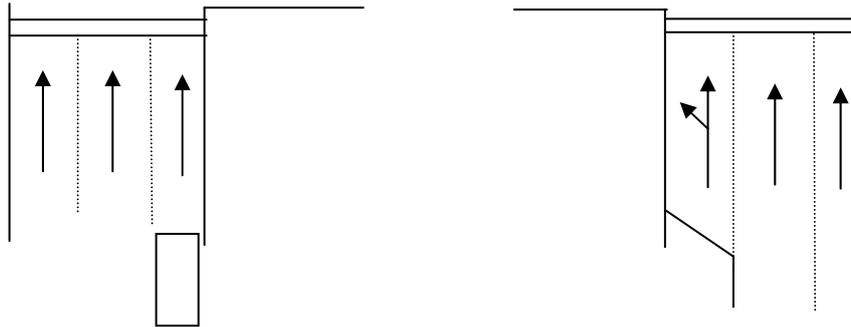


Figura 28 – Exemplos de vias curtas

O efeito das vias curtas no débito de saturação depende do valor do tempo de verde, cujo valor depende, por sua vez, do débito de saturação. Tal exige um procedimento iterativo até que se atinja o equilíbrio entre o débito de saturação calculado em função do tempo de verde e o usado para calcular o tempo de verde.

O procedimento para determinar o débito de saturação corrigido da via curta consiste nos seguintes passos:

- i. Admitir inicialmente que a via não é curta e usar o débito de saturação correspondente no cálculo do ciclo e respectiva repartição;
- ii. Recalcular o débito de saturação tendo em conta o tempo de verde atrás calculado;
- iii. Recalcular o ciclo e respectiva repartição, tendo em conta o novo débito de saturação determinado em (ii)
- iv. Repetir os passos (ii) e (iii) até que se atinja o equilíbrio.

O caso geral da determinação do débito de saturação de uma corrente de tráfego com duas vias sendo uma curta pode ser feito de forma semelhante ao procedimento adoptado no caso de vias partilhadas, isto é, através do recurso à média harmónica dos débitos de saturação relativos a cada uma das vias.

Para clarificar este assunto, apresenta-se de seguida um exemplo muito simples onde é necessário adoptar o processo iterativo no cálculo do débito de saturação.

Seja um cruzamento com duas fases (A e B) cujas correntes de tráfego críticas têm débitos iguais a $q_1 = 900$ veic/h e $q_2 = 600$ veic/h, respectivamente.

À corrente de tráfego 1 estão destinadas duas vias, uma das quais (via curta) apenas admite uma retenção máxima em fila de espera de quatro veículos. Assim, o débito de saturação s_1 desta corrente de tráfego é igual à soma do débito de saturação da via curta e o valor correspondente ao da outra via que será fixado em 1800 veic/h.

Quanto à corrente de tráfego 2 apenas tem uma única via, pelo que o débito de saturação será igualmente 1800 veic/h e o índice de carga será $y_2 = 600/1800 = 0,333$.

Admite-se, ainda, que o tempo perdido por ciclo é 10 segundos e o valor do ciclo admitindo a hipótese inicial de não haver via curta seria

$$C = 20/[1-(900/3600+600/1800)] = 48 \text{ segundos}$$

Os resultados do processo iterativo usado para determinar o débito de saturação corrigido da via curta mostram-se na Tabela 5, onde NC representa o número de veículos da corrente de tráfego 1 chegados por ciclo e p a proporções de veículos chegados por ciclo que dispõem de uma única via para escoarem, sabendo que $8/NC$ representa proporção de veículos que em cada ciclo beneficiam de duas vias.

Tabela 5 – Exemplo do cálculo do débito de saturação em vias curtas

Iteração	NC	p	s_l	y_l	Y	C_o
1						48
2	12	0,333	2700	0,333	0,666	60
3	14,99	0,466	2455	0,367	0,700	67
4	16,64	0,519	2369	0,380	0,713	70
5	17,41	0,541	2337	0,385	0,718	71
6	17,74	0,549	2324	0,387	0,720	71
7	17,87	0,552	2319	0,388	0,721	72
8	17,93	0,554	2317	0,388	0,721	72

Cálculos: $NC = 900 \times C / 3600$; $p = 1 - 8/NC$; $s_l = 1 / [(1-p) / 3600 + p/1800]$; $y_l = 900 / s_l$; $Y = 0,333 + y_l$; $C_o = 20 / (1-Y)$

IV.7 O Tratamento dos Peões

É evidente que ao identificar as fases deve desde logo ser previsto onde é permitido o avanço das correntes de tráfego de peões, tendo em conta a sua compatibilidade com os veículos. Na impossibilidade de, para o esquema de fases planeado, assegurar o avanço de todas as correntes de tráfego de peões sem conflito com o tráfego motorizado, é prática corrente promover o avanço dos peões simultaneamente com movimentos de veículos incompatíveis correspondendo às situações já identificadas de conflitos secundários, desde que a protecção do peão esteja completamente assegurada com

sinalização adequada que atribua claramente em caso de conflito os níveis de prioridade. Esta situação exige que se garantam condições de visibilidade e de legibilidade tais que o condutor, em cada caso, saiba sem hesitações o comportamento que deve adoptar.

Assim, enquanto é frequente existir em simultâneo uma viragem à direita com oposição do movimento de peões no ramo de destino, já o mesmo não se passa com a viragem à esquerda onde a velocidade do veículo e a eventual dispersão da atenção do condutor por diversos acontecimentos tornam este tipo de manobra mais perigosa.

As soluções para o tratamento dos peões dependem, assim, de vários factores, destacando-se a configuração geométrica do cruzamento e os volumes de tráfego envolvidos quer de veículos, quer de peões, tendo, portanto, que serem estudadas caso a caso, não raras vezes comparando-se o desempenho de duas ou mais soluções propostas.

Os tipos de soluções mais utilizados são:

- Atravessamento numa fase única
- Sem conflito com veículos
- Em simultâneo com as viragens (preferencialmente à direita)
- Exclusiva para todos os movimentos de peões
- Atravessamento em 2 fases (exige um local de espera para o peão)

No texto sobre peões este assunto é analisado com mais detalhe.

No que diz respeito ao método acima descrito para a determinação do plano de regulação é importante notar que este não tem directamente em consideração a presença dos peões, nem na definição da função objectivo nem na formulação das restrições.

No entanto existem alguns aspectos de modelação, onde as necessidades dos movimentos pedonais são tidas em consideração:

- Tempos mínimos das fases têm em atenção os tempos mínimos de verde dados aos peões mais os seus tempos de limpeza;
- Duração de fases só para peões incorporada no tempo perdido total do ciclo.

Um outro aspecto muito importante no tratamento de peões diz respeito ao tempo de limpeza necessário para que o peão uma vez iniciado o atravessamento o possa concluir antes da abertura do sinal verde para a corrente de tráfego de veículos conflituante.

Este tempo determina o instante final do tempo de verde fixo para o peão, o que se traduz pelo último momento em que o peão pode iniciar a sua marcha, decorrendo a seguir o tempo de limpeza até à abertura do sinal verde para os veículos.

Assim, considera-se que a existência eventual do tempo de verde intermitente para o peão deve ser incorporada no tempo de limpeza e que o facto do peão poder fazer o trajecto durante o tempo de vermelho, fá-lo em total segurança e legitimamente.

O tempo de limpeza obtém-se pelo quociente entre o comprimento do atravessamento e a velocidade do peão, que para o efeito, pode considerar-se entre 1 e 1,2 m/s.

Finalmente o tempo de verde destinado aos peões não depende, tendo em conta o referido anteriormente e como erradamente por vezes é considerado da extensão do atravessamento, mas sim do volume de peões. Já em II.4.2.2 se referiu o Decreto-Lei nº 123/97 que determina para o dimensionamento do tempo de verde dos peões uma velocidade para o peão, ignorando o tempo de limpeza, este sim, determinado em função da velocidade do peão. Em geral aceita-se um valor mínimo de 6 segundos, aumentando de 2 em 2 segundos por cada fila de peões acima de três perpendicular ao atravessamento, que se forma a aguardar o sinal verde. Isto é, admitindo que no início do verde existem 40 peões em filas de 10 peões cada uma, a duração do verde fixo será de 8 segundos.

IV.8 Soluções de apoio aos transportes colectivos

As mais recentes políticas de mobilidade dirigidas para o objectivo de sustentabilidade do sistema levam a que, cada vez mais, se desenvolvam as soluções de gestão operacional dos vários sub-sistemas de transportes em geral, e as infra-estruturas em particular numa lógica de optimização virada para maximização do número de utentes servidos, por oposição a uma lógica de maximização do número de veículos servidos.

Tal leva à necessidade de desenvolvimento de soluções de regulação operacional da infra-estrutura rodoviária em geral e dos cruzamentos em particular capazes de garantirem, de uma forma inteligente, uma discriminação positiva dos modos de transportes mais eficientes a transportar pessoas, os transportes colectivos.

Existe um conjunto diferenciado de diferentes soluções aplicáveis às situações em que um, ou mais, dos eixos de acesso a um cruzamento regulado por sinais luminosos apresenta corredores BUS.

Estas soluções podem apresentar diferentes níveis de prioridade relativa atribuída aos modos mais eficientes, dependendo do impacto negativo que for considerado aceitável relativamente ao transporte motorizado individual ou das consequências ao nível sistémico que as soluções adoptadas ao nível de um cruzamento possam ter.

Estas soluções podem também ser totalmente passivas, ou implicarem a detecção em tempo real dos veículos a privilegiar e a utilização dessa informação na lógica do plano de regulação.

Estas soluções podem finalmente ter uma lógica de apoio indiscriminado a todos os veículos prioritários, ou uma lógica de apoio selectivo aos veículos mais necessitados.

Uma solução conceptualmente muito simples e que, numa primeira análise, representa uma atribuição de grande prioridade ao transporte colectivo (TC), corresponde à situação em que o corredor BUS na(s) via(s) de acesso ao cruzamento é prolongado mesmo até à linha de paragem (ver a Figura 29).

Neste caso, a compatibilização dos conflitos entre as correntes de tráfego motorizado individual e colectivo obriga à adopção de duas fases consecutivas para servir a mesma entrada do cruzamento.

Esta situação tende a resultar em soluções de regulação dos sinais luminosos muito pouco eficientes do ponto de vista da optimização da capacidade de circulação de veículos, gerando em alguns casos situações de congestionamento significativas que se poderão mesmo espalhar pelos restantes elementos da rede, resultando nesses casos em impactos globalmente negativos mesmo para os TC.

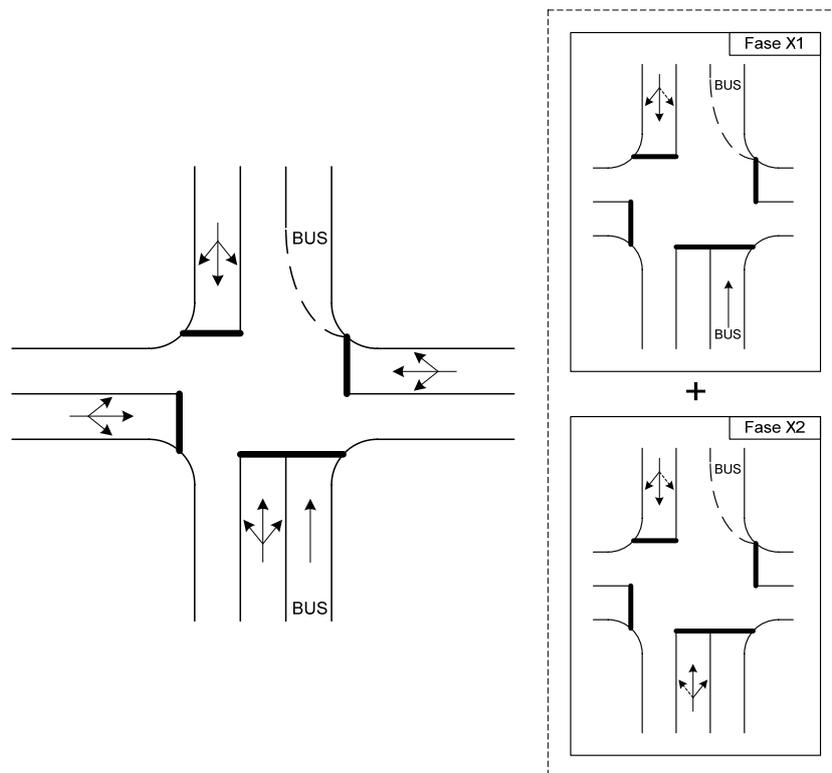


Figura 29 – Solução de regulação com geometria sem interrupção do corredor BUS

Como alternativa, é mais comum o desenvolvimento de soluções de regulação de cruzamentos por sinais luminosos onde se interrompe o desenvolvimento dos corredores

BUS em determinados troços imediatamente a montante e a jusante dos cruzamentos (ver a Figura 30).

Este tipo de solução ao permitir o serviço de todas as correntes de tráfego da entrada de uma só vez, representa um compromisso interessante entre a necessidade de privilegiar a circulação dos TC ao longo de eixos prioritários, e a necessidade de garantir níveis significativos de capacidade no cruzamento.

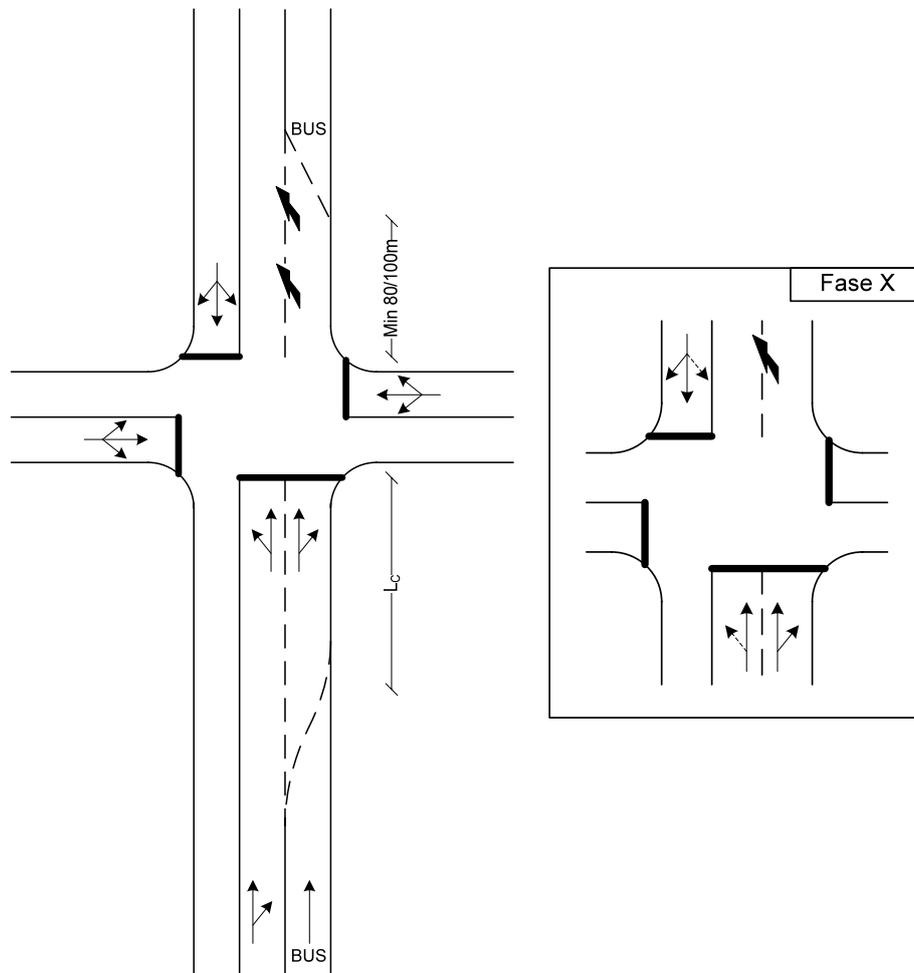


Figura 30 – Solução de regulação com geometria com interrupção do corredor BUS

No entanto para que a solução permita, de facto, oferecer adequadas condições de fluidez de circulação para os TC será necessário que a interrupção do corredor BUS seja implantada de acordo com um conjunto de regras.

A montante do cruzamento a interrupção do corredor BUS deverá criar uma via adicional com uma capacidade de *stockagem* inferior ao número total de veículos passíveis de entrar no cruzamento durante o período de verde da fase que serve essa entrada, criando assim uma via curta para o tráfego geral, de modo a que qualquer veículo de TC tenha praticamente certa a possibilidade de ser servido no primeiro

período de verde disponível após a sua chegada às proximidades do cruzamento. Assim o comprimento máximo da via curta deverá ser:

$$L_c = 6(v/2 - 1) - 15(n - 1) \quad (64)$$

sendo:

L_c – comprimento máximo da via curta

v – duração do verde da fase

n – n.º de autocarros a servir em cada ciclo

A jusante do cruzamento o reaparecimento do corredor BUS deverá ocorrer a uma distância mínima que garanta que os veículos automóveis que acedem ao cruzamento pela entrada oposta e se deslocam paralelamente ao sentido do corredor BUS, são suficientemente atraídos a utilizarem a via curta aí criada.

Para tal é recomendável que esse reaparecimento ocorra a pelo menos 100 metros após o cruzamento com um mínimo desejável de 80 metros garantindo assim uma transição suficientemente suave de um perfil com duas vias para outro com apenas uma. Em situações excepcionais, e devidamente justificadas, poderá mesmo assim ser aceitável a adopção de valores um pouco inferiores aos recomendados (ver ainda a Figura 30).

As soluções atrás descritas, ao contrário da apresentada na Figura 31, destinam-se a regular as situações em que os circuitos de TC que acedem ao cruzamento usando o corredor BUS apenas têm continuidade em frente ou para o arruamento à direita.

De facto, quando alguns dos autocarros precisam de poder virar à esquerda, a solução de regulação tendencialmente óptima implica a utilização de uma linha de paragem semaforizada auxiliar e a aplicação de uma sequência de subfases específica (ver a Figura 31) capaz de garantir que todos os veículos de TC vindos do corredor BUS têm a possibilidade de se posicionar na via adequada ao movimento direccional desejado, e que o poderão fazer à frente dos veículos comuns quando a fase principal que os serve for activada.

Existe ainda a possibilidade de implementação de soluções activas de apoio ao TC através da instalação de sistemas de detecção em tempo real da aproximação ao cruzamento por parte destes veículos.

Tal pode ser concretizado através da colocação de detectores a alguma distância do cruzamento, nas vias reservadas ao TC, particularmente se estas não são utilizáveis por outros veículos como sejam os Táxis ou HOV.

Caso tal aconteça será normalmente preferível a instalação nos veículos de TC de *transponders* capazes de emitir impulsos passíveis de reconhecimento por receptores localizados a alguma distância a montante do cruzamento. A informação recolhida nos

sensores comuns ou nos receptores é depois transmitida em tempo real ao controlador do cruzamento podendo depois ser utilizada para, na medida do possível, manipular a “janela” de verde que serve a entrada, no sentido de atrasar o seu fecho quando um veículo de TC se aproxima durante o período final da fase, ou no sentido de antecipar a sua abertura se este se aproxima mais cedo. Este tipo de estratégia de regulação é de uso corrente na regulação das prioridades relativas entre sistemas rodoviários e sistemas ferroviários ligeiros do tipo metro ligeiro de superfície.

Note-se que este tipo de solução só é viável quando no cruzamento os TC apenas existem ao longo de um dos eixos rodoviários que aí se cruzam já que, de outro modo, o benefício de um dos eixos de aproximação tenderia a ser obtido à custa do outro.

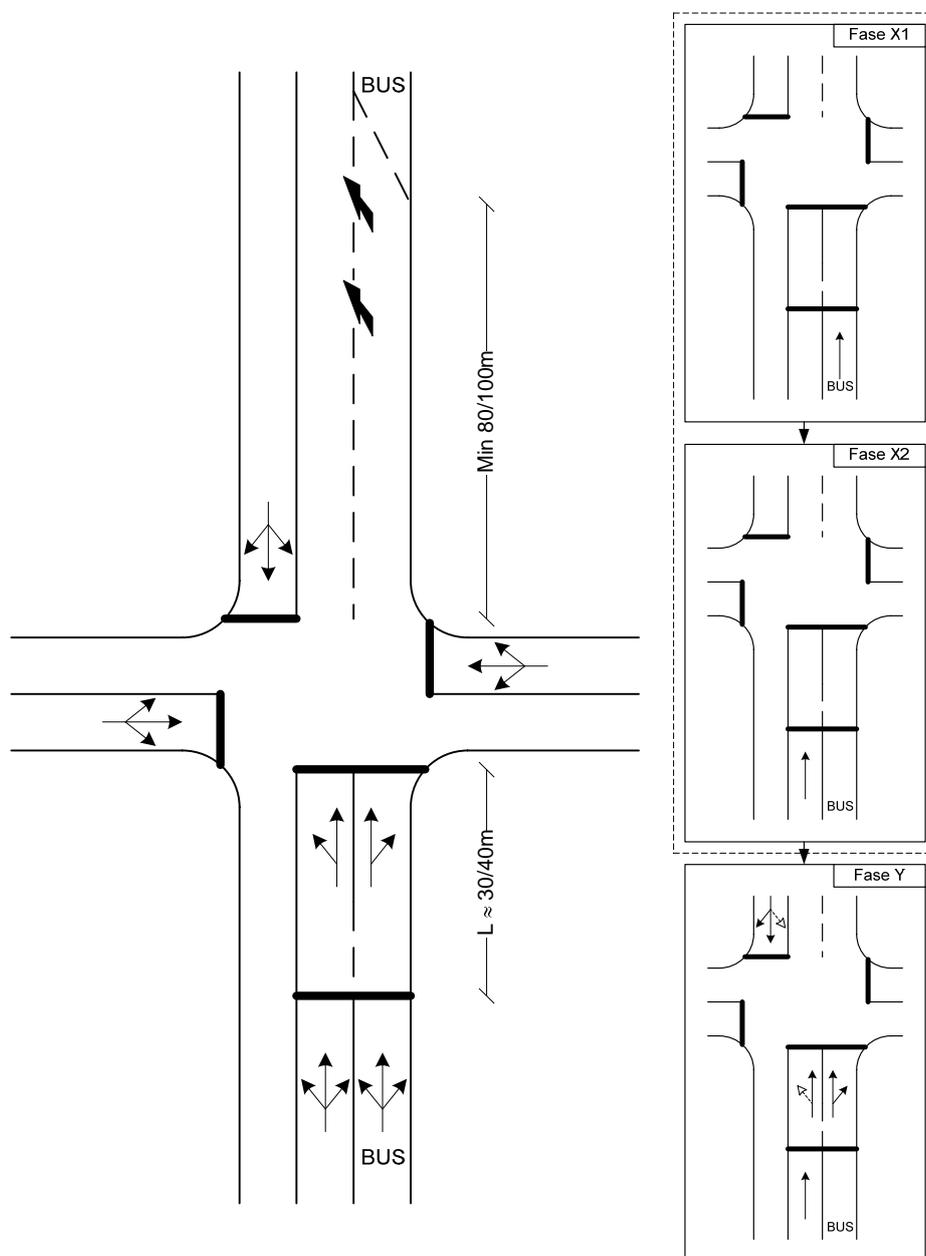


Figura 31 – Solução de regulação com semáforo auxiliar viabilizando viragem à esquerda dos TC

Existe ainda a possibilidade de utilizar ao máximo o potencial das soluções telemáticas aplicando uma estratégia de apoio activo mas selectivo aos TC.

De facto estudos recentes mostraram que a solução sistémica óptima de apoio aos TC passa pelo apoio preferencial ser dado apenas aos veículos que se encontram mais atrasados já que tal permite maximizar o benefício que estes recebem não prejudicando os restantes que tenderão a estar a cumprir os seus horários. Tal permitirá que o sistema dê a melhor contribuição possível para a qualidade de funcionamento dos serviços de TC actuando mais ao nível da sua fiabilidade (no cumprimento dos horários ou, mais frequentemente na constância dos intervalos entre passagens sucessivas) do que ao nível das velocidades comerciais permitidas.

Note-se que uma estratégia deste tipo já pode ser aplicada mesmo em cruzamentos onde os circuitos BUS se desenvolvem em ambos os eixos rodoviários que aí se cruzam. No entanto a implementação de estratégias deste tipo implica a utilização integrada em tempo real de modelos matemáticos de priorização selectiva associados aos sistemas de detecção e identificação remota dos veículos de TC e aos sistemas actuados de controlo de tráfego.

V EXEMPLOS DE CÁLCULO DE PLANOS DE REGULAÇÃO

V.1 Método de Webster – fase exclusiva para peões

Na Figura 32 é apresentado um plano de regulação de três fases de um entroncamento, sendo uma delas exclusiva para peões. Admita-se para as transições A-B e C-A três segundos de amarelo e dois segundos de tempo de limpeza ($I_A = I_C = 5$ s).

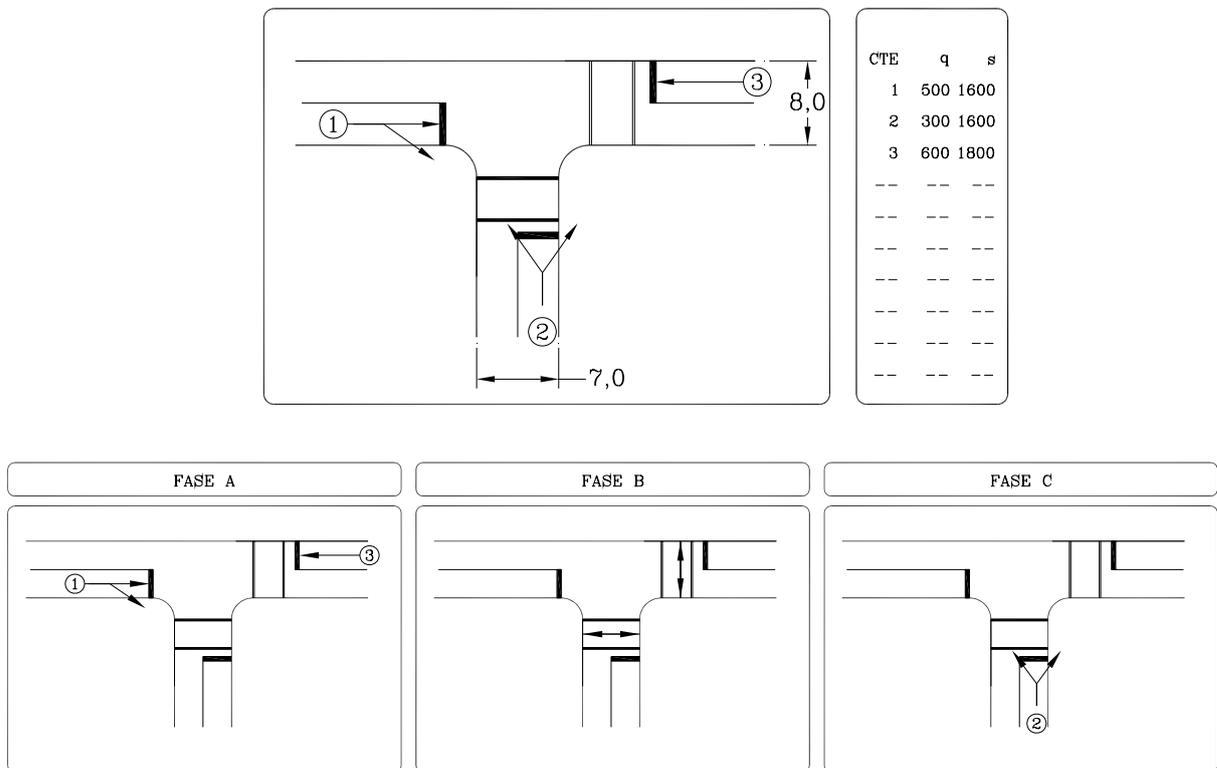


Figura 32 – Exemplo MW 2 – sequência de fases

As fases exclusivas para peões representam tempo perdido relativamente às correntes motorizadas, pelo que a resolução do problema passa por considerar apenas duas fases, aumentando o tempo perdido total em função da duração da fase exclusiva para peões.

Sabendo que a presença de peões no local é pouco significativa, atribuiu-se à fase B um tempo de verde de cinco segundos. O tempo de limpeza, para a velocidade dos peões de 1,2 m/s, é de $8/1,2 \approx 7$ s, pelo que o tempo perdido total correspondente à fase B é de 12s.

Tem-se assim $y_A = y_{c3} = 0,333$ e $y_C = y_{c2} = 0,189$, $L = 5 + 5 + 12 = 22$ s. Obtém-se $C_o = 80$ s, $g_A = 37$ s, $g_C = 21$ s.

Finalmente, importa referir que no tempo de limpeza dos peões deverá ser considerado um período fixo de três segundos de verde intermitente, pelo que entre o início da fase B e da fase C, as indicações a apresentar nas passadeiras serão: verde – 5 s; verde intermitente – 3 s; vermelho integral – 4 s.

V.2 Aplicações do Método de Webster adaptado a correntes multifases

V.2.1 Exemplo MW 3A

Na Figura 33 é apresentado um plano de regulação de três fases de um entroncamento, em que há correntes de tráfego que recebem verde em mais do que uma fase. Admita-se para as transições três segundos de amarelo e dois segundos de tempo de limpeza ($I_A = I_B = I_C = 5$ s).

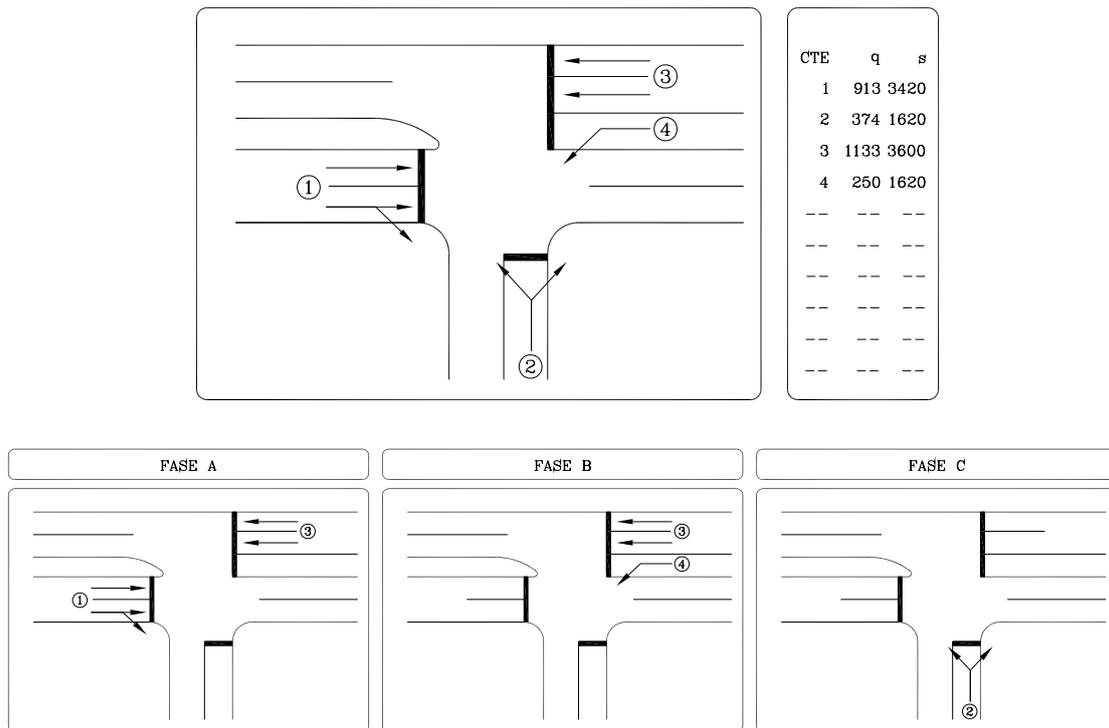


Figura 33 – Exemplo MW 3A: sequência de fases

Como neste caso há pelo menos um movimento que recebe verde em mais do que uma fase, não é possível resolver o problema com a metodologia original de Webster, adoptando-se em alternativa o método descrito em IV.2.6.

Num primeiro passo vai determinar-se $y_{AB} = \max (y_{c3}, y_{c1} + y_{c4}) = (y_{c1} + y_{c4})$. Como o somatório dos y_c 's das correntes que não repetem é superior ao índice de carga da corrente que recebe verde nas duas fases, as primeiras (1 e 4) são correntes críticas. (ver a Tabela 6)

Assim as cargas das diferentes fases correspondem aos índices de carga das correntes que não se repetem em mais de uma fase, vindo,

$$Y = y_{c1} + y_{c2} + y_{c4} = 0,267 + 0,231 + 0,154 = 0,652$$

O tempo perdido total corresponde às transições 1-4, 4-2 e 2-1, ou seja, $L = 3(3+2) = 15$ s. Daqui resulta um ciclo óptimo de 79 s e os seguintes tempos de verde, após arredondamento: $g_A = 26$ s; $g_B = 15$ s e $g_C = 23$ s.

No cálculo dos indicadores de desempenho tudo se passa como nos problemas anteriores, sendo contudo necessário notar que o tempo de verde total das correntes multifase é dado pelo somatório do tempo de verde de cada uma das fases em que recebem permissão de avançar, acrescido dos tempos de transição dessas fases.

Assim, $g_{c3} = g_A + I_A + g_B = 26 + 5 + 15 = 46$ s

É também possível calcular os indicadores de desempenho das diversas correntes de tráfego: capacidade – expressão (34), taxa de saturação – expressão (35), demora média – expressão (53), nível de serviço – Tabela 4 e o número de veículos N que, em cada ciclo precisam parar – expressão (57)².

Tabela 6 – Exemplo MW 3A: tabela-resumo

CTE	q [Veíc/h]	s [Veíc/h]	y	g [s]	Q [Veíc/h]	x	d [s]	NS	N Veíc
1	913	3420	0.267	26	1126	0.81	28.7	C	18
2	374	1620	0.231	23	472	0.79	37.8	D	8
3	1133	3600	0.315	46	2096	0.54	10.1	B	15
4	250	1620	0.154	15	308	0.81	53.0	D	5

² As unidades utilizadas nas expressões são, por omissão, segundos e veículos. Assim, é necessário passar de veíc./h para veíc./s, dividindo por 3600.

V.2.2 Exemplo MW 3B

Redimensione o cruzamento para uma situação em que todos os dados do problema anterior se repetem à excepção do fluxo $q_3 = 2200$ veíc./h (ver a Tabela 7)

A alteração reflecte-se no índice de carga da corrente 3: $y_{c3} = 0,611$, de que resulta $y_{c3} > y_{c1} + y_{c4}$.

As correntes críticas serão, em princípio, a 2 e a 3. Esta hipótese será confirmada caso se confirmem que estas correntes ficam com a máxima taxa de saturação da intersecção. Tem-se então numa primeira aproximação $Y = y_{c2} + y_{c3} = 0,231 + 0,611 = 0,842$.

O tempo perdido total é agora de apenas 10 segundos, correspondente às duas transições entre as correntes críticas, obtendo-se, assim, $C_o \approx 127$ s. O valor adoptado foi $C = C_{max} = 120$ s.

Na repartição de tempo pelas fases, é necessário notar que estando-se a considerar a corrente 3 como crítica, esta vai condicionar o tempo total de verde atribuído às fases em que recebe permissão de avançar (A e B):

$$g_{AB} = y_{c3}(C - L)/Y = 80 \text{ s}$$

$$g_C = y_{c5}(C - L)/Y = 30 \text{ s}$$

Finalmente, é preciso repartir os 80 segundos que foram atribuídas à corrente 3 pelas fases A e B. Tal deverá ser feito em função dos índices de carga das correntes não críticas que apenas recebem verde nestas fases (1 e 4), o que igualiza a taxa de saturação destas correntes. De notar que o tempo de interverde da fase A ($I_A = 5$ s) não pode ser atribuído aos movimentos.

$$g_A = \frac{y_{c1}}{y_{c1} + y_{c4}}(g_3 - I_A) = 48 \text{ s}$$

$$g_B = \frac{y_{c4}}{y_{c1} + y_{c4}}(g_3 - I_A) = 27 \text{ s}$$

Confirma-se, através das taxas de saturação, que as correntes críticas são a 2 e a 3, já que são iguais e máximas.

Tabela 7 – Exemplo MW 3B ($q_3 = 2200$ veíc/h): tabela-resumo

CTE	q [Veíc/h]	s [Veíc/h]	y_c	g [s]	Q [Veíc/h]	x	d [s]	NS	N Veíc
1	913	3420	0.267	48	1368	0.67	29.2	C	25
2	374	1620	0.231	30	405	0.92	93.1	F	12
3	2200	3600	0.611	80	2400	0.92	23.7	C	63
4	250	1620	0.154	27	365	0.69	49.1	D	8

V.2.3 Exemplo MW 3C

Redimensione agora o cruzamento para uma situação em que todos os dados do problema anterior se repetem à excepção do fluxo $q_3 = 1600$ veíc./h (ver a Tabela 8)

Tal como no exemplo anterior, a alteração reflecte-se no índice de carga da corrente 3: $y_{c3} = 0,444$, resultando $y_{c3} > y_{c1} + y_{c4}$.

Admitindo então que as CT 3 e 2 são críticas, calcularam-se os parâmetros da intersecção: $L = 10$ s, $Y = y_{c3} + y_{c2} = 0,444 + 0,231 = 0,675$, resultando $C_o = 62$ s.

A repartição do tempo de verde pelas fases foi feita da mesma maneira que no exemplo anterior, resultando $g_A = 19$ s, $g_B = 11$ s e $g_C = g_{c2} = 18$ s (note-se que devido aos arredondamentos o ciclo será $C = 63$ s). Os tempos de verde disponíveis para as diferentes correntes de tráfego e as respectivas taxas de saturação são apresentados na Tabela 8.

Constata-se que, contrariamente ao que tinha sido admitido, são as CT 1, 2 e 4 (e não a 2 e 3) que são críticas já que apresentam as máximas taxas de saturação.

É agora necessário recalculer os parâmetros da intersecção: $L = 15$ s, $Y = y_{c1} + y_{c2} + y_{c4} = 0,267 + 0,231 + 0,154 = 0,652$, resultando $C_o = 79$ s. Os tempos de verde de cada fase são $g_A = g_{c1} = 26$ s, $g_B = g_{c4} = 15$ s e $g_C = g_{c2} = 23$ s. (ver a Tabela 9)

Confirma-se agora que as taxas de saturação das correntes assumidas críticas são iguais (a menos de arredondamentos) e máximas.

Tabela 8 – Exemplo MW 3C ($q_3 = 1600$ veíc/h): tabela-resumo (admitindo a CT 3 como crítica)

CTE	q [Veíc/h]	s [Veíc/h]	y_c	G [s]	Q [Veíc/h]	x
1	913	3420	0.267	19	1031	0.89
2	374	1620	0.231	18	463	0.81
3	1600	3600	0.444	35	2000	0.80
4	250	1620	0.154	11	283	0.88

Nota: Os valores das tx. Saturação das CT 1 e 4 não aparecem iguais devido ao arredondamento imposto aos respectivos tempos de verde

Tabela 9 – Exemplo MW 3C ($q_3 = 1600$ veíc/h): tabela-resumo (resultados finais)

CTE	q [Veíc/h]	s [Veíc/h]	y_c	g [s]	Q [Veíc/h]	x	d [s]	NS	N Veíc
1	913	3420	0.267	26	1126	0.81	28.7	C	18
2	374	1620	0.231	23	472	0.79	37.8	D	8
3	1600	3600	0.444	46	2096	0.76	13.9	B	26
4	250	1620	0.154	15	308	0.81	53.0	D	5

V.3 Método de Webster – viragem à esquerda com oposição

Na Figura 34 é apresentado um plano de regulação de três fases de um entroncamento, em uma das correntes de tráfego recebe permissão de avançar com oposição. Admita-se para as transições três segundos de amarelo e dois segundos de tempo de limpeza ($I_A = I_B = 5$ s) e a disponibilidade de espaço para a espera de um veículo da corrente 4 após a barra de paragem.

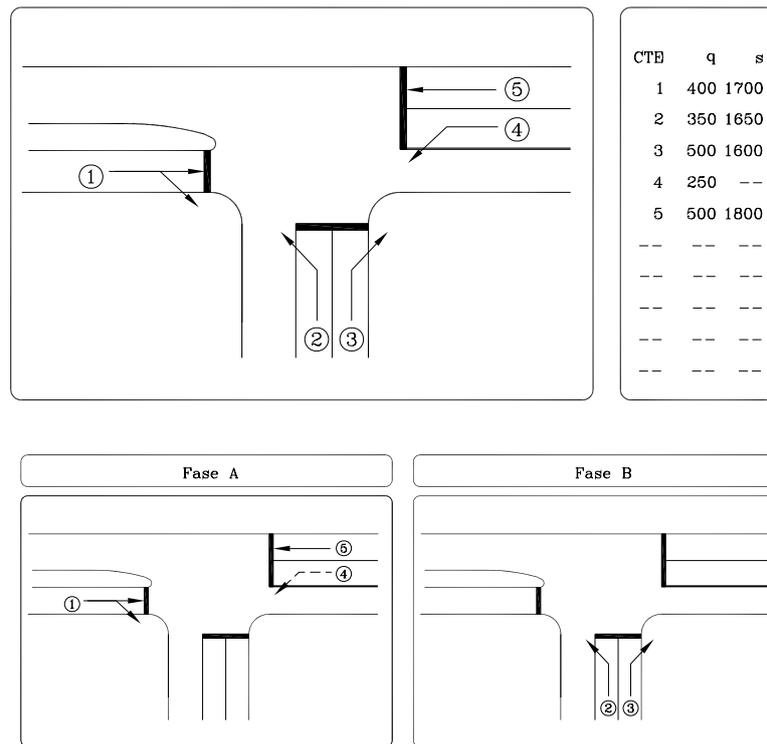


Figura 34 – Exemplo MW 4: sequência de fases

Este problema demonstra a aplicação do método de Webster quando uma das correntes de tráfego em via própria recebe verde com oposição. Como se viu na Aplicação 1 o fluxo de saturação destes movimentos depende da duração e da repartição do ciclo. Uma vez que o cálculo do ciclo óptimo pressupõe o conhecimento de todos os fluxos de saturação, este tipo de problemas implica um processo de resolução iterativo:

Inicialização: determinar o ciclo óptimo e a duração das fases desprezando a corrente de tráfego que recebe verde com oposição

$$y_{c1} = 0,236; y_{c2} = 0,212; y_{c3} = 0,313; y_{c5} = 0,278$$

$$Y = \max(y_{c1}, y_{c5}) + \max(y_{c2}, y_{c3}) = y_{c5} + y_{c3} = 0,591$$

$$L = 2(3+2) = 10 \text{ s}$$

$$Co = 49 \text{ s}, g_A = 18 \text{ s}, g_B = 21 \text{ s}.$$

Iteração 1

Fluxo de saturação

Partindo dos seguintes elementos: $q_{op} = q_1 = 400$ veic/h; $s_{op} = s_1 = 1700$ veic/h, $g_{op} = g_A = 18$ s; $n_s = 1$; $\alpha = 5$; $\beta_2 = 3$, obtém-se a primeira estimativa: $s_4 = 564$ veic/h (ver a Aplicação 1).

Ciclo óptimo

Para calcular o ciclo óptimo é agora necessário considerar a corrente 4 no cálculo da carga da intersecção. Assim:

$$y_{c4} = 250/564 = 0,443, Y = \max(y_{c1}, y_{c4}, y_{c5}) + y_{c3} = y_{c4} + y_{c3} = 0,443 + 0,313 = 0,756.$$

Daqui resulta

$$C_o = 82 \text{ s}, g_A = 42 \text{ s e } g_B = 30 \text{ s}.$$

Iteração 2

Fluxo de saturação

Relativamente ao passo inicial (inicialização), as únicas alterações são a duração do ciclo e o tempo de verde da fase que permite a viragem com oposição, resultando $s_4 = 646$ veic/h

Ciclo óptimo

Para $s_4 = 646$ veic/h, o ciclo óptimo é de 67 s.

O processo converge rapidamente. Ao fim de algumas iterações, obtêm-se os seguintes valores: $s_4 = 632$ veic/h, $C_o = 69$ s, $g_A = 33$ s e $g_B = 26$ s.

V.4 Método Australiano Adaptado

V.4.1 Exemplo MAA 2

Considerar que todos os dados do exemplo apresentado em IV.3 se repetem, à excepção dos débitos de chegada à intersecção q (ver a Figura 35 e a Tabela 10).

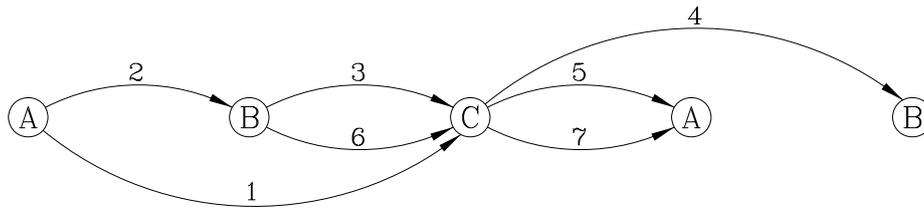


Figura 35 – Exemplo MAA 2: diagrama de circuitos críticos

Calcular os tempos t a atribuir a cada corrente de tráfego para o ciclo $C = 100$ e $x = 0,85$.

Os possíveis circuitos críticos são, de A para A: [2-3-5], $t = 51 + 28 + 18 = 97$; [2-3-7], $t = 51 + 28 + 18 = 97$; [1-5], $t = 37 + 18 = 55$, [1-7], $t = 37 + 18 = 55$; de B para B: [1-4], $t = 37 + 28 = 65$. Verifica-se que tanto [2-3-5] como [2-3-7] são circuitos críticos já que $t_5 = t_7$ e que, por outro lado a CT 6 não é considerada já que $t_3 > t_6$.

Para a continuação do exercício, seleccionar um dos circuitos, seja o [2-3-7]. O tempo perdido total é: $L = I_2 + I_3 + t_7 = 6 + 5 + 18 = 29$ s (a CT 7 corresponde a uma travessia pedonal, logo todo o tempo que requer entra no cálculo do tempo perdido e não no cálculo da carga da intersecção que é apresentado de seguida). A carga da intersecção é: $Y = y_{c2} + y_{c3} = 0,583$. Daqui resulta $C_o = 116,3 \approx 116$ s.

É agora necessário verificar se o circuito crítico se mantém. O circuito [2-3-5] requer $t = 58 + 32 + 21 = 111$ s, enquanto o [2-3-7] necessita de $t = 58 + 32 + 18 = 108$ s. Conclui-se assim que, para o ciclo $C = 116$, o circuito crítico é [2-3-5], sendo necessário recalcular os parâmetros da intersecção.

O tempo perdido é: $L = I_2 + I_3 + I_5 = 16$ s, a carga da intersecção é $Y = y_{c2} + y_{c3} + y_{c5} = 0,698$ resultando $C_o = 96,0$. A escolha de $C = 100$ s permite dispensar novo cálculo dos parâmetros da intersecção (verificou-se que, para $C = 100$ s, tanto [2-3-7] como [2-3-5] são circuitos críticos) e permite a passagem imediata à fase seguinte que é a repartição do ciclo. Note-se também que, como já foi referido antes, a escolha para C do múltiplo de 5 imediatamente acima, é um procedimento comum.

Correntes críticas – atribuir o tempo de verde em função do índice de carga:

$$g_2 = (C - L) \times y_{c2} / Y = (100 - 16) \times 0,384 / 0,698 \approx 46 \text{ s}$$

$$g_3 = (C - L) \times y_{c3} / Y = (100 - 16) \times 0,199 / 0,698 \approx 24 \text{ s}$$

$$g_5 = (C - L) \times y_{c5} / Y = (100 - 16) \times 0,114 / 0,698 \approx 14 \text{ s}$$

Correntes não críticas

$$g_6 = g_3 + I_3 - I_6 = 24 + 5 - 10 = 19 \text{ s}$$

$$g_7 = g_5 + I_5 - I_7 = 14 + 5 - 13 = 6 \text{ s}$$

$$g_4 = g_5 + I_5 + g_2 + I_2 - I_4 = 14 + 5 + 46 + 6 - 5 = 66 \text{ s}$$

$$g_1 = g_2 + I_2 + g_3 + I_3 - I_1 = 46 + 6 + 24 + 5 - 6 = 75 \text{ s}$$

$$g_A = 46 \text{ s}; g_B = 24 \text{ s}; g_C = 14 \text{ s}$$

Tabela 10 – Exemplo MAA 2: tabela-resumo

Dados							c = 100		c = 116		c = 100		
CT	g_M	I	q	s	y	u	$g_M + I$	$c.u + I$	t	$c.u + I$	t'	g	x
1	8	6	920	3480	0.264	0.311	14	37	37	42	42	75	0.35
2	8	6	580	1510	0.384	0.452	14	51	51	58	58	46	0.84
3	8	5	650	3260	0.199	0.235	13	28	28	32	32	24	0.83
4	8	5	240	1240	0.194	0.228	13	28	28	31	31	66	0.29
5	8	5	170	1490	0.114	0.134	13	18	18	20	21	14	0.81
6	5	10					15		15	10	15	19	
7	5	13					18		18	13	18	6	

V.4.2 Exemplo MAA 3

Considerar a intersecção e a sequência de fases indicada na Figura 36 e os dados indicados na Tabela 11.

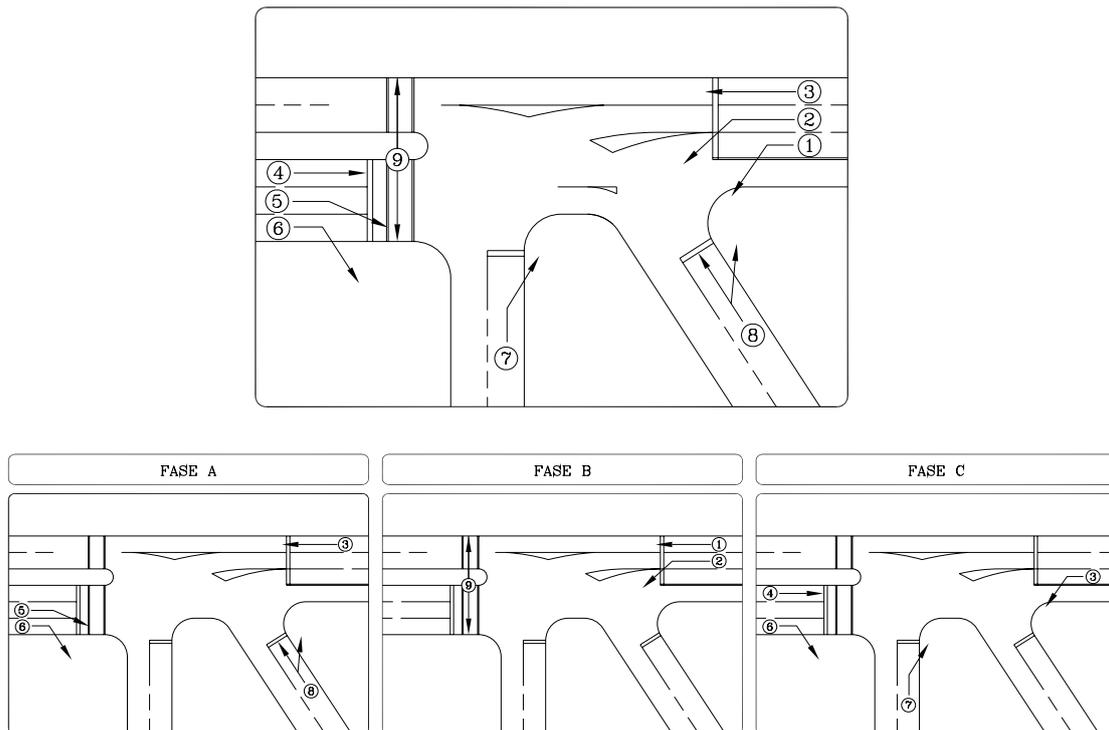


Figura 36 – Exemplo MAA 3: sequência de fases

Calcular os tempos iniciais t para $C = 100$ e $x = 0,85$. Após simplificação da rede (eliminação das correntes 1, 2, 3, 4 e 8), os potenciais circuitos críticos são (ver a Figura 37), de A para A: [5-9-7], $t = 38 + 17 + 37 = 92$; de B para B: [9-6], $t = 17 + 50 = 67$. O circuito crítico é [5-9-7].

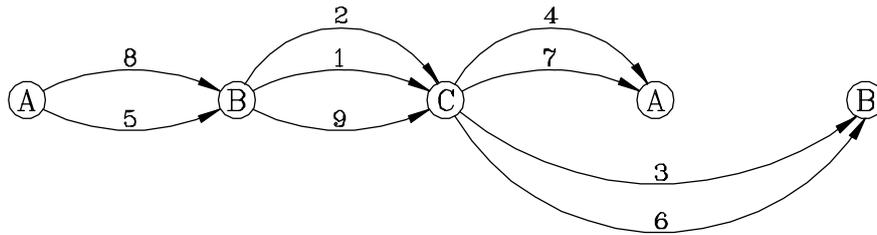


Figura 37 – Exemplo MAA 3: rede de circuitos críticos

O tempo perdido é: $L = I_5 + t_9 + I_7 = 4 + 17 + 4 = 25$ s, a carga da intersecção é: $Y = y_5 + y_7 = 0,569$, resultando $C_o = 98,6$. À semelhança do exemplo anterior, a escolha de $C = 100$ s dispensa a reavaliação do circuito crítico.

Correntes críticas

$$g_5 = (C - L) \times y_{c5} / Y = (100 - 25) \times 0,292 / 0,569 \approx 38 \text{ s}$$

$$g_7 = (C - L) \times y_{c7} / Y = (100 - 25) \times 0,277 / 0,698 \approx 37 \text{ s}$$

$g_9 = 5$ s (note-se que quando uma corrente pedonal é crítica, o seu tempo de verde é o verde mínimo pré-estabelecido)

Correntes não críticas

$$g_1 = g_9 + I_9 - I_1 = 5 + 12 - 4 = 13 \text{ s}$$

$$g_2 = g_1 = 13 \text{ s}$$

$$g_8 = g_5 + I_5 - I_8 = 38 + 4 - 4 = 38 \text{ s}$$

$$g_3 = g_7 + I_7 + g_5 + I_5 - I_3 = 37 + 4 + 38 + 4 - 4 = 79 \text{ s}$$

$$g_6 = g_3 = 79 \text{ s}$$

$$g_4 = g_7 = 37 \text{ s}$$

$$g_A = 38 \text{ s}; g_B = 13 \text{ s}; g_C = 37 \text{ s}$$

Tabela 11 – Exemplo MAA 3: tabela-resumo

Dados					c = 100							
CT	g_M	I	q	s	y_c	u	$g_M + I$	c.u+I	t	g	x	
1	8	4	60	1880	0.032	0.038	12	8	12	13	0.25	
2	8	4	130	2000	0.065	0.076	12	12	12	13	0.50	
3	8	4	125	1310	0.095	0.112	12	15	15	79	0.12	
4	8	4	315	1750	0.180	0.212	12	25	25	37	0.49	
5	8	4	435	1490	0.292	0.343	12	38	38	38	0.77	
6	8	4	360	920	0.391	0.460	12	50	50	80	0.49	
7	8	4	465	1680	0.277	0.326	12	37	37	37	0.75	
8	8	4	330	1485	0.222	0.261	12	30	30	38	0.58	
9	5	12					17	12	17	5		

V.4.3 Exemplo MAA 4

Considerar que todos os dados do problema anterior se repetem, à exceção do plano semafórico que agora apresenta quatro fases (ver a Figura 38).

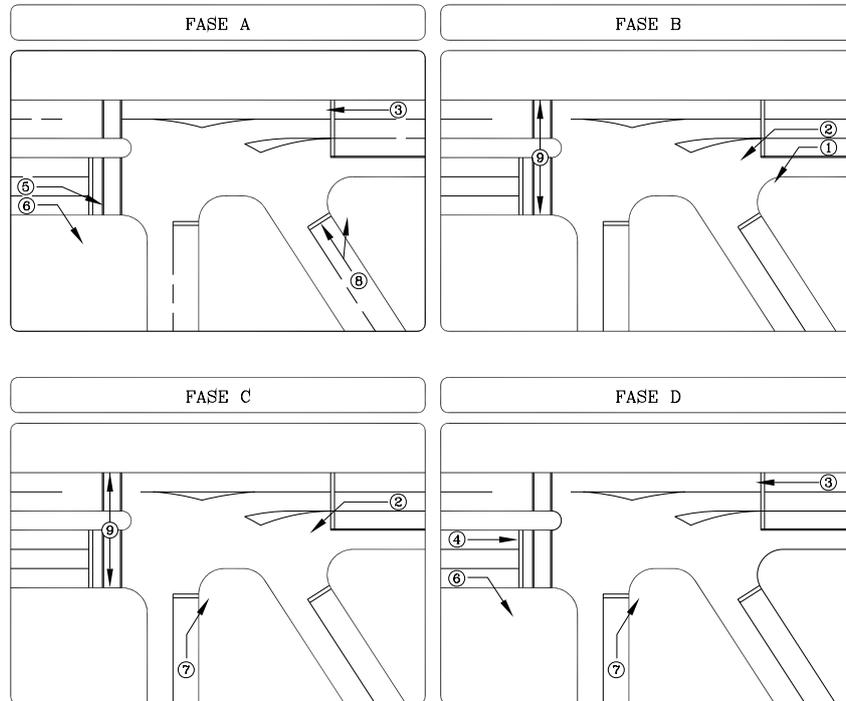


Figura 38 – Exemplo MAA 4: sequência de fases

Depois de se calcularem os tempos t (para $C = 100$ s e $x = 0,85$), é possível remover da rede as correntes 2, 3 e 8 (ver

Figura 39). Os possíveis circuitos críticos são, de A para A: [5-9-4], $t = 38 + 17 + 25 = 80$; [5-1-7], $t = 38 + 12 + 37 = 87$; de B para B: [9-6], $t = 17 + 50 = 67$. O circuito crítico é [5-1-7].

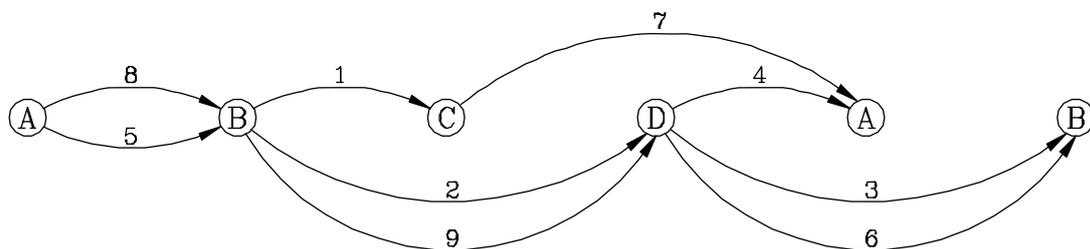


Figura 39 – Exemplo MAA 4: rede de circuitos críticos

O tempo perdido total é $L = t_1 + I_5 + I_7 = 12 + 4 + 4 = 20$ s (notar que o valor t atribuído à CT 1 foi condicionado pelo tempo de verde mínimo, pelo que no cálculo de L entra $g_{1m} + I_1$). A carga da intersecção é $Y = y_{c5} + y_{c7} = 0,292 + 0,277 = 0,569$. Resulta $C_o = 81,2 \approx 81$ s.

Verifica-se que o circuito crítico não difere para $C = 81$ s, pelo que se pode efectuar a repartição do ciclo:

Correntes críticas

$$g_1 = 8 \text{ s}$$

$$g_5 = (C - L) \times y_{c5} / Y = (81 - 20) \times 0,292 / 0,569 \approx 31 \text{ s}$$

$$g_7 = (C - L) \times y_{c7} / Y = (81 - 20) \times 0,277 / 0,569 \approx 29 \text{ s}$$

Correntes não críticas

$$g_1 + I_1 + g_7 + I_7 = g_2 + I_2 + g_4 + I_4 \quad \Leftrightarrow$$

$$8 + 4 + 30 + 4 = g_2 + 4 + g_4 + 4 \quad \Leftrightarrow$$

$$g_2 + g_4 = 38 \text{ s}$$

Correntes 2 e 4: procura-se atribuir tempo de verde em função das cargas, de que resultaria:

$$g_2 = (g_2 + g_4) \times y_{c2} / (y_{c2} + y_{c4}) = 10 \text{ s}$$

$$g_4 = (g_2 + g_4) \times y_{c4} / (y_{c2} + y_{c4}) = 28 \text{ s}$$

Esta repartição não é, contudo, aceitável já que conduziria a um tempo de verde para a CT 9 inferior ao tempo mínimo pré-estabelecido (5 s). Assim, será atribuído à CT 9 esse tempo mínimo, a partir do qual será calculado o tempo de verde da CT 2:

$$g_9 = 5 \text{ s}$$

$$g_2 = g_9 + I_9 - I_2 = 5 + 12 - 4 = 13 \text{ s}$$

$$g_4 = 38 - g_2 = 25 \text{ s}$$

$$g_8 = g_5 = 31 \text{ s}$$

$$g_6 = g_4 + I_4 + g_5 + I_5 = 24 + 4 + 31 + 4 - 4 = 60 \text{ s}$$

$$g_3 = g_6 = 60 \text{ s}$$

$$g_A = 31 \text{ s}; g_B = 8 \text{ s}; g_C = ?$$

$$g_1 + I_1 + g_C + I_2 = g_2 + I_2 \quad \Leftrightarrow$$

$$8 + 4 + g_C + 4 = 13 + 4 \quad \Leftrightarrow$$

$$g_C = 1 \text{ s.}$$

CT	Dados					c = 100				c = 81			
	g_M	I	q	s	y	u	$g_M + I$	$c.u + I$	t	$c.u + I$	t'	g	x
1	8	4	60	1880	0.032	0.038	12	8	12	7	12	8	0.32
2	8	4	130	2000	0.065	0.076	12	12	12	10	12	13	0.41
3	8	4	125	1310	0.095	0.112	12	15	15	13	13	59	0.13
4	8	4	315	1750	0.180	0.212	12	25	25	21	21	25	0.58
5	8	4	435	1490	0.292	0.343	12	38	38	31	31	31	0.76
6	8	4	360	920	0.391	0.46	12	50	50	41	41	59	0.54
7	8	4	465	1680	0.277	0.326	12	37	37	30	30	30	0.75
8	8	4	330	1485	0.222	0.261	12	30	30	25	25	31	0.58
9	5	12					17	12	17	12	17		

VI SINAIS LUMINOSOS DE COMANDO ACTUADO

VI.1 Enquadramento

Este tipo de soluções permite a resposta em tempo real quer às alterações aleatórias e cíclicas da procura do tráfego rodoviário ou pedonal, quer, em certa medida, relativamente às alterações sistemáticas que ocorrem ao longo dos anos de vida útil das soluções, quer ainda às necessidades especiais de determinados utentes ou situações.

De facto, a existência de sistemas mais ou menos sofisticados de detecção e classificação da procura de tráfego permite o desenvolvimento de um conjunto bastante alargado de diferentes estratégias de regulação dos sinais luminosos, desde as mais simples às mais complexas, capazes de dar resposta a diferentes objectivos.

De entre estas justifica-se o destaque das seguintes:

- Variação em tempo real da duração das fases dependendo no nível momentâneo da 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 detecção 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 colectivos 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

Estas estratégias podem ser aplicadas de forma isolada ou integrada resultando em planos de regulação com actuação que poderão ser do tipo “semi-actuado” ou “completamente actuado” dependendo da existência de informação em tempo real obtida através de sensores, que podem ser de diferentes tipos, sobre apenas algumas ou todas as correntes de tráfego motorizadas e pedonais servidas pelo cruzamento. Podem também ser aplicadas na regulação otimizada de cruzamentos isolados ou então na implementação de soluções de gestão integrada de redes onde uma percentagem significativa dos cruzamentos é regulada por sinais luminosos.

Note-se que as potencialidades acima referidas das soluções actuadas fazem com que estas apresentem muitas vantagens face a soluções mais tradicionais a tempos fixos justificando presentemente, face ao acréscimo de custos relativamente reduzido que actualmente lhes estão associadas, a sua utilização na generalidade das situações. De facto ao nível, por exemplo, das demoras impostas aos veículos as soluções actuadas são genericamente muito mais eficientes, particularmente nos períodos de menor procura.

Também as potencialidades de tratamento diferenciado e com decisão em tempo real relativamente a situações ou utentes especiais são importantíssimas e muito difíceis ou impossíveis de replicar com soluções a tempos fixos.

No entanto, é necessário ter a noção de que, ao nível da capacidade global para fazer face a picos e tipologias de procura conhecidos, não existem diferenças significativas face às soluções a tempos fixos porque a própria lógica de actuação leva a que se chegue quase sempre aos tempos máximos pré-definidos.

VI.2 Estratégias base de actuação: activação e extensão dinâmica das fases

VI.2.1 Variação em tempo real da duração das fases

A implementação de uma estratégia de variação em tempo real de uma qualquer fase de um plano de regulação passa pela utilização de pelo menos um sensor capaz de, num determinado ponto do trajecto de aproximação ao cruzamento, detectar a passagem de veículos pertencentes a uma ou mais das correntes de tráfego servidas nessa fase.

A partir da quantificação feita dos níveis e características da procura assim obtidos é então definida em tempo real a duração da fase em cada ciclo.

A lógica de variação da duração da fase em função do nível da procura passa pela definição de um tempo mínimo (t_{min}), de um tempo máximo ($t_{máx}$) e de uma lógica e intervalo de extensão (ext).

O tempo mínimo, que é normalmente da ordem dos 8-10 segundos, destina-se em primeira análise a minimizar os impactos negativos decorrentes de situações de instabilidade que ocorrem no arranque das correntes de tráfego, mas pode também estar dependente da localização do relevante sensor relativamente à linha de paragem.

O tempo máximo, representa a duração máxima possível para a fase no âmbito do plano de regulação, e é definido em função dos máximos níveis de tráfego expectáveis no cruzamento durante os relevantes períodos de ponta a partir de um dimensionamento de um plano de tempos fixos. Este parâmetro destina-se a garantir que durante os períodos mais sobrecarregados não se verificam situações de extensão excessiva da duração da fase o que tenderia a provocar congestionamento em correntes de tráfego servidas noutras fases.

A decisão em cada ciclo relativamente à duração da fase, entre os valores mínimo e máximo já referidos, baseia-se (ver esquemas exemplificativos na Figura 40), na identificação dos períodos de quebra de continuidade dos pelotões das correntes de tráfego, indicadores de quebras significativas dos débitos de chegada ao cruzamento.

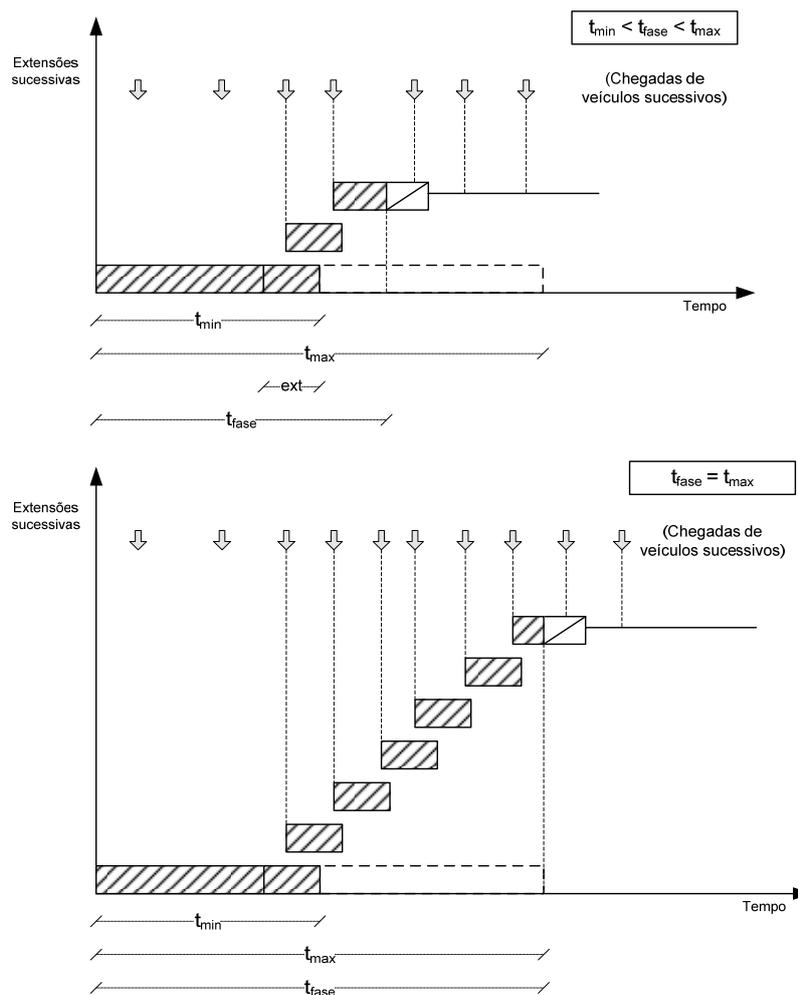


Figura 40 – Exemplos de processos de fixação dinâmica da duração das fases

Para tal define-se um valor de referência, o “intervalo de extensão”, para os intervalos de tempo entre veículos sucessivos que depende, não apenas da composição da corrente de tráfego, mas também das características geométricas dos acessos, particularmente do declive, tendendo a tomar um valor da ordem dos 2-5 segundos (frequentemente 3).

Este valor de referência, a partir do momento ($t_{min} - ext$) da fase, será depois comparado com os intervalos de tempo entre veículos sucessivamente registados pelo sensor de passagem, ocorrendo o término da fase quando se verificar um que o exceda. Se tal não acontecer até se atingir o ($t_{máx}$), a fase será fechada quando este tempo for atingido.

Note-se que a implementação deste tipo de estratégia de actuação leva a que, durante os períodos de ponta, os cruzamentos actuados tendam a funcionar como “simples” cruzamentos a tempos fixos.

As soluções de sinais luminosos habitualmente aplicadas em Portugal utilizam apenas um sensor capaz de registar quer a presença quer a passagem de veículos, que é colocado nas proximidades da linha de paragem, normalmente a cerca de 3 metros desta. Existem no entanto tipologias utilizadas noutros países que se baseiam na aplicação de séries de dois sensores ao longo do trajecto de aproximação ao cruzamento, sendo que nestes casos o sensor responsável pela definição da duração final da fase o sensor mais afastado do cruzamento (ver a Figura 41).

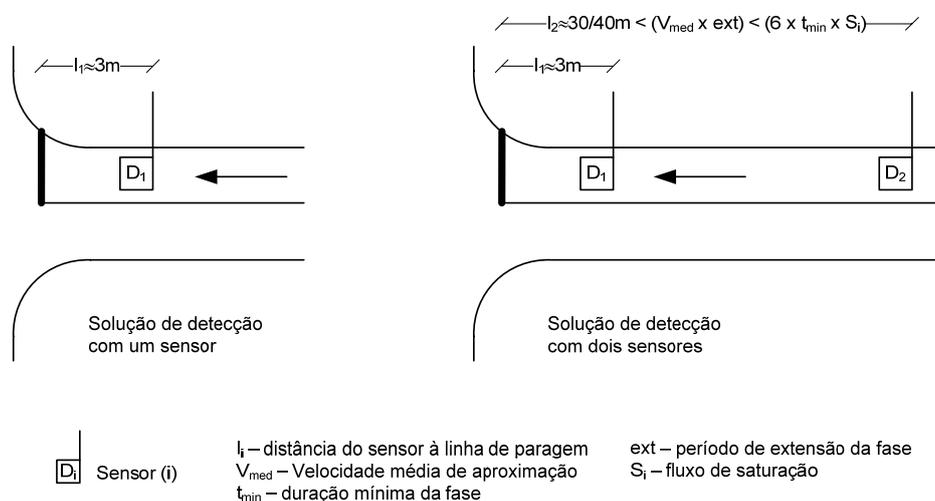


Figura 41 – Exemplos de localização de soluções de actuação com um e dois sensores

A opção por uma solução com apenas um sensor ou, mais comumente, um conjunto de sensores já que em acessos com vias múltiplas muitas vezes se aplicam sensores independentes a cada via, apresenta como principais vantagens a sua simplicidade conceptual e menor custo. Apresenta como principal desvantagem a sua menor eficiência na minimização das demoras dos veículos já que a lógica de extensão

aplicável apenas permite confirmar a inexistência de procura e conseqüente necessidade de fecho da fase alguns segundos, o correspondente a (*ext*), depois desta se verificar, tendendo assim a, fora dos períodos de ponta, existir sempre um atraso na reacção do sistema relativamente às condições da procura.

Esta situação pode ser minimizada através da opção de utilização de dois sensores (ou conjuntos), havendo a necessidade de colocar o sensor mais a montante do cruzamento a uma distância aproximada mas menor da que é percorrida por um veículo durante o período (*ext*).

Deste modo ficará praticamente garantido que quando neste sensor se verifique a existência de um intervalo entre veículos superior a (*ext*) e, portanto, se active o procedimento de fecho da fase, o último veículo a passar sobre o sensor já atingiu a linha de paragem tendo entrado no cruzamento.

Ao mesmo tempo haverá que garantir que a duração do tempo mínimo (t_{min}) é suficientemente alargada para que todos os veículos parados à frente deste sensor possam iniciar a marcha antes que se inicie o procedimento de verificação da necessidade de extensão de verde, de modo a garantir que, se a procura o justificar, os subsequentes veículos podem dar início a este procedimento.

Finalmente pretende-se que o valor do (t_{min}) não seja muito significativo para evitar retirar flexibilidade por demasiada extensão da duração mínima do plano de regulação.

Da conjugação destes três requisitos resulta normalmente a adopção de uma localização a cerca de 30-40 metros da linha de paragem com a correspondente adopção de um (t_{min}) da ordem dos 10 a 14 segundos.

VI.2.2 Estratégias de activação selectiva das fases

Esta estratégia permite a substituição de uma lógica de repetição sistemática de planos de regulação com sequências de fases pré-determinadas, passando-se a uma lógica de activação selectiva de alguma(s) delas, ou mesmo de todas, apenas quando se verificar o tipo de procura que o justifique, permitindo assim otimizar a atribuição do tempo às diferentes fases e utentes.

Destacam-se aplicações em planos com fases de espera em que o sistema fica suspenso na fase principal, que serve os movimentos mais importantes, ou numa fase especial, com todos os grupos semaforicos com vermelho, até que se verifique procura para uma das restantes fases.

São também importantes as aplicações a soluções onde se verifica a existência de fases especiais com activação pontual, destinadas a servir utentes, normalmente peões, ou situações menos frequentes, normalmente de procura excepcional de um ou mais

movimentos direccionais ou correntes de tráfego como por exemplo as viragens à esquerda.

Este tipo de estratégias é, no caso dos movimentos motorizados, aplicado através da utilização de sensores de presença junto à linha de paragem das correntes de tráfego servidas, que registam a existência de procura e permitem a chamada das fases especiais relevantes.

No caso das fases especiais para peões a procura é, normalmente, registada através do recurso a botoneiras accionáveis pelos utentes. Neste casos trata-se de uma situação de registos de presença com memória já que a detecção mantém a sua acção para além do momento de activação, até que a fase seja activada ou até que exista uma informação de anulação da procura assinalada por outro sistema de detecção.

VI.2.3 Soluções básicas de referência

VI.2.3.1 Solução semi-actuada com activação e extensão dinâmica da fase secundária

A Figura 42 apresenta um fluxograma representativo da lógica de um plano de regulação de um cruzamento a duas fases onde apenas os veículos das entradas secundárias são monitorizados em tempo real.

Esta é uma das soluções mais comuns e perfeitamente adequada em cruzamentos onde as vias secundárias apresentam uma importância reduzida face ao eixo principal, sendo assim lógico que este seja claramente privilegiado, e onde não existe a necessidade de regulação específica dos atravessamentos pedonais.

Da detecção de procura nas vias secundárias dependerá a activação da fase que as serve, o que significará que em períodos “calmos”, nomeadamente nocturnos, o cruzamento tenderá a ficar suspensa na fase principal que serve os eixos de tráfego mais importantes.

Ao mesmo tempo a informação recolhida pelos sensores das vias secundárias será também utilizada para, em cada ciclo onde exista activação da fase secundária, definir a duração dessa fase. Normalmente nos períodos mortos a duração será a correspondente ao (t_{min}) e nas horas de ponta será a correspondente ao (t_{max}).

Trata-se de uma solução que, tendo em vista o número reduzido de sensores, implica um investimento infra-estrutural bastante reduzido. A sua simplicidade implica no entanto que, para garantir um funcionamento optimizado do cruzamento ao longo dos diferentes períodos dos dias e das semanas, ser necessário o desenvolvimento de diferentes sub-planos, adaptados a esses períodos, diferenciados pelos valores atribuídos ao “tempo mínimo de verde da fase principal – T_A ” e ao “tempo máximo da fase secundária – $T_B(max)$ ”.

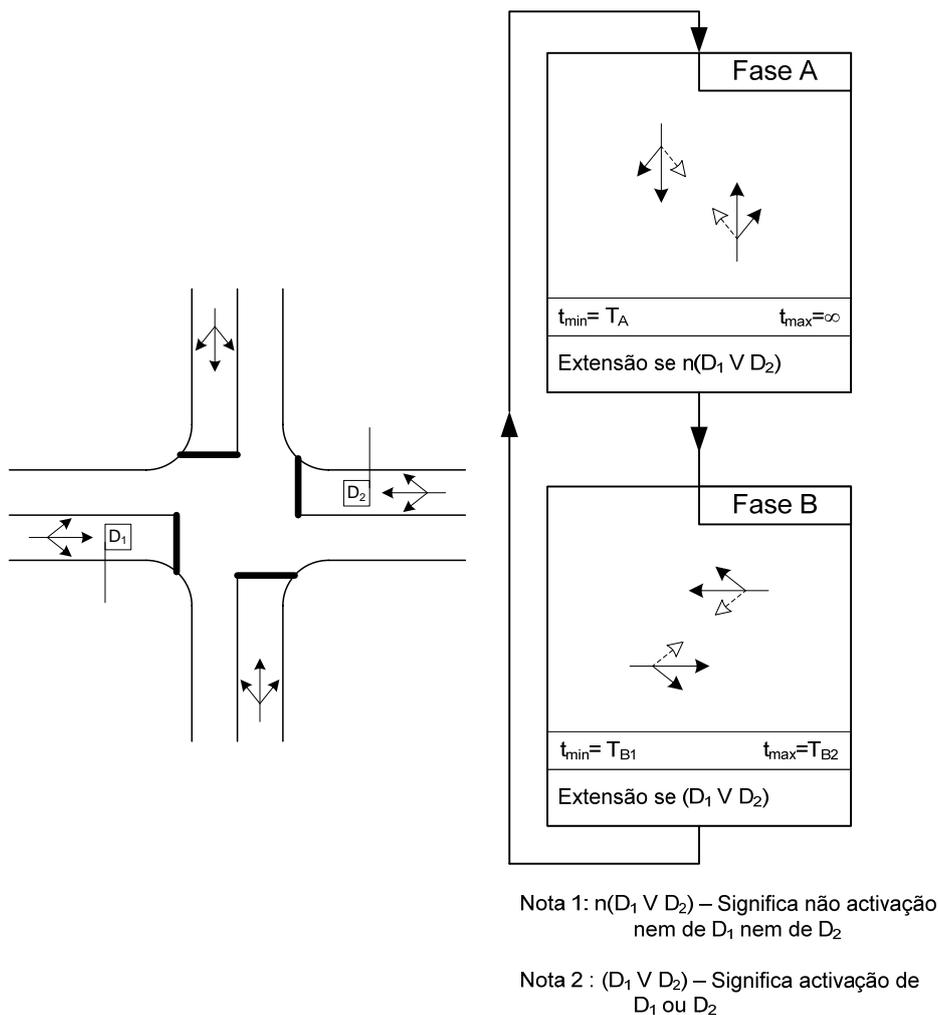


Figura 42 – Solução semi-actuada com activação e extensão dinâmica da fase secundária

VI.2.3.2 Solução totalmente actuada com activação e extensão dinâmica das fases

A Figura 43 apresenta um fluxograma representativo da lógica de um plano de regulação de um cruzamento a duas fases onde todos os veículos são monitorizados em tempo real.

Esta é uma solução comum em cruzamentos onde a importância dos eixos que se cruzam é semelhante. No exemplo aqui apresentado assume-se que não existe a necessidade de regulação específica dos atravessamentos pedonais mas, tal como se verá adiante, esta poderá ser incorporada.

A chamada e definição da duração de cada fase dependerá da existência e tipo da procura relevante podendo, também neste caso, ocorrerem períodos significativos durante os quais o cruzamento fica suspenso numa fase, normalmente a principal,

entendendo-se como principal aquela que serve as correntes de tráfego mais importantes.

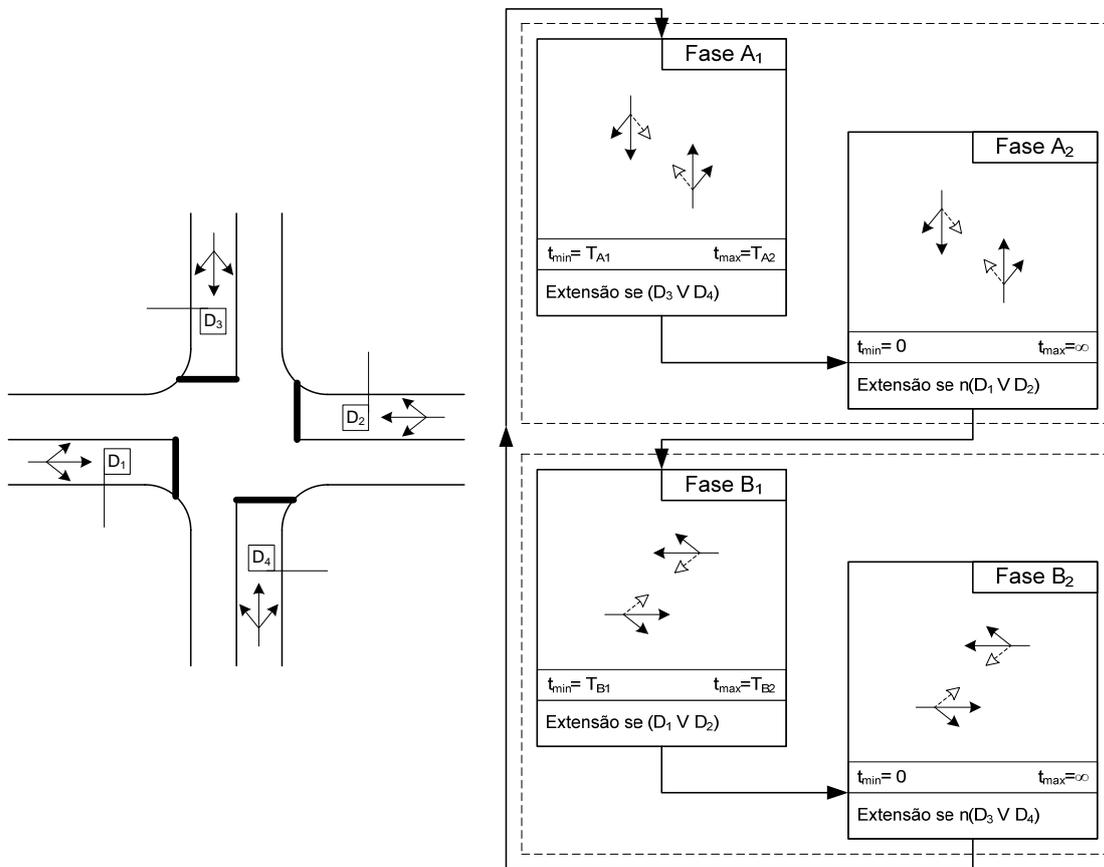


Figura 43 – Solução totalmente actuada com activação e extensão dinâmica das fases

Trata-se de uma solução mais exigente ao nível da infra-estrutura devido ao maior número de sensores necessários mas que, para a maioria dos casos permite a definição de um único plano de regulação capaz de regular eficientemente o cruzamento ao longo do tempo adaptando-se eficazmente às variações cíclicas, aleatórias e, mesmo, sistemáticas da procura.

No entanto, quando ao longo do tempo, de forma cíclica, a importância relativa das correntes de tráfego críticas de cada fase se altera significativamente (por exemplo de manhã um dos eixos é o mais importante, mas à tarde é o outro), tal obrigará ao desenvolvimento de diferentes sub-planos sob pena de, se tal não for feito, os movimentos mais sobrecarregados em cada período serem deficientemente servidos, situação que se tenderá a agravar ao longo da vida útil do cruzamento.

VI.2.3.3 Solução actuada com fase de espera para períodos mortos

A Figura 44 apresenta um fluxograma representativo da lógica de um plano de regulação de um cruzamento possuidor de um fase especial onde todos os movimentos recebem vermelho e que se destina a regular os períodos sem procura.

Esta é uma solução comum em cruzamentos isolados onde, ao mesmo tempo que se procura minimizar os atrasos impostos aos condutores, se pretende também controlar as velocidades de circulação verificadas nos períodos mortos, especialmente à noite. Note-se que a chamada e manutenção da fase especial “tudo vermelho” dependerá da inexistência de qualquer activação dos diferentes sensores do cruzamento podendo ser activada no seguimento de qualquer das fases ordinárias.

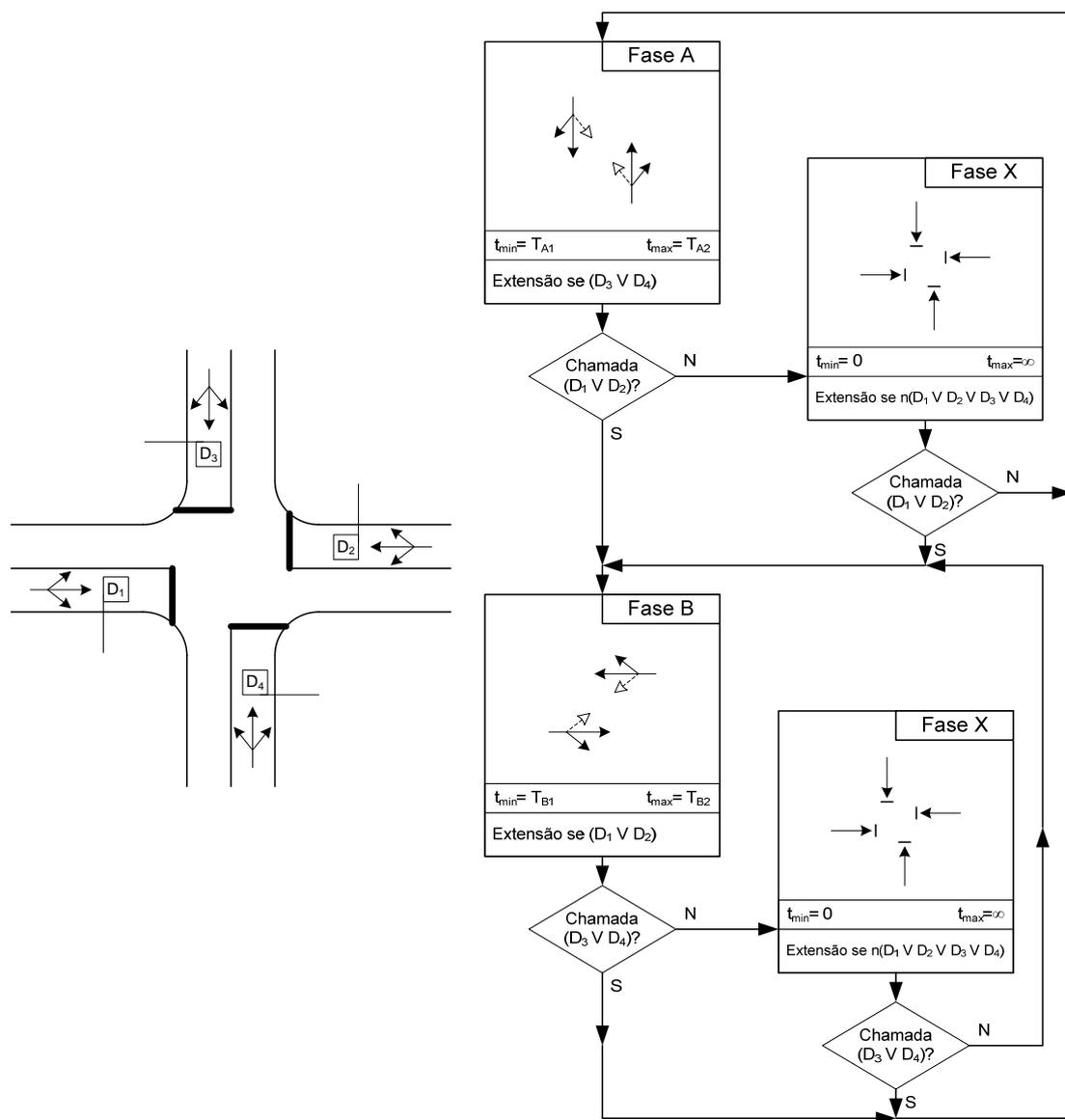


Figura 44 – Solução actuada com fase de espera para períodos mortos

VI.2.3.4 Solução semi-actuada com fase especial para as viragens à esquerda

A Figura 45 apresenta um fluxograma representativo da lógica de um plano de regulação de um cruzamento possuidor de um fase especial, onde os movimentos de viragem à esquerda a partir do eixo principal, quando necessário, podem ser servidos por uma fase específica que permita o escoamento da procura dessas viragens que não tenha sido escoada no final da fase ordinária onde estes movimentos são servidos por uma solução do tipo “verde com oposição”.

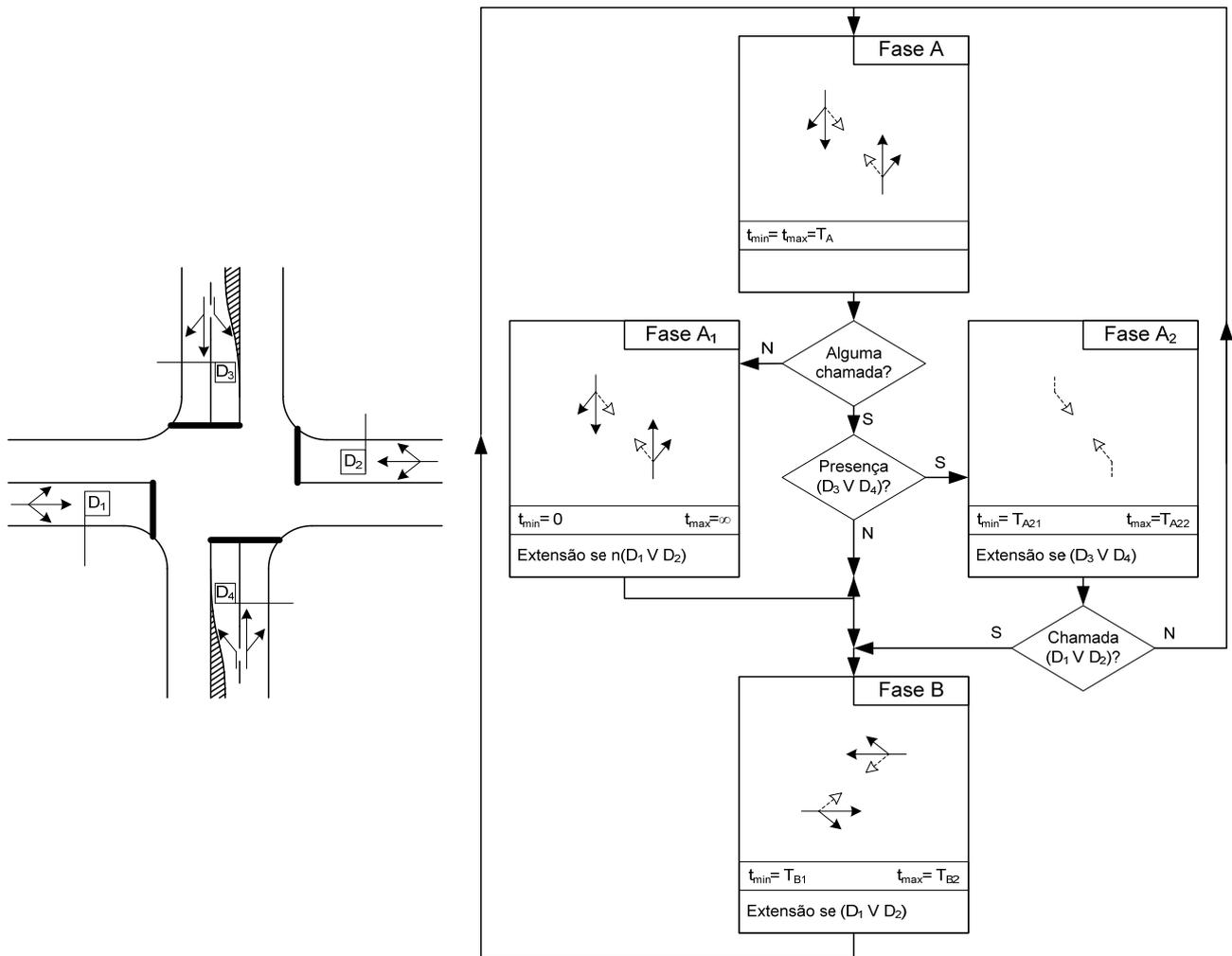


Figura 45 – Solução semi-actuada com fase especial para as viragens à esquerda

VI.2.3.5 Soluções com activação dinâmica de fases pedonais

A Figura 46 apresenta um fluxograma representativo da lógica de um plano de regulação de um cruzamento semi-actuado, possuidor de uma fase especial onde todos os atravessamentos pedonais são servidos.

A actuação da fase pedonal faz-se através da utilização por parte dos peões de botoneiras que funcionam como sensores de presença com memória. Justifica-se aqui chamar a atenção para o facto de que a eficácia e popularidade deste tipo de solução, que requer uma participação activa dos peões, poderá ser bastante melhorada se se apostar em formas de interacção em tempo real entre o sistema e os utilizadores através, nomeadamente, da confirmação da recepção das chamadas e da indicação do tempo previsto de espera.

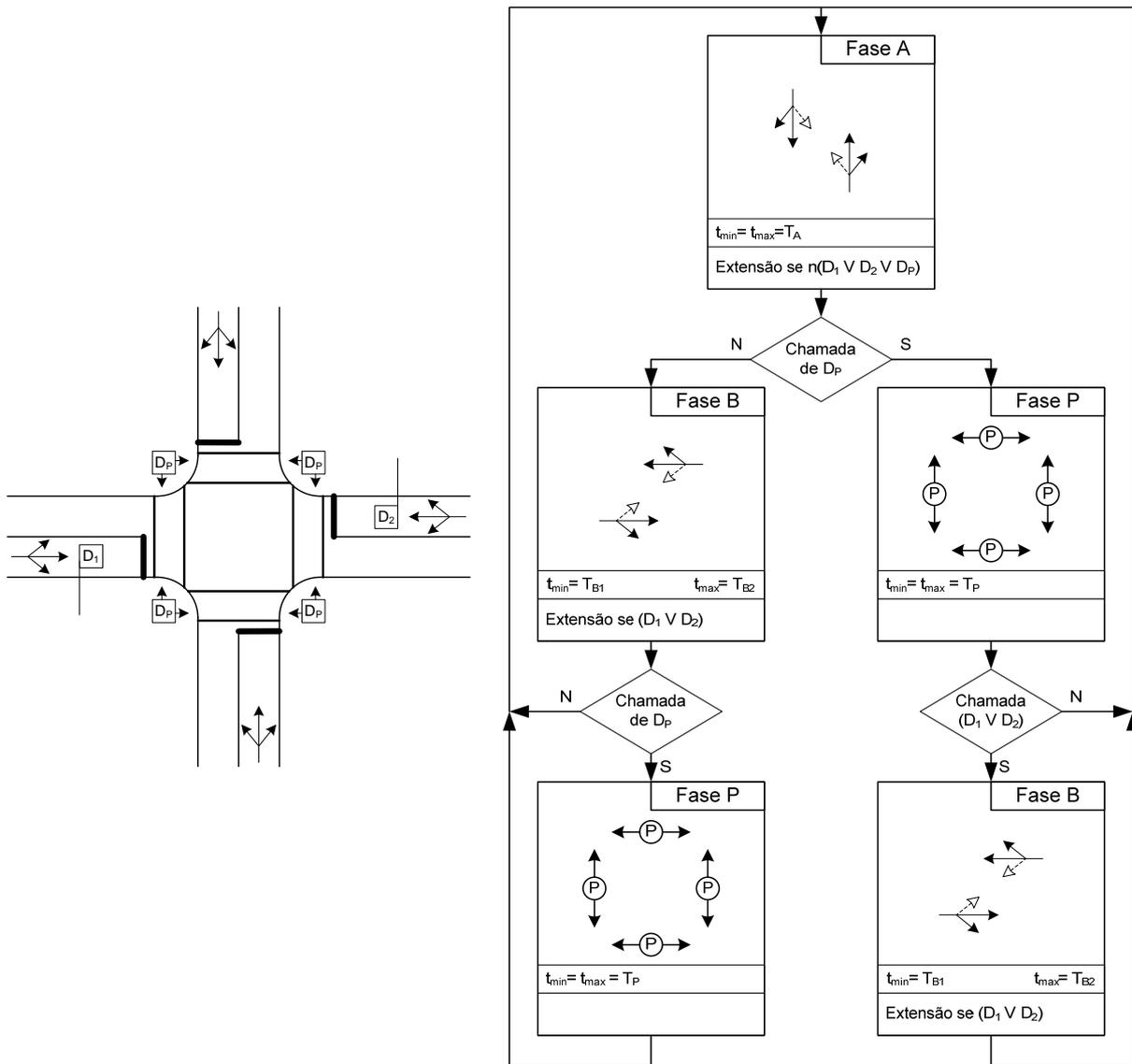


Figura 46 – Soluções com activação dinâmica de fase pedonal exclusiva

Note-se também no fluxograma que a sequência de fases pode ser qualquer uma dependendo da sequência de chegadas de veículos e peões embora, havendo procura para tal quando termina a fase motorizada principal, deverá ser dada prioridade à fase pedonal relativamente à fase motorizada secundária.

Este tipo de solução permite servir com grande segurança os atravessamentos pedonais, já que estes se efectuam sem oposição dos veículos, embora quando os peões precisam de atravessar dois dos eixos rodoviários tal implique que o façam ao longo de dois ciclos sucessivos.

Por outro lado há que ter em atenção que a formalização de uma fase exclusiva para peões pode ser uma solução bastante penalizadora da capacidade global de escoamento do tráfego automóvel. Quando esta penalização é inaceitável podem ser adoptadas soluções intermédias, menos penalizadoras, em que se assume a existência de atravessamentos pedonais com oposição, em que a fase que serve os movimentos de atravessamento pedonal do eixo principal serve também os movimentos motorizados secundários podendo ser activada por qualquer destes movimentos.

Esta é a solução representada no esquema geométrico e fluxograma da Figura 47 onde se justifica realçar a utilização de duas sub-fases secundárias de modo a durante os períodos de ponta, onde a fase B tenderá a estender-se até à sua duração máxima, permitir a minimização dos tempos de limpeza na transição da fase secundária para a fase principal.

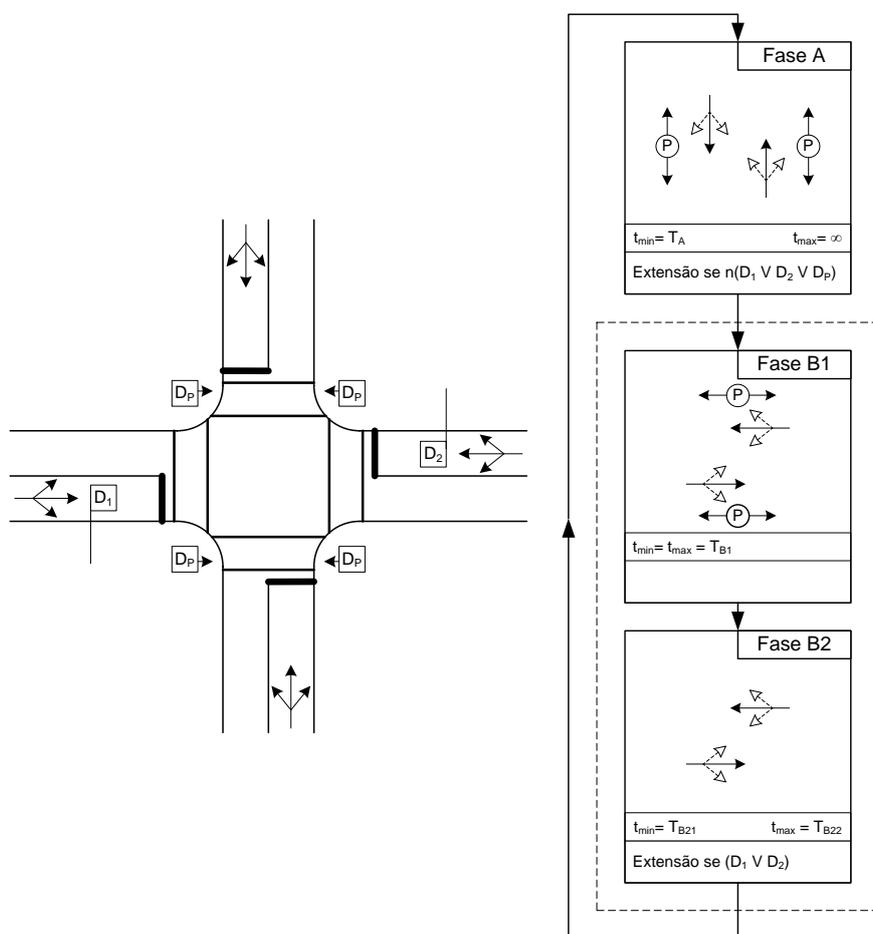


Figura 47 – Soluções com activação dinâmica de fase pedonal não exclusiva

VI.3 Outras soluções e estratégias de actuação

O conjunto de estratégias descritos de seguida é aplicável na resolução de situações mais específicas mas que podem revelar-se críticas para o funcionamento eficiente do sistema rodoviário.

Algumas destas só recentemente puderam conhecer uma aplicação mais generalizada devido ao desenvolvimento de novas soluções telemáticas viabilizadas pelos recentes avanços ao nível da informática e telecomunicações.

VI.3.1 Estratégias anti-bloqueio

Este tipo de estratégia é aplicável a situações onde, no próprio cruzamento em estudo, a extensão das durações das fases podem criar situações de bloqueio e não escoamento de algumas correntes de tráfego que estão a receber verde devido ao crescimento exagerado de filas de trânsito de correntes de tráfego que estão num estágio de vermelho.

Este é por exemplo o caso dos movimentos de viragens à esquerda a partir de vias segregadas de extensão limitada (ver a Figura 48).

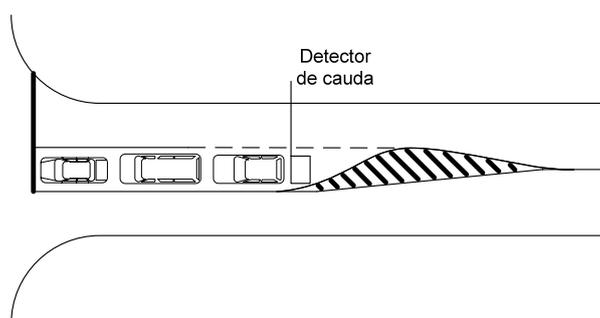


Figura 48 – Exemplo de uso de detector de cauda em vias segregadas de viragem à esquerda

Neste caso, se estes movimentos são servidos através de uma situação de verde com oposição em paralelo com o verde dado aos movimentos de atravessamento, verificando-se uma capacidade muito limitada, ou se são mesmo servidos em fase autónoma num tempo posterior à fase que serve os movimentos de atravessamento, pode verificar-se uma situação em que as respectivas filas de espera enchem as vias de “stockagem” e comecem a invadir a via de acesso comum a outros movimentos bloqueando a sua mobilidade.

Esta situação pode, muitas vezes, ser evitada ou minimizada através da utilização de um detector de cauda capaz de detectar a existência de uma fila estacionária de dimensão potencialmente crítica (trata-se assim de um detector de presença sem memória), o que poderá permitir despoletar um faseamento da regulação alternativo que poderá passar ou

pela antecipação do serviço das viragens à esquerda ou pelo fecho antecipado do serviço das correntes de tráfego em risco de serem afectadas.

Este tipo de estratégia é também aplicável quando o congestionamento num cruzamento ou a sua tendência para criação de filas transitórias de dimensão significativa resultantes da utilização de ciclos elevados começa a provocar o bloqueio de um cruzamento localizado a montante de uma das entradas (ver a Figura 49).

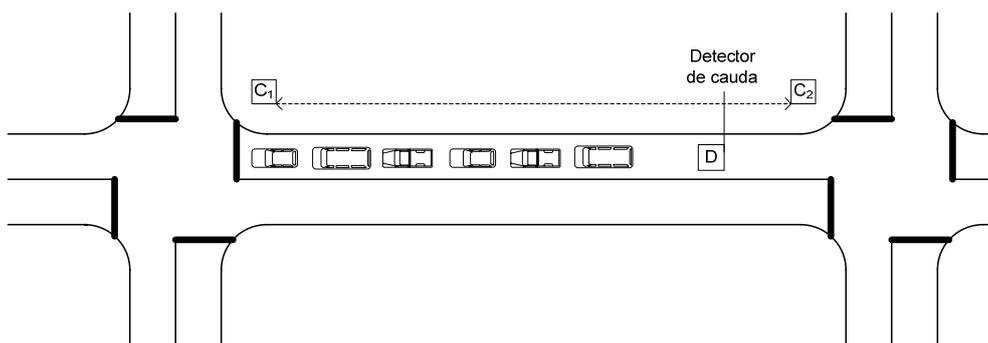


Figura 49 – Exemplo de uso de detector de cauda em acessos congestionados

Neste caso, mesmo sem se avançar para uma gestão centralizada e coordenada da rede rodoviária, será eventualmente possível prevenir a ocorrência destas situações através da implantação dos mesmos sensores de cauda em secções onde a presença de filas estacionárias indique o risco mais ou menos iminente de ocorrência dos bloqueios.

A informação recolhida através destes sensores poderá então ser encaminhada ou para o controlador do cruzamento que está a provocar o problema, para que no seu plano de regulação seja activada uma sequência de fases que permita aumentar o escoamento na entrada problemática, ou poderá ser encaminhada para o controlador do cruzamento a montante para que neste o afluxo de tráfego ao dito acesso seja reduzido.

Um outro tipo de estratégia, com níveis de aplicação cada vez mais importantes, centra-se na utilização dos chamados “sistemas de detecção de incidentes (ocorrências excepcionais com impacto significativo no desempenho da rede)”, inseridos em sistemas e estratégias integrados de gestão operacional de redes rodoviárias.

Nestes casos os sistemas de detecção são utilizados para a identificação rápida de roturas de escoamento do tráfego em secções importantes da rede, que podem ocorrer quando, por exemplo, se verifica a ocorrência de um acidente.

Esta detecção pode ser baseada na informação conjuntamente recolhida por sensores de passagem existentes a jusante do incidente, capazes de registar um súbito abaixamento do fluxo de tráfego, e por sensores de presença existentes a montante do incidente, capazes de registar um aumento súbito da taxa de ocupação da via.

Os dados assim recolhidos podem então ser utilizados para activar precocemente os relevantes serviços de emergência, melhorando a qualidade da resposta dos serviços de emergência médica, e reduzindo o período durante o qual as condições de escoamento estão afectadas, minimizando assim a magnitude do seu impacto quer em termos de demoras médias criadas, quer em termos de dimensão da rede rodoviária afectada.

Esta informação pode também ser utilizada por sistemas de informação em tempo real *on-route* ou “remotos”, de modo a, de acordo com as possibilidades, reencaminhar os automobilistas para trajectos alternativos menos ou não afectados pelo incidente.

VI.3.2 Variação dinâmica da prioridade de cada corrente de tráfego

Este tipo de estratégia é tendencialmente particularmente útil nos casos onde existem pontos de conflito significativos entre veículos motorizados e peões com os padrões temporais dos fluxos pedonais a registarem picos muito intensos mas de curta duração. É o caso, por exemplo, de uma passadeira semaforizada localizada junto a uma gare intermodal.

Nestes casos os novos sistemas de detecção e contagem remota de peões, desenvolvidos com base por exemplo em sistemas de micro-ondas ou infravermelhos, podem ser utilizados para que, sem significativo prejuízo para o tráfego motorizado, seja pontualmente dada prioridade quase absoluta aos picos de procura pedonal, com óbvias vantagens ao nível das demoras e segurança destes utentes.

Também na regulação das necessidades conflitantes entre diferentes correntes de tráfego onde uma delas possa registar períodos repetidos mas não totalmente previsíveis no tempo com picos de procura de curta duração (por exemplo junto a grandes parques de estacionamento que sirvam eventos pontuais), será eventualmente útil a utilização de uma estratégia de atribuição pontual de uma maior prioridade de acesso a essa corrente de tráfego.

Esta estratégia poderá ser implementada através da localização adequada de um sensor de passagem capaz de contagem de veículos de modo a que esses afluxos anormais de tráfego possam ser detectados com antecedência e a respectiva informação possa ser utilizada para a adopção da regulação dos sinais luminosos mais adequada.

VI.3.3 Soluções especiais de apoio ao peão e minimização de demoras dos veículos

O aparecimento e vulgarização de novos sistemas de detecção da presença e mobilidade dos peões criou a oportunidade para o desenvolvimento de novas estratégias de regulação dos atravessamento pedonais, particularmente em travessias isoladas, com o intuito de, por um lado, minimizar as demoras impostas aos peões e aumentar a sua segurança de atravessamento e, por outro, evitar demoras escusadas aos veículos motorizados.

Foram assim, por exemplo, já estudadas estratégias de manipulação da “janela” de oportunidade de abertura da fase pedonal através da detecção antecipada da aproximação dos peões à travessia (através de sensores de movimento) usada para, de acordo com as necessidades, antecipar ou atrasar os processos de transição de fases no plano de regulação e permitir assim que a oferta de verde ao peão possa ser feita mais próximo do momento em que este confirma a sua presença através da utilização da botoneira.

Também uma estratégia de apoio a peões atrasados, na terminologia anglo-saxónica designados de *late-comers*, ou com especiais dificuldades de mobilidade, que se encontram ainda na travessia quando está iminente o final do período de limpeza dos peões, é possível através da utilização de sensores capazes de detectar o movimento dos peões.

Esta detecção poderá depois ser utilizada ao nível do plano de regulação para se proceder à extensão muito limitada do tempo de limpeza de modo a que, sem o peão se aperceber para evitar o abuso do sistema, este possa ser ajudado e sejam evitados alguns conflitos com o tráfego motorizado.

Finalmente é também possível adoptar uma estratégia de minimização de demoras “inúteis” por parte do tráfego motorizado que ocorrem quando um peão prime a botoneira de um atravessamento pedonal e depois atravessa ainda no vermelho, fazendo com que a posterior abertura da fase de verde para os peões seja no mínimo inútil e, muitas vezes penalizadora e frustrante para os condutores dos veículos afectados.

A ocorrência deste tipo de situação pode ser reduzida através da utilização junto aos pontos de travessia de sensores de presença (sem memória) de peões, que permitam ao sistema validar a continuada relevância da chamada feita pelos peões usando a botoneira. Existem já comercializados sensores do tipo “tapete” que funcionam em resposta à pressão imposta pelo peso dos peões.

Relativamente a este tipo de estratégias de apoio ao peão, existe já um conjunto de soluções integradas de regulação de atravessamentos pedonais isolados sendo de referir os sistemas Pelican, Puffin e Toucan que estão descritos no fascículo sobre Peões da presente colecção.

No ponto VI.4 é também apresentada a lógica de regulação de um cruzamento com sinais luminosos onde foi feita uma aplicação integrada de algumas destas estratégias no serviço de um atravessamento pedonal.

VI.3.4 Estratégias e soluções de controlo das velocidades dos veículos

O controlo das velocidades de circulação automóvel é uma questão muito importante enquanto instrumento de prevenção da sinistralidade automóvel, sendo que uma das soluções com grande aplicação em Portugal, nomeadamente em atravessamentos de localidades por estradas nacionais mas também em espaços urbanos, é a aplicação de soluções semaforicas de controlo de velocidades. Este tipo de soluções semaforicas é habitualmente aplicado em troços de estrada corrente, de forma autónoma relativamente a outras instalações de controlo activo do tráfego.

Genericamente, podem ser identificados dois tipos de estratégias de intervenção, uma virada para o controlo das velocidades médias dos veículos e outra virada para o controlo das velocidades instantâneas, a partir de cuja aplicação resultam dois grandes tipos de soluções.

A aplicação da estratégia de controlo das velocidades instantâneas passa pela medição das velocidades dos veículos num ou mais pontos de um determinado troço de estrada e pela utilização em tempo real dessa informação para determinar o estado de um sinal luminoso colocado a jusante desse troço, sendo activado o sinal vermelho quando um veículo for detectado a circular a uma velocidade superior à permitida.

Este tipo de estratégia pode ser aplicado com recurso a diferentes sistemas de medição de velocidades e a diferentes *layouts* com diferentes localização e número de sensores, resultando em soluções com diferentes potencialidades e custos de implementação. Podem-se, no entanto, identificar dois grandes tipos de soluções deste tipo, as baseadas na detecção por espiras electro-magnéticas embebidas no pavimento e as baseadas em sistemas de radar.

Este último tipo, presentemente com grande popularidade em Portugal devido ao seu menor custo e maior facilidade de implantação, apresenta um *layout* genérico com um sistema de detecção que está direccionado para uma zona alargada de aproximação de veículos, da ordem das dezenas de metros, associado a um controlador que, em tempo real, regula um sistema de sinais luminosos (ver a Figura 50).

Este sistema é complementado com pré-sinalização de aviso e informação, podendo ainda ter associado um sistema de fiscalização. A informação recolhida pelo detector é utilizada em tempo real pelo controlador que gere o sistema de sinais luminosos colocado a jusante da zona de detecção (ver ainda a Figura 50).

A fase base da sinalização, correspondente à situação onde não se verificam excessos de velocidade, corresponde à apresentação da luz verde ou amarelo intermitente. Em caso de detecção de uma velocidade excessiva por um veículo em qualquer ponto da zona sob observação, o sistema imediatamente inicia o processo de transição que leva à apresentação do sinal vermelho.

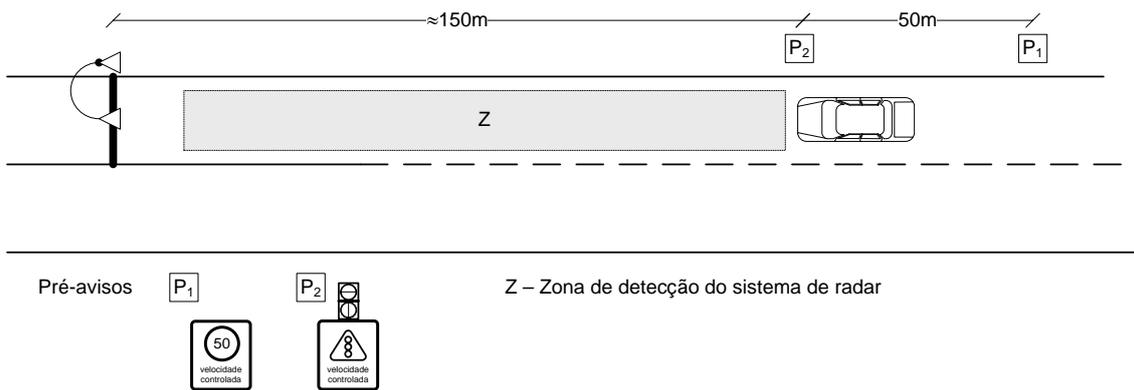


Figura 50 – Sistema de controlo de velocidades instantâneas baseado em radar

Este tipo de solução, para além do custo e facilidade de instalação, apresenta como aspecto mais positivo o facto de praticamente garantir a detecção e sancionamento de qualquer velocidade excessiva registada na zona sob controlo.

Por outro lado, apresenta como aspecto menos favorável o facto de o sistema tratar do mesmo modo veículos que sejam detectados em diferentes pontos, localizados a diferentes distâncias do semáforo de controlo, levando a que em muitas circunstâncias este é fechado cedo demais afectando veículos não faltosos que se encontram a jusante do infractor, potenciando algum sentimento de rejeição da solução por parte dos condutores e podendo mesmo em situações de tráfego significativo gerar condições de escoamento muito pouco fluidas.

Outro aspecto menos positivo liga-se à dificuldade de delimitação precisa da zona de controlo, que resulta numa propensão para o registo de falsas detecções resultantes de movimentos verificados nas imediações, nomeadamente do tráfego de sentido oposto, que levam à activação não justificada do sinal vermelho com consequências indesejáveis.

As soluções de controlo das velocidades instantâneas baseadas em sensores electro-magnéticos apresentam normalmente uma configuração semelhante (ver a Figura 51), mas onde o sistema de detecção está localizado num ponto fixo, aproximadamente a 150 metros do semáforo (a distância precisa depende das velocidades registadas).

No seu formato standard, este tipo de solução apresenta a mesma lógica de activação que o sistema baseado no radar, apresentando ao nível do desempenho a vantagem de poder ter claramente menos falsas detecções e como desvantagem o facto de que os veículos apenas são monitorizados num ponto do trajecto, podendo assim o sistema ser “enganado” pelos condutores, se estes passarem sobre o sensor cumprindo os limites de velocidade e acelerando de seguida.

Ao nível do problema já referido de afectação de condutores “inocentes” apanhados entre o semáforo e o veículo infractor, este tipo de solução pode ser ligeiramente mais

favorável já que permite alguma gestão do momento de fecho de semáforo relativamente ao momento de detecção tendo em atenção a velocidade do condutor infractor. O desempenho deste tipo de solução pode ainda ser optimizado com utilização de um segundo conjunto de sensores localizados num ponto intermédio entre os sensores base e o semáforo, permitindo assim uma monitorização um pouco mais continuada dos veículos e evitando assim, em alguns casos, a necessidade de activações muito precoces do semáforo.

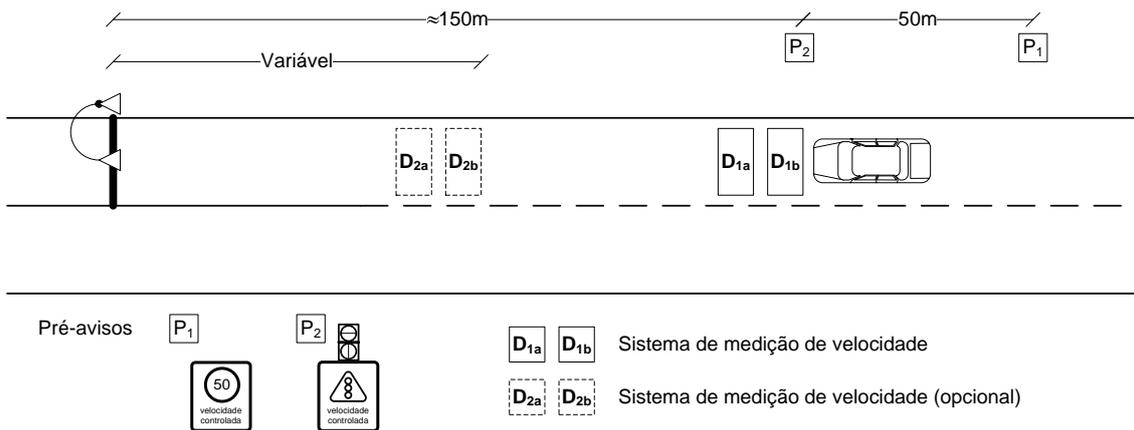


Figura 51 – Sistema de controlo de velocidades instantâneas com sensores electro-magnéticos

Os sistemas baseados em estratégias de controlo das velocidades médias, muito comuns por exemplo em Espanha, apresentam uma estrutura e lógica de funcionamento algo diferentes relativamente aos anteriores.

Assim, tal como os anteriores, possuem um sistema de informação que é colocado a alguma distância do semáforo de controlo (ver a Figura 52). Este sistema que chama a atenção para o limite de velocidade poderá ser passivo ou activo, caso em que estará ligado ou a um simples sistema de detecção activado a cada passagem, ou a um sistema de medição de velocidades activado apenas quando é detectado um excesso de velocidade.

Já o sistema de controlo do comportamento dos veículos é formado por um segundo sistema de detecção, com um ou dois sensores, colocado a 70/100 metros do semáforo, e destinado à identificação do momento e, desejavelmente, da velocidade de passagem de cada veículo.

Existe ainda um terceiro sistema de detecção de presenças, colocado junto mas ainda a montante do semáforo e que se destina a servir os veículos que abrandam após passarem o segundo sistema de detecção ou que entram no arruamento após este e que, por isso, poderiam de outra forma ficar retidos indefinidamente no semáforo.

Finalmente pode ainda existir um quarto sistema de detecção, apontado para as imediações do semáforo, mas a jusante deste, destinado a identificar os veículos que passam no vermelho.

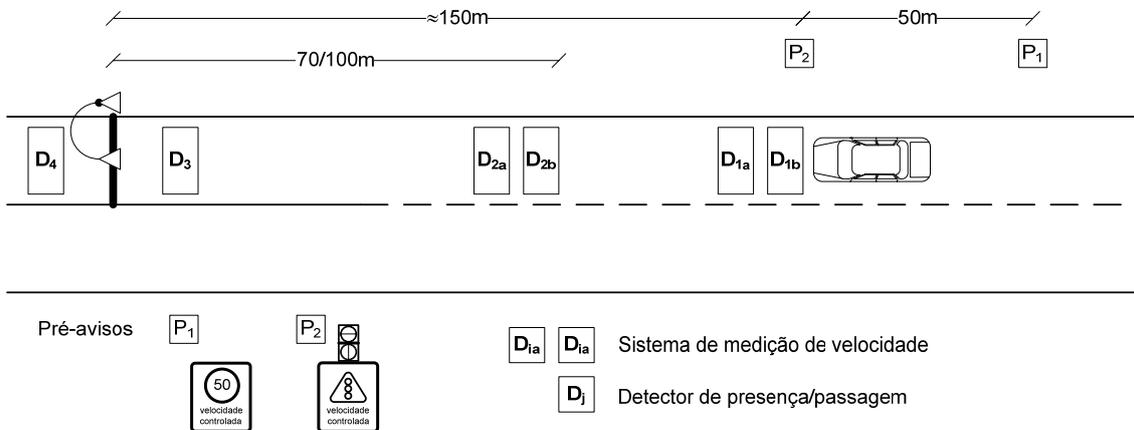


Figura 52 – Sistema de controlo de velocidades médias

A lógica de funcionamento do sistema, pelo seu lado é completamente diferente dos sistemas anteriores, baseando-se numa posição de base, de repouso, com o semáforo em vermelho, sendo o verde dado a cada veículo isolado apenas alguns segundos depois de este passar pelo segundo sistema de detecção, de modo a garantir que o veículo circula a uma velocidade média inferior à limite, e passando depois o semáforo outra vez a vermelho. No caso de veículos circulando em pelotão o tempo de verde é estendido enquanto, através do segundo sistema de detecção, for registada continuidade de procura. Finalmente, como já foi referido, existe uma “válvula” de segurança destinada a evitar que os veículos possam ficar indefinidamente presos no semáforo.

Este sistema é muito eficaz no controlo das velocidades e na manutenção da fluidez do trânsito, podendo no entanto, por vezes, durante a passagem dos pelotões verificar-se um progressivo aumento das velocidades com ultrapassagem não controlada dos limites pré-estabelecidos, situação que pode ser minimizada se o segundo sistema de detecção permitir a medição destas velocidades.

É de notar, finalmente, que a todas estas tipologias de soluções, tendem a estar associados níveis pequenos, mas não desprezíveis, de desrespeito deliberado da sinalização como resultado da expectativa do condutores de que tal não resulta na geração de situações perigosas, antes apenas na assumpção de algum risco de penalização através de fiscalização.

É esta a razão porque, como acima foi já referido, este tipo de soluções deve em condições normais ser aplicado de forma isolada, devendo-se evitar nomeadamente a utilização da mesma sinalização luminosa para o controlo de um atravessamento

pedonal, já que tal pode resultar na ocorrência de níveis de situações de atropelamento anormais.

Poderá, no entanto, ser interessante a incorporação de uma estratégia de controlo de velocidades no âmbito de um plano de regulação de um cruzamento desde que tal seja feito de forma imperceptível para os utentes, já que tal poderá permitir ter os benefícios pretendidos, minimizando a probabilidade de ocorrência dos comportamentos perigosos acima identificados e portanto as suas potenciais consequências.

VI.3.5 Estratégias de atribuição de prioridade a veículos especiais

As soluções tecnológicas presentemente disponíveis permitem o desenvolvimento de soluções de regulação semafórica onde, em tempo real, é dada prioridade absoluta ou relativa a determinados utentes do sistema rodoviário.

Podem justificar tratamento prioritário, muitas vezes absoluto, os chamados “veículos prioritários”, que incluem os veículos de emergência médica, dos bombeiros ou das forças policiais, quando em marcha de emergência. Pela sua maior eficiência no transporte de pessoas, podem também justificar alguma prioridade, embora normalmente não absoluta, os veículos de transportes colectivos.

A solução tecnológica mais simples, que utiliza sensores electromagnéticos colocados no pavimento, só tem aplicabilidade no apoio aos TC e em situações onde o acesso destes veículos ao cruzamento em causa se faz através de vias exclusivas do tipo BUS.

Neste tipo de solução são colocados detectores de passagem em pontos localizados a montante do cruzamento onde se pretende atribuir a prioridade, a uma distância suficiente de modo a que a informação recolhida possa ser utilizada na lógica de regulação do cruzamento.

Pelo contrário, as novas tecnologias, já atrás referidas, baseadas na utilização de *transponders* colocados nos veículos prioritários e de receptores colocados à beira dos arruamentos em pontos a montante dos cruzamentos em causa, ao permitirem a identificação destes veículos mesmo quando estes circulam integrados nas correntes de tráfego normais, permitem já a sua aplicação num número bastante mais alargado de situações.

Em qualquer dos casos as soluções de regulação actuada destinadas à atribuição de tratamento preferencial a determinados tipos de utentes do sistema baseiam-se no essencial na incorporação nos respectivos planos das seguintes estratégias:

- Antecipação da fase que serve o acesso utilizado pelo veículo prioritário, quando este é detectado a montante do cruzamento num momento em que esse acesso está encerrado e em que tal situação se manterá quando o veículo chegar ao cruzamento se não se modificar a sequência normal do plano de regulação;

- Prolongamento da fase que serve a via usada pelo veículo prioritário, quando ele é detectado a montante do cruzamento num momento em que esse acesso está aberto mas estando previsto o seu encerramento antes do veículo chegar ao cruzamento, se não existir uma alteração da sequência normal do plano de regulação.

Note-se que a aplicação do princípio, acima enunciado, de diferenciação do grau de prioridade dos veículos dependendo da sua função, leva a que a activação destes processos de antecipação ou prolongamento de fase não seja sempre automática, podendo, relativamente aos veículos menos prioritários, ser condicionada à existência de uma “janela” de oportunidade pré-definida no plano de regulação.

VI.3.6 Estratégias de minimização dos impactos do congestionamento na rede

Em espaços urbanos onde se verificam problemas significativos de congestionamento e onde não é possível ou desejável um aumento significativo da capacidade global de escoamento do tráfego, recorre-se por vezes a estratégias de controlo inteligente deste congestionamento de modo, não a eliminá-lo ou mesmo a reduzi-lo, mas antes a minimizar o seu impacto negativo. Tal passa por conseguir que os fenómenos de congestionamento tendam a ocorrer em zonas onde o seu impacto seja menor quer relativamente às condições de circulação dos vários utentes rodoviários, particularmente os transportes colectivos, quer sobre a qualidade urbana e ambiental dos diversos espaços da zona intervencionada.

Para tal, em redor das zonas da rede que se pretende sejam protegidas da ocorrência de congestionamento, e em pontos a montante dos quais existem condições para, com custos aceitáveis, acomodar fenómenos de formação sistemática de filas de tráfego não transitórias, é implementado um conjunto de “portões virtuais” de controlo dos afluxos de tráfego a essas zonas.

Estes portões virtuais mais não são do que sistemas actuados de sinais luminosos onde alguns dos sistemas de detecção são utilizados para a quantificação dos fluxos de tráfego que estão a afluir na direcção da rede da zona a proteger, sendo depois essa informação utilizada ao nível dos planos de regulação para garantir que, em cada momento, só serão servidos os veículos que se considera serem “suportáveis” por essa parte da rede.

VI.3.7 Estratégias de recurso

Em todos os planos actuados é desejável a existência de regras de regulação de excepção que possam ser activadas de forma automática quando se verifica uma anomalia nas condições de funcionamento dos detectores, como sejam a sua avaria e

consequente desactivação ou a sua activação permanente devido, por exemplo, a um veículo indevidamente estacionado.

No caso de avarias, os sistemas podem estar preparados para emitirem avisos, eventualmente através de contacto remoto para uma central de comando, sempre que os sensores não registarem nenhuma detecção durante um determinado período. Para estes casos muitos dos sistemas comercializados apresentam já soluções tipo de intervenção pré-definidas.

No caso de interferência com activação permanente devido a estacionamento indevido, é também possível definir um processo de identificação deste tipo de situação através da medição da taxa de ocupação registada pelo sensor, que sempre que, durante um determinado período ultrapassar um valor médio pré-estabelecido, implicará a activação de um plano de recurso que despreze a informação desse sensor.

VI.4 Exemplo de aplicação integrada de um conjunto variado de estratégias

No presente exemplo é apresentado a organização geométrica e o fluxograma de um cruzamento com um funcionamento semi-actuado (ver Figura 53).

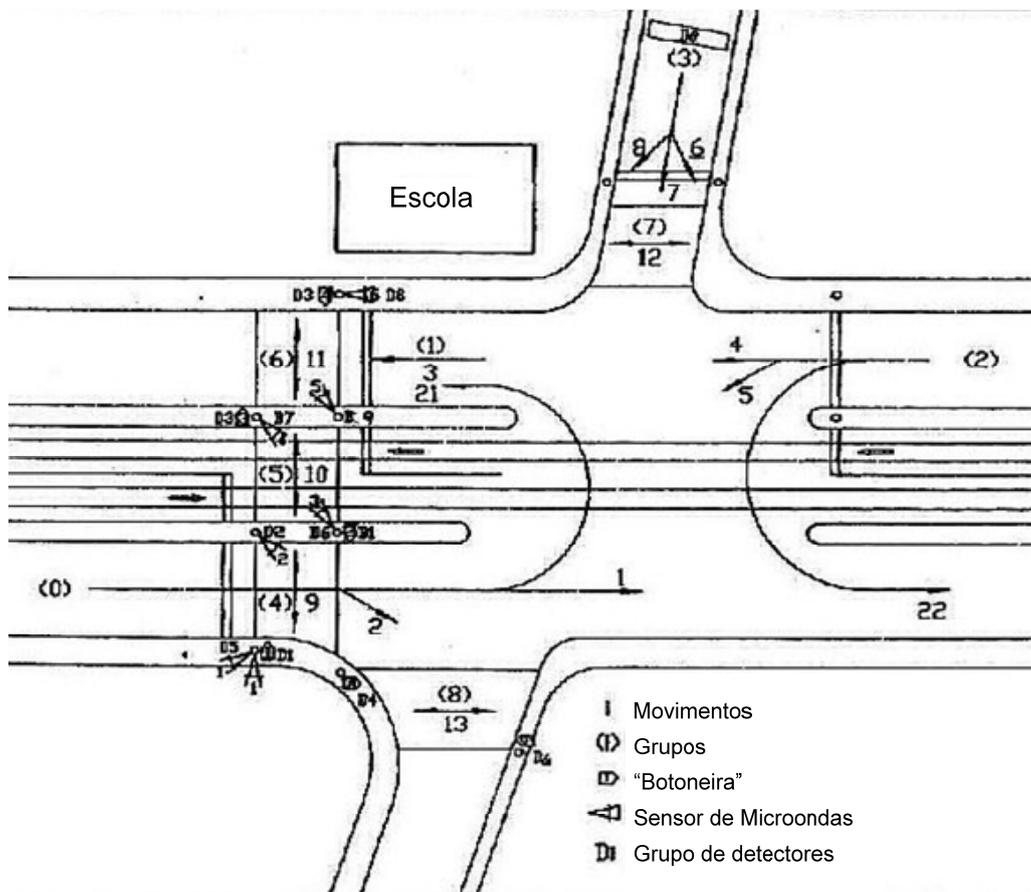


Figura 53 – Geometria de cruzamento com plano actuado multi-estratégia

Neste, a existência próxima de um equipamento escolar, levou à inclusão de um conjunto alargado de estratégias de optimização das condições de operação do principal atravessamento pedonal (ver a Figura 54 e também a Figura 55).

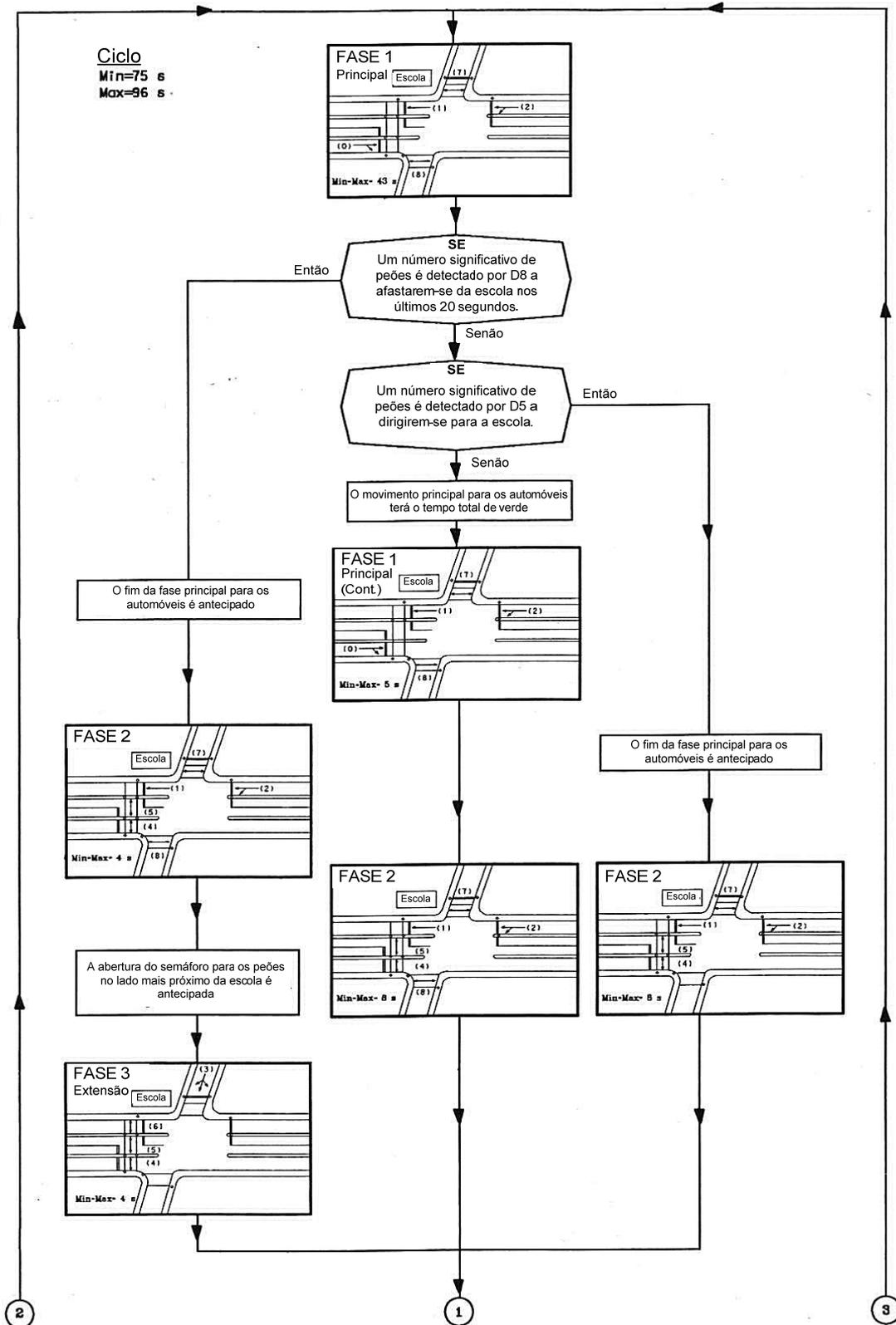
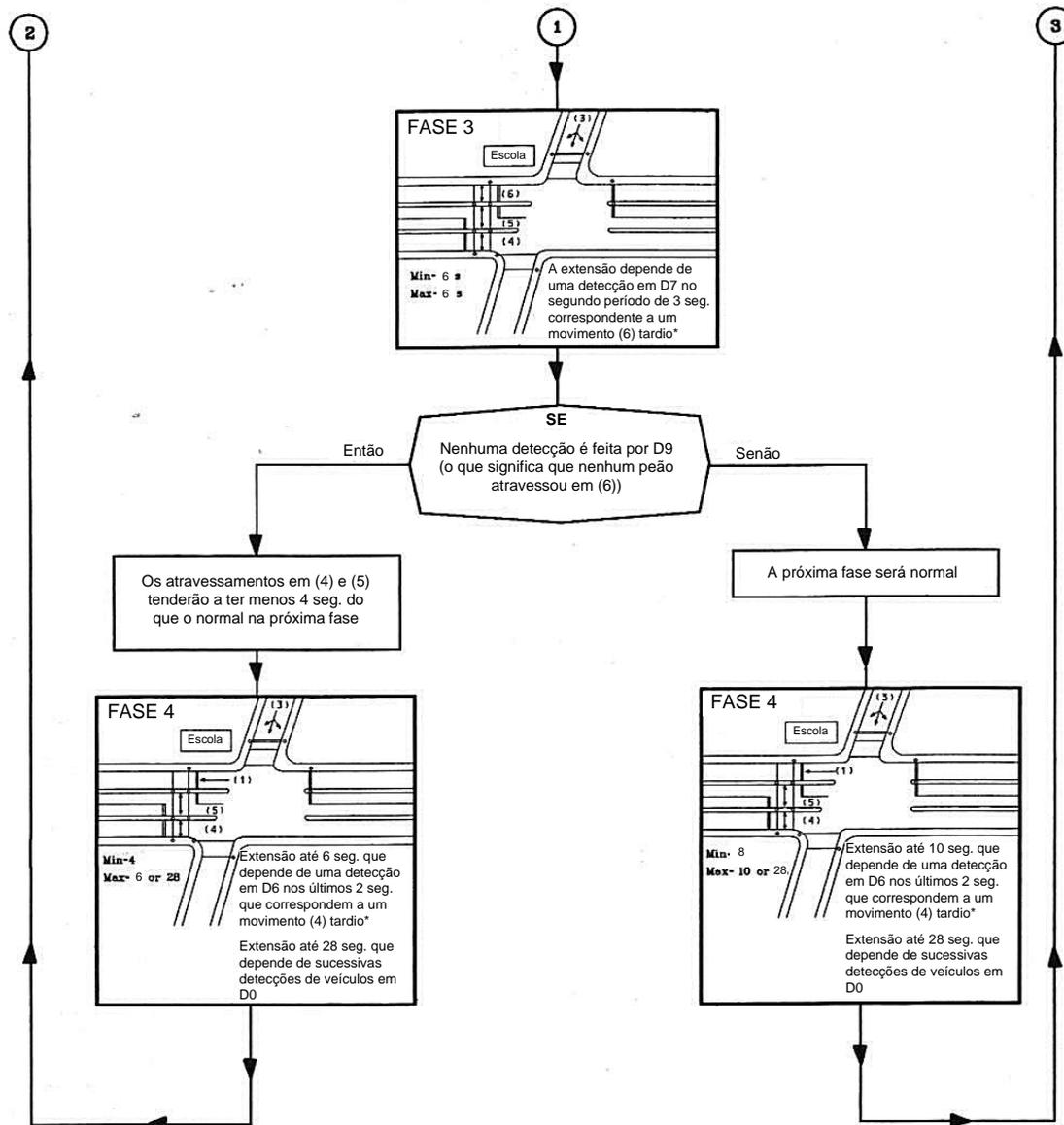


Figura 54 – Fluxograma (P-1/2) cruzamento com plano actuado multi-estratégia



* Normalmente, este tipo de extensão excepcional de muito curta dimensão seria incorporado no período de transição no final da fase. No entanto, neste caso, esta extensão destina-se a que peões, que AINDA NÃO iniciaram o atravessamento, ainda sejam compelidos a fazê-lo graças ao prolongamento do tempo de verde.

Figura 55 – Fluxograma (P-2/2) cruzamento com plano actuado multi-estratégia

Note-se assim, nomeadamente, a aplicação de estratégias de alteração dinâmica da prioridade relativa atribuída à travessia pedonal dependendo da importância da respectiva procura em cada momento, bem como de extensão por motivos de segurança da duração dos tempos de limpeza a ela atribuídos.

Pode-se, no entanto, verificar também a aplicação em paralelo de uma estratégia de minimização da ocorrência do prolongamento desnecessário, por inexistência de procura, de fases dirigidas ao serviço dos peões.

As estratégias especiais de apoio ao peão, mas também a estratégia de minimização da activação desnecessária das fases que os apoiam, foram tornadas possíveis pela utilização conjunta não apenas dos tradicionais sensores por botoneira, mas também por sensores de infravermelhos, capazes de detectar os movimentos dos peões.

A informação recolhida por este último tipo de sensores foi utilizada quer para, através da verificação pontual do seu estado (activo/inactivo), detectar a presença de peões num determinado local em determinado momento, quer para, através da monitorização em determinados períodos da sua taxa de ocupação média, detectar a aproximação ao cruzamento de um número anormal de peões.

VII COORDENAÇÃO DE SINAIS LUMINOSOS

VII.1 Introdução

A utilização de sinais luminosos em cruzamentos com influência recíproca recomenda que se estabeleça uma interligação entre os diferentes sinais de forma a facilitar o movimento dos veículos, reduzindo o seu atraso total e/ou número de paragens devido a um aproveitamento mais eficaz do tempo de verde.

Assim, os cruzamentos serão estudados em conjunto, o que nas soluções clássicas exige que a duração do ciclo nos cruzamentos seja constante, embora se admita reduzi-la para metade da duração do ciclo comum, nos cruzamentos onde sejam pequenos os volumes de tráfego.

O problema da coordenação de sinais luminosos apresenta níveis de dificuldade crescente, conforme se trate de percursos de sentido único, percursos de sentido duplo ou redes viárias, sendo nestes casos, em geral, indispensável, recorrer a programas de cálculo automático.

Os métodos de cálculo dependem por um lado do tipo de simplificações realizadas no modelo de tráfego destinado a prever o comportamento dos veículos e por outro lado do modelo de optimização adoptado. Há necessariamente de encontrar um equilíbrio entre o realismo dos modelos e a sua complexidade, já que nem interessa ter modelos com um desenvolvimento elevado mas de difícil aplicação, nem modelos demasiado simplistas cujos resultados se tornam inúteis por não reproduzirem a realidade.

A definição da coordenação exige que, uma vez conhecido a duração do ciclo comum a todos os cruzamentos, que em princípio poderá ser o maior dos valores óptimos em cada cruzamento e a respectiva repartição pelas diferentes fases, se determine em relação a uma origem do tempo arbitrária em que momento é que se dará início à fase designada como “principal” em cada cruzamento.

VII.2 Sistemas coordenados em percursos de sentido único

A coordenação de cruzamentos integrando eixos de sentido único não oferece dificuldade de maior, pois bastará dar início ao verde da fase de progressão dos veículos

ao longo do itinerário em cada cruzamento (fase principal), de modo que o seu movimento possa tanto quanto possível ser feito sem paragens desnecessárias.

Assim, a abertura dos tempos de verde é progressiva, sendo o intervalo de tempo entre os inícios de verde de sinais consecutivos (desfasamento) dependente da distância entre eles e da velocidade de avanço dos veículos, isto é:

$$\delta = \frac{e}{v} \tag{65}$$

sendo,

δ – desfasamento

e – distância entre cruzamentos

v – velocidade entre cruzamentos

Na Figura 56 mostra-se num diagrama espaço/tempo as trajectórias dos veículos que beneficiam da coordenação ao longo de um itinerário no sentido marcado no esquema.

As rectas AB e CD representam a passagem dos 1º e último veículos após a abertura do verde, delimitando a banda de passagem (onda verde) cuja duração de passagem representa o tempo durante o qual os veículos que se deslocam à velocidade previamente definida para a sua progressão não sofrem paragens ao longo do itinerário.

Como é evidente as bandas de passagem repetem-se com periodicidade igual à duração do ciclo, sendo em percursos de sentido único a duração de passagem dada pelo menor tempo de verde existente no itinerário.

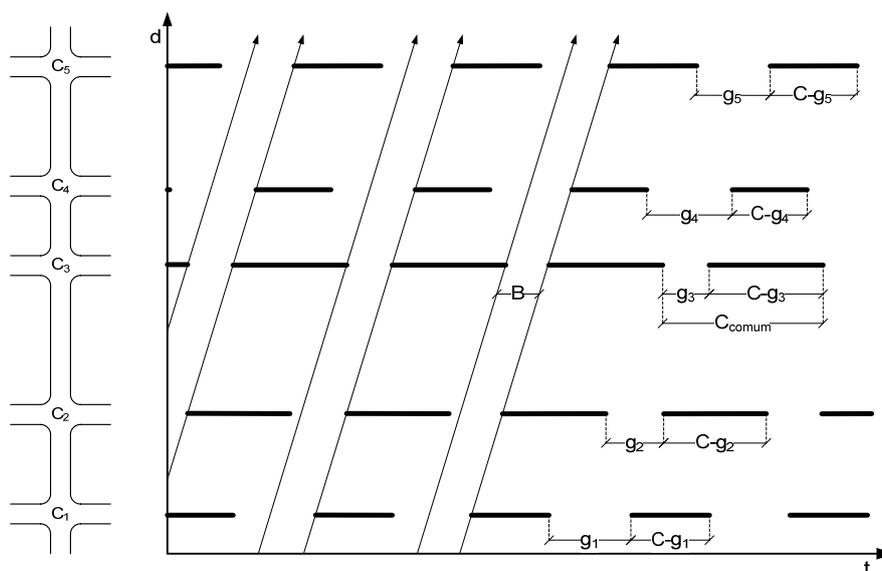


Figura 56 – Diagrama espaço/tempo das trajectórias coordenadas segundo um determinado sentido de trânsito

VII.3 Sistemas coordenados em percursos de sentido duplo

VII.3.1 Introdução

Enquanto que no caso anterior o estabelecimento de sistemas coordenados de sinalização luminosa é simples e eficiente permitindo o maior aproveitamento possível do tempo de verde, nos percursos de sentido duplo há que contar com o tráfego que circula em sentido oposto, proporcionando-lhe uma duração de passagem para que se obtenha, também para este sentido, uma efectiva melhoria das condições de circulação.

Se no diagrama espaço-tempo representado na Figura 56, mantendo a coordenação integralmente direccionada para um dos sentidos de tráfego, fossem representadas as trajectórias dos veículos que se deslocariam à mesma velocidade no sentido oposto, reconhecia-se facilmente que a banda de passagem, a existir, seria bastante estreita, havendo um claro benefício de um sentido em prejuízo do outro.

Para se adoptar uma solução de compromisso entre os dois sentidos existem vários métodos de coordenação de sinais luminosos de um itinerário com sentido duplo, sendo o método da maximização das durações de passagem que a seguir se apresentará um dos mais utilizados.

VII.3.2 Método da maximização das durações de passagem

No método da maximização das durações de passagem pretende-se obter uma coordenação entre sinais luminosos que proporcione aos veículos o maior tempo possível para que se possam deslocar ao longo do itinerário, num e noutro sentido, sem terem necessidade de parar, resultando consequentemente numa condução mais confortável já que se garante que o número total de paragens ao longo do itinerário pelo conjunto dos veículos será o menor possível

Consiste em maximizar a soma $(b+b^*)^3$ das durações de passagem referentes a cada um dos sentidos (ascendente e descendente) do itinerário, sendo dados os seguintes elementos:

- número e localização dos cruzamentos
- duração do ciclo comum a todos os sinais
- proporção do tempo de verde útil para o itinerário em todos os cruzamentos
- velocidade em cada sentido de circulação entre cruzamentos consecutivos
- volumes/débitos em cada sentido do itinerário.

³ Relativamente ao itinerário que estiver em estudo haverá um sentido designado de ascendente e outro de descendente sendo o símbolo * reservado para todas as variáveis referentes ao sentido descendente

Admite-se que o movimento dos veículos entre cruzamentos consecutivos pode ser representada no diagrama espaço-tempo por uma linha recta, isto é, a velocidade é constante e o ciclo divide-se em verde útil (g) e vermelho útil ($C - g$).

Trata-se de um método baseado num conjunto de teoremas que têm em conta apenas relações do tipo geométrico pelo que no seu formato base produz resultados que não entram em consideração com o peso relativo dos débitos de tráfego observados em cada sentido do itinerário. Este método apoia-se na seguinte conclusão fundamental:

“Existe sempre uma coordenação semi-inteira que, quaisquer que sejam as velocidades num e noutro sentido de circulação, v e v^* , maximiza $(b+b^*)$ com $b=b^*$ ”

Uma coordenação é semi-inteira quando os desfasamentos⁴ entre cada par de cruzamentos (i) (j), medidos entre os pontos médios do vermelho dos sinais nos cruzamentos, são dados por:

$$\phi_{ij} = \text{man} \left(\frac{t_{ij} - t_{ji}^*}{2} + \delta_{ij} \right) \quad (66)$$

com

$\delta_{ij} = 0$ ou $0,5$ e “man” representando a mantissa

sendo

ϕ_{ij} – desfasamento entre os sinais i e j medido entre os pontos médios dos respectivos vermelhos

t_{ij} – tempo de percurso entre os sinais i e j no sentido ascendente

t_{ji}^* – tempo de percurso entre os cruzamentos j e i no sentido descendente

Note-se que, se as velocidades nos dois sentidos forem iguais, $v_i = v_i^*$, então $t_{ij} = t_{ji}^*$, e o desfasamento ϕ_{ij} será 0 ou 0,5.

Por outro lado qualquer que seja a velocidade obtém-se sempre $t_{ij} = - t_{ji}^*$ (ou de um modo semelhante $t_{ij}^* = - t_{ji}$).

Convém notar que os valores de t_{ij} (ou t_{ji}^*) podem ser negativos e, portanto, sem significado físico, o que acontece quando, artificialmente, representa o tempo de percurso entre cruzamentos colocados à frente (ou atrás) e o sentido de progressão é descendente (ou ascendente).

⁴ Por comodidade na demonstração dos teoremas a que atrás se fez referência, as variáveis relacionadas com o tempo são medidas em unidades de ciclo, isto é, em todas elas é necessário dividir pela duração do ciclo C , pelo que o desfasamento ϕ_{ij} e todas as restantes variáveis da expressão (66) estão compreendidos entre 0 e 1, e daí a utilização da mantissa nesta expressão.

Assim, a utilização deste método resume-se a considerar apenas coordenações semi-inteiras, sendo suficiente analisar um único sentido atendendo a que $b = b^*$.

Verifica-se facilmente (ver a Figura 57) que uma coordenação que maximiza $(b+b^*)$ apresenta sinais críticos cujo tempo de vermelho limita as bandas de passagem dos dois sentidos e que impedem que estas sejam mais largas. Os sinais críticos são de dois tipos:

- Grupo 1 – se o tempo de vermelho limita a banda de passagem do sentido ascendente à esquerda e a banda de passagem do sentido descendente à direita
- Grupo 2 – se o tempo de vermelho limita a banda de passagem do sentido ascendente à direita e a banda de passagem do sentido descendente à esquerda

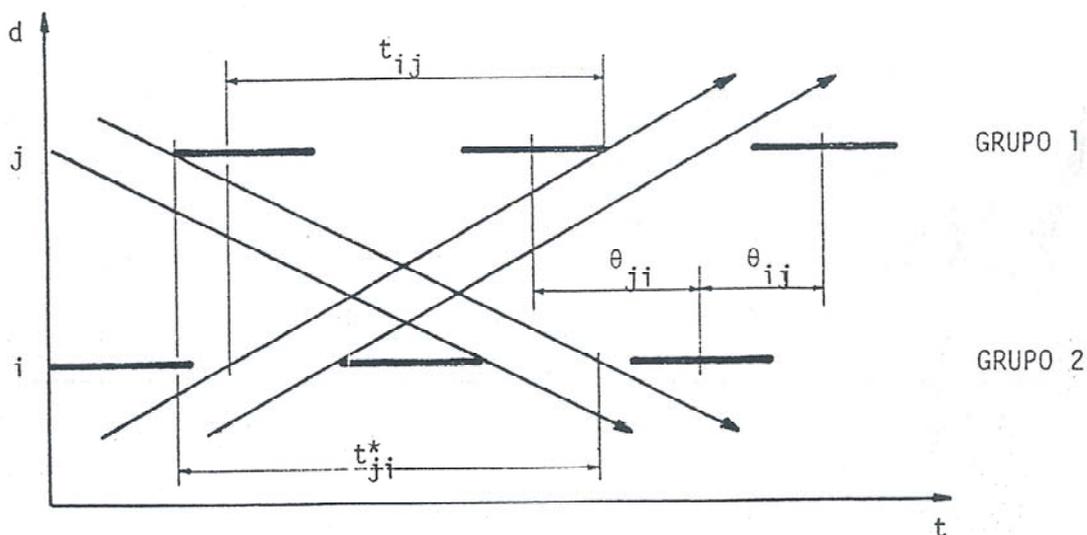


Figura 57 – Sinais críticos

VII.3.3 Determinação da duração de passagem igual nos dois sentidos

Para determinar a duração de passagem $b = b^* = B$ máxima relativa a uma trajectória que percorra um conjunto de sinais luminosos irá proceder-se a uma estimação das diferentes bandas possíveis dependendo da função relativa atribuída aos diferentes sinais, o que será feito atribuindo sucessivamente a cada um deles a função de sinal crítico do tipo 1.

Identificado o sinal crítico será então possível não apenas quantificar a dimensão máxima possível para a banda, como também identificar o desfasamento de fase relativamente ao sinal crítico adequado a cada um dos restantes sinais.

Para tal será necessário começar por quantificar uma variável auxiliar U_{ij} (Figura 58), que representa para o cruzamento i o tempo que decorre entre o início do tempo de verde e o instante em que um veículo fictício partiria deste cruzamento para chegar ao

cruzamento j no início do seu tempo de verde, cuja trajetória é assinalada na Figura 58 a traço-ponto.

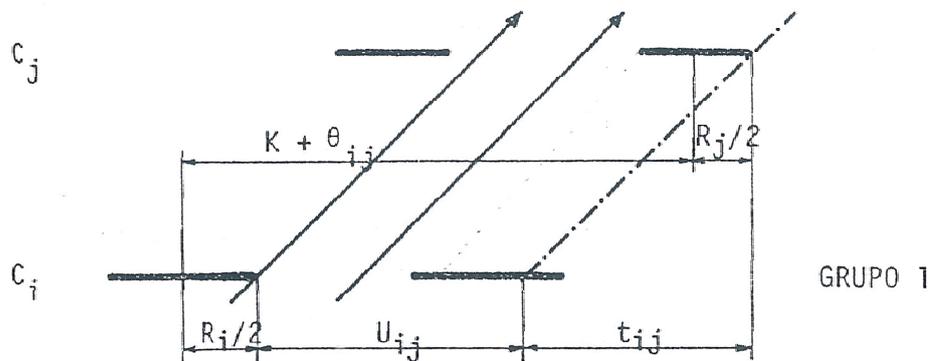


Figura 58 – Definição da variável U_{ij}

Demonstra-se que para coordenações semi-inteiras e considerando i como sinal crítico do grupo 1 vem,

$$U_{ij} = 1 - \text{man} \left(\frac{t_{ij} - t_{ij}^*}{2} + \frac{r_i - r_j}{2} - \delta_{ij} \right) \quad (67)$$

para $\delta_{ij} = 0$ ou $0,5$

sendo,

t_{ij} – tempo de percurso entre os sinais i e j no sentido ascendente

t_{ij}^* - tempo de percurso entre os sinais i e j no sentido descendente

r_i, r_j – tempo de vermelho do sinal i, j

Tal como para θ_{ij} , conclui-se de (67) que haverá dois valores para U_{ij} dependentes do valor de δ_{ij} e que diferem entre si de $0,5$ (meio ciclo).

Por outro lado o tempo $(U_{ij} - r_j)$ representa a fracção do tempo de verde do sinal i durante o qual se garante que qualquer veículo que parta de i durante este tempo chegará a j ainda com verde.

Deste modo o valor a adoptar para ter a banda de passagem mais larga entre os cruzamentos i e j , o que corresponde a admitir que j seria um cruzamento crítico do tipo 2, será dado por:

$$b_{ij} = \max_{\delta_{ij}} [U_{ij}(\delta_{ij}) - r_j] \quad (68)$$

Fazendo idêntico raciocínio para todos os cruzamentos j do itinerário a coordenar, chega-se a um conjunto de valores cujo mínimo representa a banda mais larga que consegue passar em todos os cruzamentos, admitindo-se manter o sinal i como sinal crítico do grupo 1, isto é:

$$b_i = \min_j (b_{ij}) = \min_j \max_{\delta_{ij}} [U_{ij}(\delta_{ij}) - r_j] \quad (69)$$

Finalmente, considerando sucessivamente cada sinal como crítico do grupo 1 e aplicando os mesmos princípios, obtém-se a partir de (69) um conjunto de valores para b_i , o maior dos quais representa a duração de passagem máxima possível em cada um dos sentidos, isto é,

$$B = \max_i (b_i) = \max_i \min_j \max_{\delta_{ij}} [U_{ij}(\delta_{ij}) - r_j] \quad (70)$$

O cruzamento (c) que gera esta banda máxima é o verdadeiro cruzamento crítico do tipo 1, sendo o cruzamento j que entre os b_{ij} registou a menor banda, o verdadeiro cruzamento crítico do tipo 2.

Os desfasamentos óptimos θ_{cj} , entre o sinal crítico (c) e os restantes cruzamentos são marcados, no sentido crescente dos tempos, a partir do ponto médio do tempo de vermelho do sinal crítico (c), sendo calculados pela expressão (65), substituindo δ_{cj} pelos valores de δ anteriormente obtidos na maximização de $(U_{cj} - r_j)$.

VII.3.4 Determinação das durações de passagem proporcionais aos volumes de tráfego

O modelo acabado de descrever dá igual importância a cada um dos 2 sentidos de circulação, criando-se bandas de igual largura. Porém, em alguns casos será conveniente ajustar as bandas aos volumes de tráfego existentes, proporcionando durações de passagem superiores no sentido em que o volume de tráfego é maior.

Sendo a soma $(b + b^*)$ máxima, necessariamente que o aumento de uma das durações de passagem corresponderá à diminuição da duração de passagem no sentido oposto de uma quantidade exactamente igual.

Admitindo proporcionalidade entre os volumes de tráfego e as durações de passagem resulta para a variação T da duração de passagem,

$$T = B \frac{q_d - q_a}{q_d + q_a} \quad (71)$$

sendo,

T – correcção da duração de passagem

B – duração de passagem comum aos dois sentidos

q_d, q_a – débito/volume de tráfego no sentido descendente, ascendente

As durações de passagem corrigidas serão dadas por:

$$b_1 = B - T \quad (72)$$

$$b_1^* = B + T \quad (73)$$

Note-se que se $q_d > q_a$, resulta um valor positivo para T e, portanto, a banda para o sentido descendente será mais larga. O contrário ocorre para a situação inversa.

Tendo-se alterado as durações de passagem é necessário, pelo menos em alguns casos, recalcular os desfasamentos, deixando a coordenação de ser semi-inteira.

O cálculo dos novos desfasamentos θ'_{cj} depende da relação entre os volumes de tráfego nos dois sentidos, sendo apresentadas na Tabela 12 as expressões respectivas que foram obtidas por relações geométricas combinando a Figura 59 e a Figura 60 com a Figura 58 onde se define a variável U_{ij} .

$$\beta_j = B + |T| + r_j - U_{cj}$$

Tabela 12 – Regras de ajuste dos desfasamentos para acomodar diferenças de débitos entre os sentidos de tráfego

		$\beta_j = B + T + r_j - U_{cj}$	
		$\beta_j < 0$	$\beta_j > 0$
$q_a > q_d$	$b_l > b_l^*$	$\theta'_{cj} = \theta_{cj}$	$\theta'_{cj} = \text{man}(\theta_{cj} + \beta_j)$
$q_a < q_d$	$b_l < b_l^*$	$\theta'_{cj} = \theta_{cj}$	$\theta'_{cj} = \text{man}(\theta_{cj} - \beta_j)$

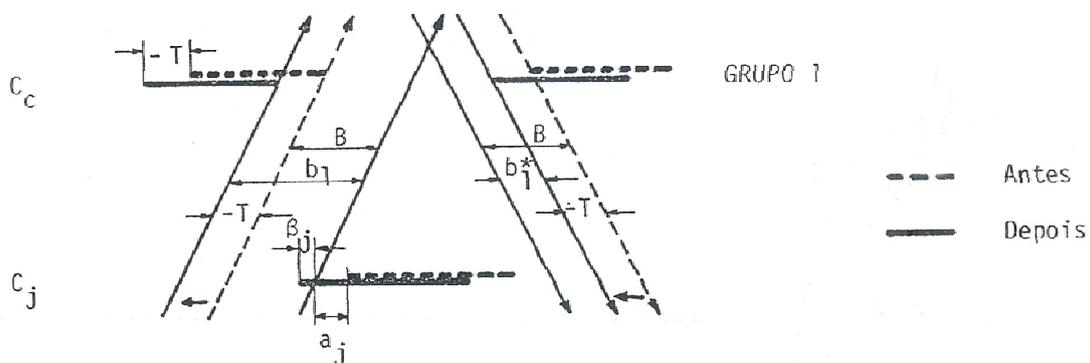


Figura 59 – Largura das bandas proporcionais aos volumes de tráfego – $B_j > 0$

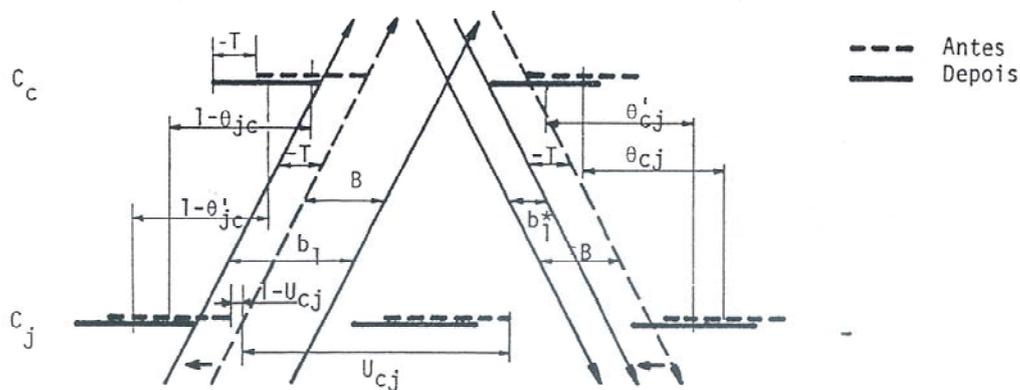


Figura 60 - Largura das bandas proporcionais aos volumes de tráfego – $B_j < 0$

VII.3.5 Exemplo de aplicação do método de maximização das bandas

VII.3.5.1 Enunciado do problema

Pretende-se otimizar a coordenação entre cinco cruzamentos através da maximização da largura das respectivas bandas. As características básicas dos respectivos planos de regulação e localização relativa são as apresentadas na Figura 61.

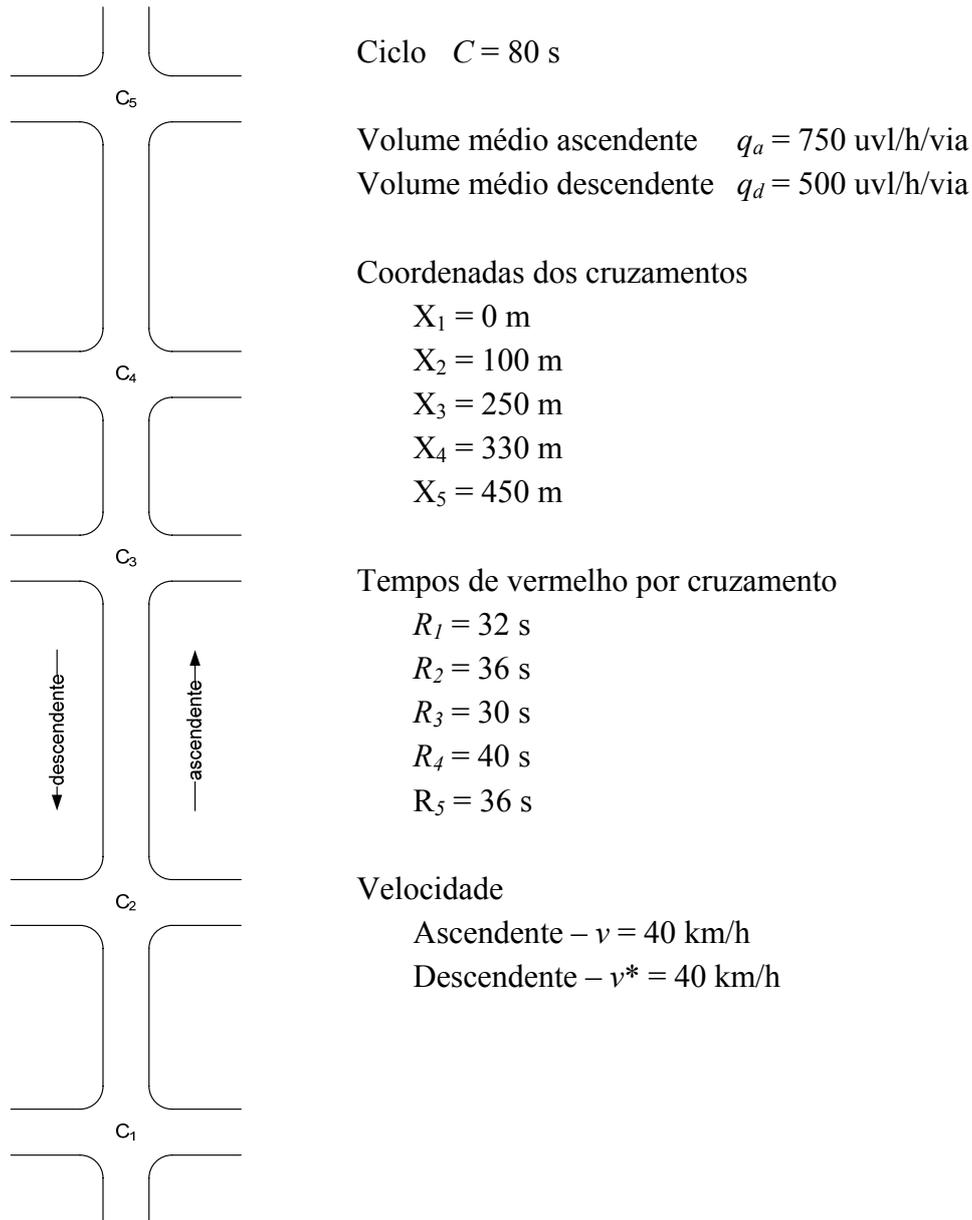


Figura 61 – “Configuração” do Eixo Rodoviário e Respetivos Sinais Luminosos

VII.3.5.2 Processo de cálculo

A – Cálculo de t_{ij} e t_{ji}^*

(tempos de trajecto entre i e j e vice-versa expressos em proporção do ciclo)

$$t_{ij} = \frac{X_j - X_i}{v_{ij} C}$$

X_j, X_i – posição longitudinal da intersecção (m)

v_{ij} – velocidade ascendente (m/s)

C – ciclo (s)

Exemplo de cálculo: $t_{12} = t_{21}^* = [(100 - 0) / 11,1] / 80 = 0,112$

Tabela 13 - Valores de t_{ij} e t_{ji}^*

i	j				
	1	2	3	4	5
1	–	0,112	0,281	0,371	0,506
2	-0,112	–	0,169	0,259	0,394
3	-0,281	-0,169	–	0,090	0,225
4	-0,371	-0,259	-0,090	–	0,135
5	-0,506	-0,394	-0,225	-0,135	–

B – Cálculo da variável auxiliar U_{ij}

(Assumindo que o cruzamento (i) crítico é do tipo 1)

$$U_{ij} = \max \left(-t_{ij} + \frac{r_j - r_i}{2} + \delta_{ij} \right) \text{ (equivalente a (67) c/ velocidades iguais nos 2 sentidos)}$$

$$\delta_{ij} = 0 ; 0,5$$

r_j, r_i – proporção de vermelho nos cruzamentos j e i

Exemplos de cálculo de U_{ij}

$$U_{1,2}(\delta = 0) = \text{man}\left(-0,112 + \frac{(36-32)/2}{80} + 0\right) = \text{man}(-0,087) = 0,913$$

$$U_{4,1}(\delta = 0) = \text{man}\left(0,371 + \frac{(32-40)/2}{80} + 0\right) = \text{man}(0,321) = 0,321$$

$$U_{1,2}(\delta = 0,5) = \text{man}\left(-0,112 + \frac{(32-32)/2}{80} + 0,5\right) = \text{man}(0,413) = 0,413$$

$$U_{4,1}(\delta = 0,5) = \text{man}\left(0,371 + \frac{(32-40)/2}{80} + 0,5\right) = \text{man}(0,821) = 0,821$$

Tabela 14 – Valores U_{ij} para $\delta = 0$ e para $\delta = 0,5$

<i>i</i>	<i>j</i>									
	1		2		3		4		5	
	$\delta = 0$	$\delta = 0,5$								
1	1	0,5	0,913	0,413	0,706	0,206	0,679	0,179	0,519	0,019
2	0,087	0,587	1	0,5	0,794	0,294	0,766	0,266	0,606	0,106
3	0,294	0,794	0,206	0,706	1	0,5	0,972	0,472	0,812	0,312
4	0,321	0,821	0,234	0,734	0,028	0,528	1	0,5	0,840	0,340
5	0,481	0,981	0,394	0,894	0,188	0,688	0,160	0,660	1	0,5
r_j	0,4		0,45		0,375		0,5		0,45	

C – Maximizar a duração da banda entre os cruzamentos i e $j - b_{ij}$

(assume-se que i é o cruzamento crítico de tipo 1)

$$b_{ij} = \max_{\delta_{ij}} \left[U_{ij}(\delta_{ij}) - r_j \right]$$

Exemplo de cálculo de b_{ij} : $b_{21} = \left[\text{máx}(0,087; 0,587) - 32/80 \right] = 0,187$

Tabela 15 – Valores de b_{ij} e de b_i

<i>i</i>	<i>j</i>					b_i
	1	2	3	4	5	
1	0,600	0,463	0,331	0,179	0,069	0,069
2	0,187	0,550	0,419	0,266	0,156	0,156
3	0,394	0,256	0,625	0,472	0,362	0,256
4	0,421	0,284	0,153	0,500	0,390	0,153
5	0,581	0,444	0,313	0,160	0,550	0,160

D – Obtenção da maior banda possível de criar ao longo dos cinco cruzamentos - b_i

(admitindo que o cruzamento (i) é crítico do tipo 1)

$$b_i = \min_j (b_{ij}) = \min_j \max_{\delta} [U_{ij}(\delta_{ij}) - r_j]$$

Exemplo de cálculo assumindo o cruzamento (2) como crítico do tipo 1

$$b_2 = \min_j (0,187; 0,550; 0,419; 0,266; 0,156) = 0,156$$

E – Determinar a maior banda possível (B)

(seleccionado o cruzamento i com maior b_i)

$$B = \max_i (b_i) = \max_i \min_j \max_{\delta} [U_{ij}(\delta_{ij}) - r_j]$$

Cálculo do B (em proporção do ciclo e em valor absoluto)

$$B = \max(0,069; 0,156; 0,256; 0,153; 0,160) = 0,256 \text{ (proporção)}$$

$$B = 0,256 \times 80 = 20,5 \text{ s (valor absoluto)}$$

F - Cálculo dos desfasamentos (ϕ_{ij}) da fase

(ϕ_{ij} – em proporção de ciclo medido entre os meios dos vermelhos relativamente ao cruzamento crítico i)

$$\phi_{ij} = \text{man}(\delta_{ij}) \text{ (velocidades de circulação iguais)}$$

δ_{ij} – valor que permitiu calcular o $\max(b_{ij})$ no ponto C

Cálculo dos ϕ_{ij} considerando que o cruzamento crítico tipo 1 é o (3)

$$\phi_{31} = \text{man}(\delta_{31}) = 0,5 \rightarrow 40 \text{ s}; \quad \phi_{32} = \text{man}(\delta_{32}) = 0,5 \rightarrow 40 \text{ s}$$

$$\phi_{34} = \text{man}(\delta_{34}) = 0,0 \rightarrow 0 \text{ s}; \quad \phi_{35} = \text{man}(\delta_{35}) = 0,0 \rightarrow 0 \text{ s}$$

G – Representação do diagrama espaço-tempo com bandas de coordenação iguais

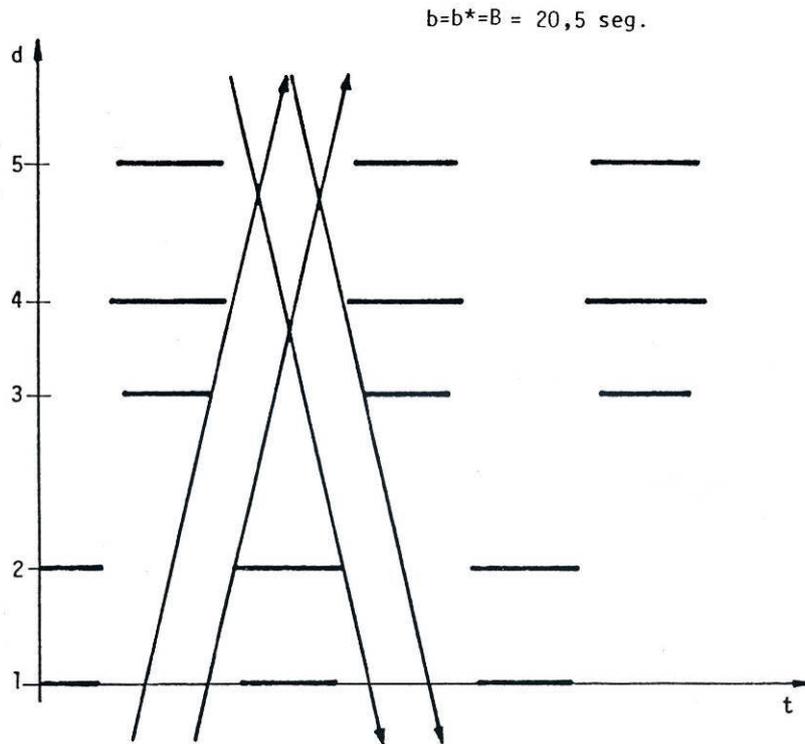


Figura 62 – Diagrama espaço-tempo com bandas de coordenação ascendentes e descendentes iguais

H – Cálculo de T

(variação da largura das bandas em função dos fluxos)

$$T = B \frac{q_d - q_a}{q_d + q_a}$$

T – tempo a adicionar à duração da passagem descendente (proporção do ciclo)

B – duração de passagem igual nos dois sentidos para fluxos iguais

q_d – volume médio descendente (uvl/h \times via)

q_a – volume médio ascendente (uvl/h \times via)

Cálculo de T :

$$T = 0,256 \frac{500 - 750}{500 + 750} = -0,051$$

I – Cálculo das novas bandas

(ascendente, (b) e descendente (b^*))

$$b_1 = B - T, \quad b_1^* = B + T$$

Cálculo de b_1 e b_1^*

$$b_1 = 0,256 + 0,051 = 0,307 \quad \rightarrow \quad 0,307 \times 80 = 24,6 \text{ s}$$

$$b_1^* = 0,257 - 0,051 = 0,205 \quad \rightarrow \quad 0,205 \times 80 = 16,4 \text{ s}$$

J – Cálculo dos novos desfasamentos (ϕ'_{cj})

(entre o cruzamento crítico e os cruzamentos j)

$$\beta_j = B + |T| + R_j - U_{cj} \left\{ \begin{array}{l} \text{se } \beta \leq 0 \rightarrow \phi'_{cj} = \phi_{cj} \\ \text{se } \beta > 0 \rightarrow \phi'_{cj} = \text{man}(\phi_{cj} + \beta_j) \end{array} \right\} \text{ porque } (q_a > q_d)$$

Cálculo dos parâmetros auxiliares β_j

$$\beta_1 = 0,256 + 0,051 + 32/80 - 0,794 = -0,087$$

$$\beta_2 = 0,256 + 0,051 + 36/80 - 0,706 = +0,051$$

$$\beta_4 = 0,256 + 0,051 + 40/80 - 0,972 = -0,165$$

$$\beta_5 = 0,256 + 0,051 + 36/80 - 0,812 = -0,055$$

Cálculo dos novos desfasamentos ϕ'_{cj}

$$\phi'_{c1} = \phi_{c1} = 0,5 \quad \rightarrow \quad 40,0 \text{ s}$$

$$\phi'_{c2} = \text{man}(\phi_{c2} + \beta_2) = \text{man}(0,5 + 0,051) = 0,551 \quad \rightarrow \quad 44,1 \text{ s}$$

$$\phi'_{c4} = \phi_{c4} = 0,0 \quad \rightarrow \quad 0,0 \text{ s}$$

$$\phi'_{c5} = \phi_{c5} = 0,0 \quad \rightarrow \quad 0,0 \text{ s}$$

K – Diagrama distância – tempo com bandas ascendentes e descendentes diferentes

(adaptado em função dos fluxos (a) e (d))

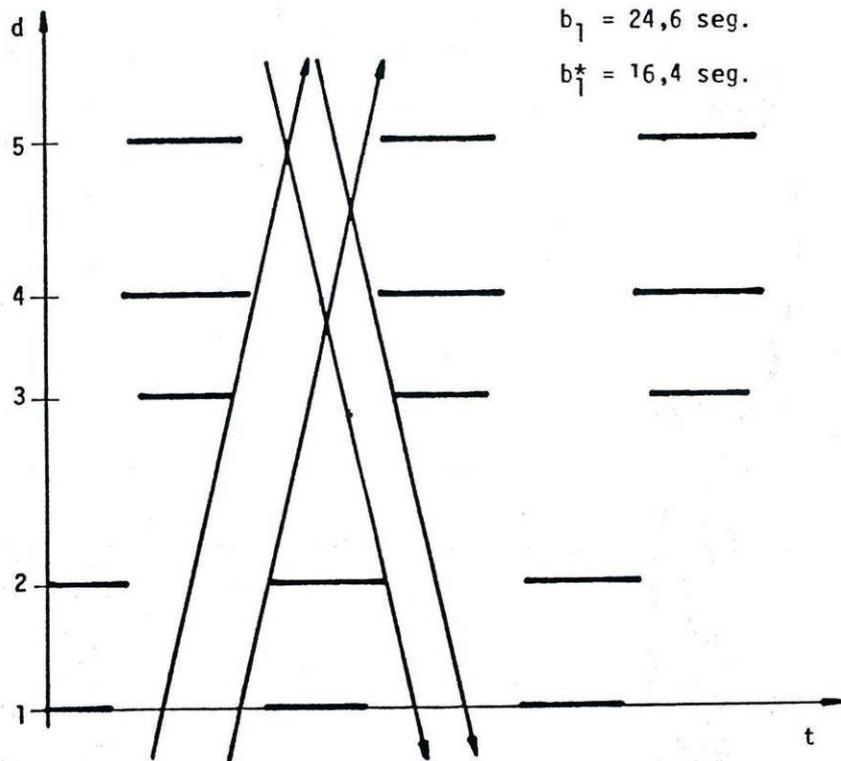


Figura 63 - Diagrama distância – tempo com bandas ascendentes e descendentes diferentes

VII.4 Sistemas centralizados de controlo do tráfego

A complexidade de redes viárias em meio urbano com um número crescente de cruzamentos regulados por sinais luminosos favorece a adopção de sistemas centralizados de controlo do tráfego onde os cruzamentos semaforizados de uma zona aparecem interligados.

Estes sistemas asseguram geralmente diversas funções:

- Coordenação dos sinais luminosos visando melhorar as condições de circulação, para o que é, normalmente, necessário dividir a área em estudo em zonas homogêneas no que diz respeito às características do tráfego
- Recolha e armazenamento permanente de dados de tráfego através de sensores
- Televigilância dos equipamentos dos cruzamentos
- Vigilância do tráfego com a ajuda de câmaras vídeo
- Ligação com outros sistemas (transportes públicos, estacionamento,...)

Os diferentes sistemas de controlo centralizado de tráfego existentes podem agrupar-se em categorias a que se pode designar por gerações muito embora nem sempre estas categorias correspondam necessariamente a evoluções temporais.

Nos sistemas da primeira geração são previamente calculados vários planos de regulação com base em dados de tráfego históricos para diferentes períodos do dia e semana (ponta da manhã, ponta da tarde, fora de pontas, nocturno, sábados, domingos, etc.). Estes planos são armazenados em memória, constituindo o que habitualmente se designa por uma biblioteca de planos. A selecção do plano, para além de poder ser imposto manualmente pelo operador, faz-se em função de uma programação horária ou por um algoritmo de análise de tráfego.

Para calcular os planos de regulação, para além do Método de Maximização de Bandas que, como foi referido tem um âmbito específico de aplicação, existem vários métodos sendo o programa TRANSYT, desenvolvido pelo TRL do Reino Unido, um dos mais utilizados, sendo tomado neste domínio como uma referência a nível internacional. Este programa é constituído por um modelo de simulação de tráfego que determina o comportamento dos veículos nas chegadas e partidas dos veículos aos cruzamentos e calcula um indicador de desempenho para a rede baseado numa média ponderada dos atrasos e paragens. O programa inclui, ainda, um processo de optimização que faz correcções ao plano de regulação, quer ao nível da distribuição de verde pelas fases de cada cruzamento, quer ao nível do valor do desfasamento entre cruzamentos, utilizando como critério de optimização a minimização do indicador de desempenho atrás referido.

A selecção do programa recorrendo a dados de tráfego recolhidos em tempo real faz-se ou pelo método dos vectores ou pelo método dos limites.

O primeiro método consiste em caracterizar as condições de tráfego existentes através de medições de um conjunto de valores, que em geral são o débito e a taxa de ocupação, em pontos estratégicos da rede viária. O vector constituído pelo conjunto de valores medidos é comparado com os vectores que representam as condições de tráfego correspondentes a cada plano armazenado na biblioteca, sendo escolhido o vector mais próximo (menor distância) ao vector representativo da secção corrente.

No método dos limites os valores medidos pelos sensores estratégicos da rede viária são comparados com os valores limites definidos anteriormente e é tomada uma decisão quanto à manutenção do plano ou sua alteração (por exemplo uma decisão de aumento do ciclo em vigor na rede de modo a reduzir o nível de saturação abaixo de um determinado valor que fora ultrapassado).

Em ambos os métodos as comparações entre os valores de referência e o valor medido fazem-se em intervalos curtos da ordem de grandeza dos poucos minutos, havendo ainda a necessidade de prever planos de transição para evitar mudanças bruscas entre planos de regulação.

Os sistemas de segunda geração continuam a dispor de uma biblioteca de planos de regulação previamente calculados, mas são mais flexíveis já que procuram adaptar-se permanentemente ao tráfego.

Assim, estes sistemas são constituídos por uma componente de macro-regulação, que define os planos de regulação de tempos fixos, e por uma componente de micro-regulação, que permite dar resposta, em tempo real, a diversas situações de tráfego detectadas.

Não se dispõem de modelos teóricos de representação e de optimização da rede e do tráfego, sendo apenas usados algumas regras empíricas de optimização. Pode considerar-se que os sistemas de controlo de tráfego urbano existentes no Porto e em Lisboa pertencem a esta categoria.

Entre a primeira e a segunda geração existe outro tipo de sistemas progressivamente abandonados, cuja principal característica é a de não disporem de uma biblioteca de planos, sendo estes calculados em tempo real com base nos dados recolhidos permanentemente pelos sensores.

Uma dificuldade na utilização destes sistemas diz respeito ao tempo que demora o processamento e tratamento dos dados e o cálculo dos planos que obrigava a sua colocação em serviço alguns minutos após a recolha de dados, com condições de tráfego possivelmente diferentes das que foram usadas para a elaboração dos planos.

Uma outra dificuldade resulta do recurso frequente a planos de transição, o que conjugado com o referido anteriormente prejudica a ideia inicial na concepção destes sistemas da sua adequação permanente às condições reais de tráfego.

Os sistemas de terceira geração também procuram adaptar-se em tempo real às condições existente do tráfego, fazendo-o, contudo, com recurso à modelação do tráfego e a um processo de optimização baseado num indicador de desempenho.

O sistema trata conjuntos de cruzamentos adjacentes com a mesma duração do ciclo (sub-zonas), adaptando lenta e progressivamente os planos de referência em função dum processo de optimização desenvolvido com base em indicadores de desempenho das condições de escoamento obtidos através de medições feitas por sensores.

Os exemplos mais conhecidos deste tipo de sistemas são o SCOOT (Reino Unido) e o SCAT (Austrália), que têm tido uma vasta aplicação em países americanos e europeus.

A quarta geração inclui os sistemas de controlo do tráfego em tempo real baseados em algoritmos de decisão aplicado com intervalos muito curtos, da ordem dos poucos

segundos, que escolherá se deve mudar ou não o estado do sinal do cruzamento em função de um critério de optimização geralmente baseado nos tempos de atraso, tendo a particularidade de abandonarem as noções clássicas de ciclo, fase e desfasamento usadas nos restantes sistemas.

Como exemplo pode referir-se o Modelo PRODYN onde o funcionamento de cada cruzamento é optimizado sem coordenação com os restantes cruzamentos mas tendo em consideração os padrões de tráfego que lhe estão a ser enviados pelos cruzamentos adjacentes.

ANEXO A – CRITÉRIOS DE INSTALAÇÃO DE SINAIS LUMINOSOS

Em certos países estão definidos critérios para a adopção de sinais luminosos em cruzamentos geralmente dependentes do nível de sinistralidade ocorrida, da procura de tráfego de veículos e peões e de alguns indicadores de desempenho entre os quais assume especial importância o atraso imposto aos diferentes utilizadores.

O MUTCD (Manual of Uniform Traffic Control Devices for Streets and Highways) apresenta um conjunto de critérios que será a seguir descrito, apenas com o objectivo de dar a conhecer um dos mais completos neste âmbito e cujos valores podem eventualmente serem tomados como referência no suporte de decisões a tomar.

O MUTCD apresenta uma lista de 11 critérios sendo exigido que para ser tomada a decisão de instalar sinais luminosos em cruzamentos é necessário que, pelo menos um destes critérios seja satisfeito.

A aplicação dos critérios abrange quer as áreas urbanas quer as interurbanas, referindo-se estas últimas aos locais onde o percentil da velocidade dos veículos excede 50 km/h ou quando o cruzamento se localiza num aglomerado com menos de 10 mil habitantes. Em zonas interurbanas há critérios específicos, sendo critério dos volumes igual a 70% do utilizado em zonas urbanas.

Critério 1 – Volume de veículos mínimo

Este critério é satisfeito quando os volumes de veículos em cada hora de quaisquer 8 horas de um dia representativo são superiores aos valores da Tabela A1.

Tabela A1: Volumes de veículos mínimo (critério 1)

Nº de vias por entrada		Vol. total de veículos nos ramos principais		Vol. de veículos no ramo secundário mais carregado	
Ramo Principal	Ramo Secundário	Zona urbana	Zona rural	Zona urbana	Zona rural
1	1	500	350	150	105
>1	1	600	420	150	105
>1	>1	600	420	200	140
1	>1	500	350	200	140

Para os ramos de entrada principais usa-se o volume total de veículos resultante da soma dos volumes dos ramos de entrada, enquanto que para as entradas secundárias apenas é usado o volume do sentido mais carregado. O mesmo período de 8 horas deve ser usado para as entradas principais e secundárias.

Critério 2 – Tráfego contínuo no ramo principal

Este critério tem em conta a escassez de oportunidades para os veículos do ramo secundário poderem avançar quando o tráfego no ramo principal é intenso. Nestas condições os valores mínimos a adoptar constam da Tabela A2, organizada do mesmo modo que a Tabela anterior, em particular no que se refere à soma do tráfego nos ramos principais e na utilização do maior volume dos ramos secundários. A ser usado este critério deve ser tido em conta o eventual efeito penalizador que pode resultar para a progressão dos veículos no itinerário principal.

Tabela A2: Volumes de veículos mínimo (critério 2)

Nº de vias por entrada		Vol. total de veículos nos ramos principais		Vol. de veículos no ramo secundário mais carregada	
Ramo principal	Ramo secundário	Zona urbana	Zona rural	Zona urbana	Zona rural
1	1	750	525	75	53
>1	1	900	630	75	53
>1	>1	900	630	100	70
1	>1	750	525	100	70

Critério 3 – Volume de peões mínimo

Este critério usa o volume de peões combinado com o número de intervalos de tempo aceitáveis pelos peões. Considera-se que é satisfeito quando, para um dia representativo, há, numa travessia do ramo principal, 90 ou mais peões por hora em cada hora de quaisquer 4 horas, ou 190 ou mais peões por hora na hora de ponta. Estes valores serão reduzidos em 50% se a velocidade dos peões for inferior a 1m/s. Complementarmente, o número de intervalos de tempo que possam ser aceites pelos peões para efectuarem o atravessamento terá de ser inferior a 60 por hora, durante o período de tempo a que se referem os volumes de peões. Em estradas/ruas de faixas de rodagem separadas que permitam o atravessamento pelos peões em 2 fases os valores acima referidos referem-se a cada um dos sentidos.

Este critério é válido apenas quando o cruzamento semaforizado mais próximo está afastado mais de 90 metros.

Critério 4 – Travessias junto a escolas

Este critério atende à dificuldade das crianças em atravessar os ramos principais no seu trajecto de/para a escola. Baseia-se no número de intervalos de tempo aceitáveis entre veículos da corrente de tráfego principal. O critério é satisfeito se o número de intervalos aceitáveis durante o período de tempo em que as crianças desejam atravessar for inferior à duração, em minutos, deste período (ver a Figura A1).

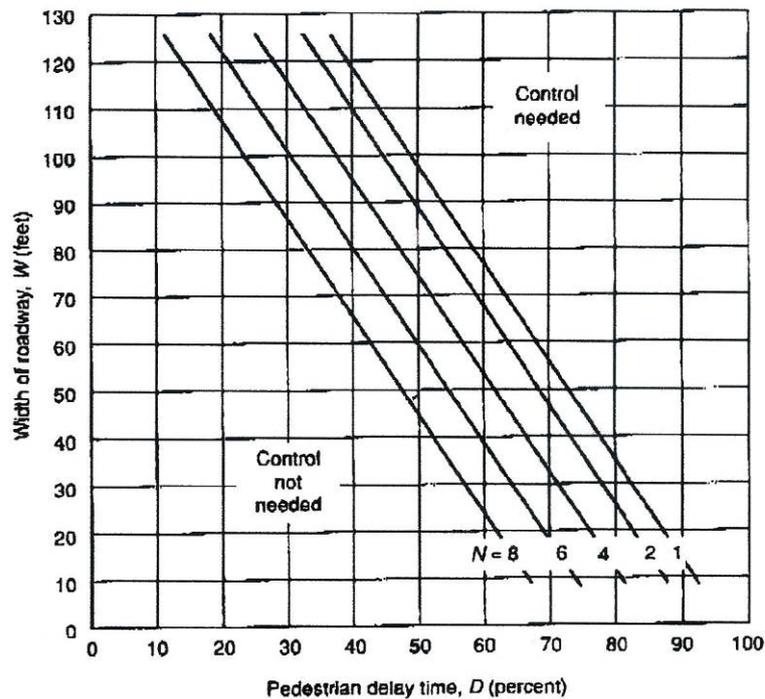


Figura A1 – Critério de instalação de sinais luminosos junto a escolas

O valor do intervalo de tempo aceitável é obtido através da seguinte expressão:

$$G=R+W+2*(N-1)$$

sendo,

G – duração do intervalo de tempo aceitável (s)

R – Tempo de reacção (s)

W – comprimento da travessia (m)

N – número de grupos correspondentes ao percentil 85% constituídos por peões que atravessam em simultâneo

A parcela $2*(N-1)$ representa o tempo total para todos os peões poderem partir.

Há, ainda, uma outra verificação que, a ser satisfeita, conduz à necessidade de recorrer aos sinais luminosos e que diz respeito ao atraso sofrido pelos peões, cujo valor é dado por:

$$D=(T-t)/T*100$$

com,

D – atraso médio do peão (%)

T – tempo de observação (s)

t – tempo total dos intervalos iguais ou superiores ao intervalo aceitável (s)

A necessidade de haver ou não sinalização luminosa obtém-se com o auxílio da Figura A1, onde se definem as zonas de instalação ou não sinais luminosas em função do atraso \underline{D} , do comprimento da travessia \underline{W} e do número de grupos com peões avançando em simultâneo \underline{N} .

Critério 5 – Progressão das correntes de tráfego

Este critério refere-se à necessidade de instalar sinais luminosos em cruzamentos quando estes integram percursos onde se pretende estabelecer a coordenação de sinais luminosos.

O desempenho da coordenação de sinais luminosos em itinerários depende da possibilidade em criar grupos de veículos que possam avançar ao longo do itinerário tanto quanto possível de uma forma compacta, o que ficará prejudicado se um cruzamento ou mais cruzamentos intermédios não dispuser de sinais luminosos, que permita efectuar o controlo da velocidade dos veículos.

Critério 6 – Sinistralidade

Este critério tem em conta não apenas o número de acidentes, mas também a sua gravidade, sendo requerido sinalização luminosa quando for satisfeito o seguinte:

Tenham sido registados 5 ou mais acidentes durante o período de um ano, que possam ser corrigidos com a instalação de sinais luminosos;

Exista um volume de veículos e peões não inferior a 80% dos valores usados nos critérios 1,2 e 3 atrás referidos;

Outras medidas tomadas para a redução de acidentes não tiverem êxito

Critério 7 – Rede viária

Este critério atende aos cruzamentos importantes da rede viária a serem controlados por sinais luminosos. Assim deve ser prevista a instalação de sinais luminosos se um

cruzamento entre eixos viários da rede estruturante tiver um volume total de 1000 veículos chegados na hora de ponta de um dia representativo ou em cada hora de um período de 5 horas de sábados ou domingos.

Critério 8 – Combinação de critérios

Este critério prevê a instalação de sinais luminosos desde que sejam satisfeitos em simultâneo 80% dos valores referidos nos critérios 1 e 2.

Critério 9 – Volumes de veículos em 4 horas

Este critério baseia-se em volumes para um período de 4 horas em vez dos períodos de 8 horas usados nos critérios 1, 2 e 8. A análise deste critério faz-se com base nas figuras A2 e A3 referentes a zonas urbanas e rurais, respectivamente.

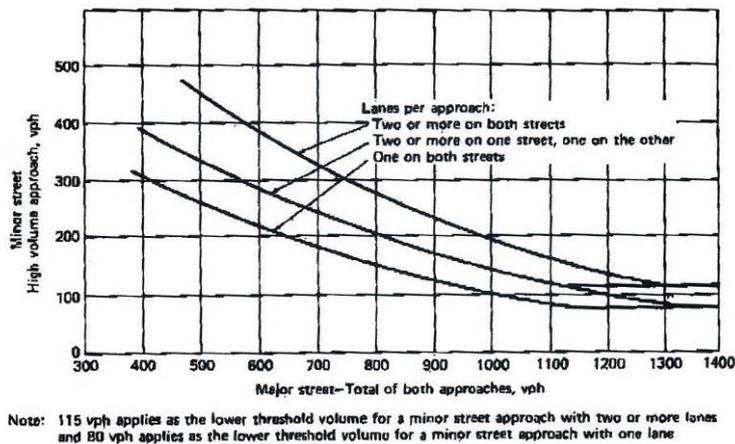


Figura A2 – Critério dos volumes de veículos em 4 horas (zona urbana)

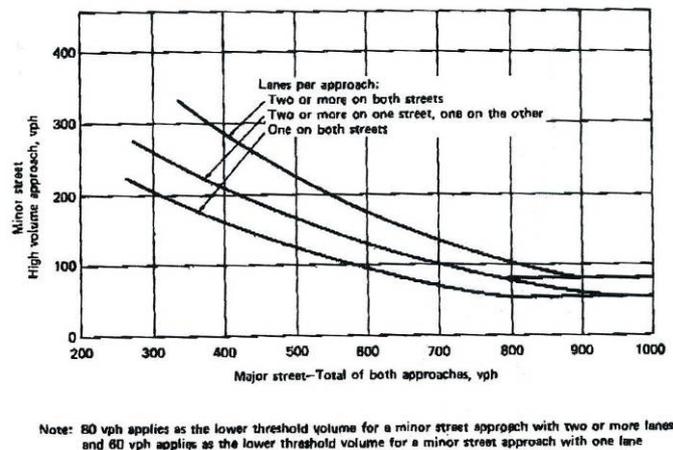


Figura A3 – Critério dos volumes de veículos em 4 horas (zona rural)

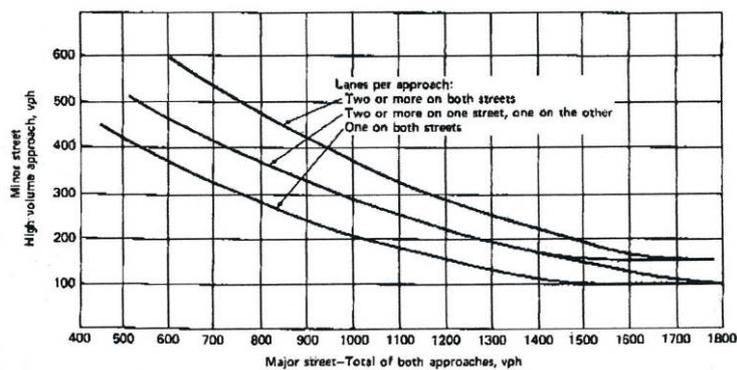
Critério 10 – Atraso na hora de ponta

A satisfação deste critério exige que sejam observados em simultâneo durante a hora de ponta as seguintes condições:

- O atraso total no ramo de entrada secundário é igual ou superior a 4 veículos*hora para uma via ou 5 veículos*hora para duas vias;
- O volume total no ramo secundário é igual ou superior a 100 veículos/hora para uma via ou 150 veículos/hora para duas vias;
- O volume total chegado na hora de ponta é igual ou superior a 800 veículos/hora em intersecções de 4 ramos ou 650 veículos/hora em intersecções de 3 ramos.

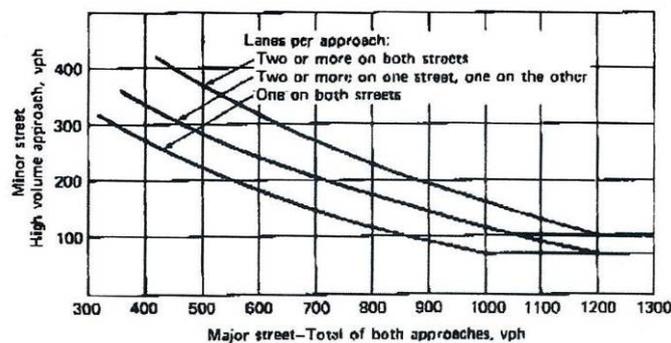
Critério 11 – Volumes de veículos na hora de ponta

Este critério baseia-se em volumes para um período da hora de ponta em vez dos períodos de 8 horas usados nos critérios 1, 2 e 8. A análise deste critério faz-se com base nas figuras A4 e A5 referentes a zonas urbanas e rurais, respectivamente.



Note: 150 vph applies as the lower threshold volume for a minor street approach with two or more lanes and 100 vph applies as the lower threshold volume for a minor street approach with one lane

Figura A4 – Critério dos volumes de veículos na hora de ponta (zona urbana)



Note: 100 vph applies as the lower threshold volume for a minor street approach with two or more lanes and 75 vph applies as the lower threshold volume for a minor street approach with one lane

Figura A5 – Critério dos volumes de veículos na hora de ponta (zona rural)

ANEXO B – TEMPOS DE LIMPEZA: EXEMPLO DE APLICAÇÃO

Na Figura B1 representa-se uma intersecção semaforizada, cuja sequência de fases é indicada na Tabela B1. Pretende-se calcular o tempo de limpeza entre as diferentes fases.

Após identificação de todos os pontos de conflito, determinaram-se as distâncias d_T e d_A (ver a Tabela B2). Assumiram-se, para todos os conflitos, os seguintes parâmetros: $v_T = v_A = 10$ m/s para os veículos e $v_T = v_A = 1,2$ m/s para os peões. Considerou-se ainda que a presença de pesados no local é reduzida, adoptando-se $d_V = 5$ m. Resultaram assim os seguintes tempos de limpeza: A \rightarrow B: 2 s; B \rightarrow C: 2 s; C \rightarrow D: 3 s e C \rightarrow D: 9 s.

Tabela B1 - Sequência de fases

Corrente	Fases em que o movimento recebe verde			
	A	B	C	D
1	•			
2	•			
3		•	•	
4		•		
5		•	•	
P1		•	•	•
P2				•
P3			•	•
P4				•

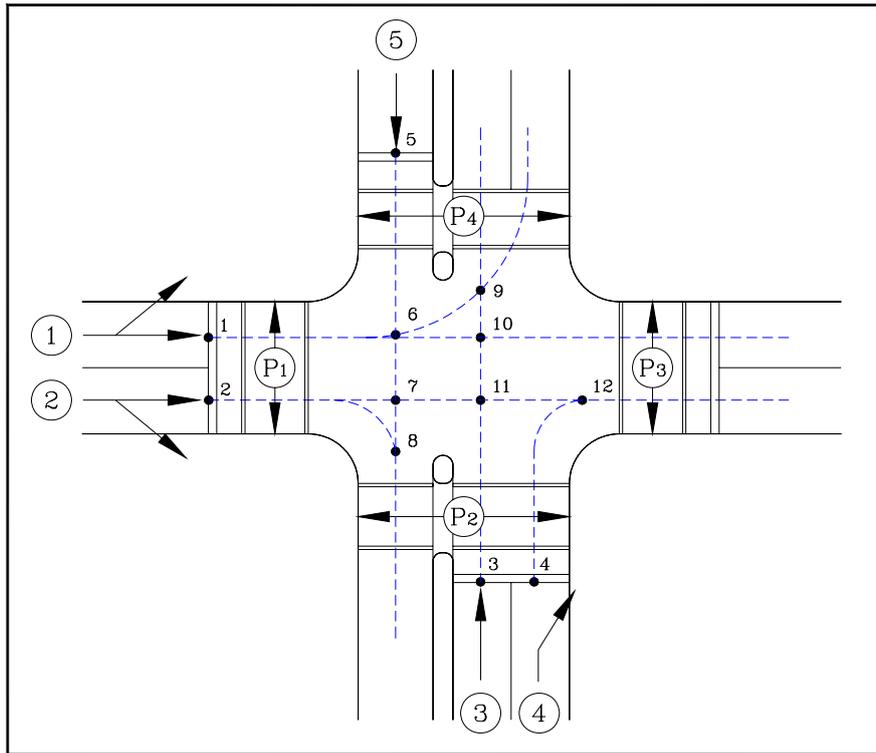


Figura B1 - Pontos de conflito

Tabela B2 - Cálculo dos tempos de limpeza

Transição	Termina	Inicia	Conflito	d_t [m]	d_i [m]	v_T [m/s]	v_l [m/s]	d_v [m]	TL [s]
A - B	1	3	9	17	17,5	10	10	5	0,5
A - B	1	3	10	16,5	15	10	10	5	0,7
A - B	1	5	6	11,5	11	10	10	5	0,6
A - B	1	P1		6	0	10	1,2	5	1,1
A - B	2	3	11	16	11	10	10	5	1,0
A - B	2	4	12	22,5	12,5	10	10	5	1,5
A - B	2	5	7	11	15	10	10	5	0,1
A - B	2	5	8	13	18	10	10	5	0,0
A - B	2	P1		6	0	10	1,2	5	1,1
B - C	4	P3		17,5	0	10	1,2	5	2,3
C - D	3	P2		6	0	10	1,2	5	1,1
C - D	3	P4		24	0	10	1,2	5	2,9
C - D	5	P2		24	0	10	1,2	5	2,9
C - D	5	P4		6	0	10	1,2	5	1,1
D - A	P1	1		8	2	1,2	10	0	6,5
D - A	P1	2		8	2	1,2	10	0	6,5
D - A	P2	2		12,7	15	1,2	10	0	9,1
D - A	P3	1		8	24,5	1,2	10	0	4,2
D - A	P3	2		8	24,5	1,2	10	0	4,2
D - A	P4	1		12,7	20	1,2	10	0	8,6

BIBLIOGRAFIA

Akcelik, R. (1981); "Traffic Signals: Capacity and Timing Analysis" Australian Road Research Board Ltd" Research Report ARR 123

Costa, A. P.; Vasconcelos, A. J. (1983) "Coordenação de Sinais Luminosos ao Longo de um Itinerário"; Núcleo de Vias de Comunicação do CECUP; Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

Costa, A. P. (1987); "Cruzamentos Regulados por Sinais Luminosos" Dissertação de Doutoramento em Engenharia Civil na Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

Kell, J. H.; Fullerton, I. J. (1991); "Manual of Traffic Signal Design" 2nd Edition; Institute of Transportation Engineers

Webster, F. V. (1958); "Traffic Signal Settings"; Road Research Laboratory; Road Research Technical Paper N° 39; London

Webster, F. V.; Cobbe, B. M. (1966); "Traffic Signals"; Road Research Laboratory; Road Research Technical Paper N° 56; London

ÍNDICE

I	INTRODUÇÃO.....	1
I.1	Enquadramento básico.....	1
I.2	CrITÉrios de instalaçŁo de sinais luminosos.....	4
II	CONCEITOS BÁsICOS PARA DIMENSIONAMENTO DE SINAIS LUMINOSOS.....	5
II.1	Movimentos direccionais vs correntes de tráfeço.....	5
II.2	AfectaçŁo do tráfeço Łs vias dos ramos de entrada.....	6
II.3	ConfiguraçŁo dos sinais luminosos.....	7
II.4	O plano de regulaçŁo: ciclo, fases e perÍodos de transiçŁo.....	9
II.4.1	Fase e ciclo.....	9
II.4.2	TransiçŁo entre fases.....	11
II.4.2.1	Tempo de amarelo.....	11
II.4.2.2	Tempos de limpeza.....	14
II.5	CaracterizaçŁo das correntes de tráfeço.....	17
II.5.1	Procura.....	17
II.5.2	Partidas dos veÍculos.....	17
II.5.3	MediçŁo do dÉbito de saturaçŁo.....	19
II.5.4	EstimaçŁo do dÉbito de saturaçŁo.....	21
II.5.4.1	Corrente de tráfeço sem oposiçŁo em via exclusiva.....	22
II.5.4.2	Corrente de tráfeço sem oposiçŁo em via partilhada.....	24
II.5.4.3	Corrente de tráfeço com oposiçŁo em via exclusiva.....	24
II.5.4.4	Corrente de tráfeço com oposiçŁo em via partilhada.....	28
II.5.4.5	Exemplo de estimativa de um dÉbito de saturaçŁo.....	30
III	PRINCÍPIOS BÁsICOS DE SELECçŁo DOS PLANOS DE REGULAçŁo.....	32
III.1	Regras base.....	32
III.2	Planos de regulaçŁo bÁsicos.....	33
IV	SINAIS LUMINOSOS DE COMANDO INDEPENDENTE E DE TEMPOS FIXOS.....	36
IV.1	DeterminaçŁo do plano de regulaçŁo.....	36
IV.2	MÉtodo de Webster.....	38
IV.2.1	A carga das fases e do cruzamento.....	38
IV.2.2	Os tempos de verde Útil e perdidos das fases e do ciclo.....	38
IV.2.3	Os conceitos de capacidade e ciclos mÍnimo, mÁximo e Ótimo.....	39
IV.2.3.1	Capacidade e grau de saturaçŁo.....	40
IV.2.3.2	Ciclos mÍnimo e mÁximo.....	41
IV.2.3.3	Ciclo Ótimo.....	42

IV.2.3.4	A escolha do ciclo a adoptar na prática.....	42
IV.2.4	A repartição do ciclo pelas fases	44
IV.2.5	Exemplo de aplicação da formulação base do Método de Webster.....	44
IV.2.6	Identificação das correntes de tráfego críticas em planos de regulação complexos	46
IV.3	O Método Australiano Adaptado.....	48
IV.4	Indicadores de desempenho.....	54
IV.4.1	Capacidade de reserva ou margem de crescimento	54
IV.4.2	Atraso	55
IV.4.3	Fila de espera.....	56
IV.5	O Tratamento das viragens à esquerda.....	57
IV.5.1	Viragens à esquerda sem tratamento especial.....	58
IV.5.2	Viragens à esquerda com redução do tempo de verde do ramo de entrada oposto	59
IV.5.3	Viragens à esquerda com fase exclusiva.....	60
IV.6	O Tratamento das Vias curtas	62
IV.7	O Tratamento dos Peões.....	64
IV.8	Soluções de apoio aos transportes colectivos.....	66
V	EXEMPLOS DE CÁLCULO DE PLANOS DE REGULAÇÃO.....	72
V.1	Método de Webster – fase exclusiva para peões	72
V.2	Aplicações do Método de Webster adaptado a correntes multifases	73
V.2.1	Exemplo MW 3A	73
V.2.2	Exemplo MW 3B	75
V.2.3	Exemplo MW 3C	76
V.3	Método de Webster – viragem à esquerda com oposição	77
V.4	Método Australiano Adaptado.....	78
V.4.1	Exemplo MAA 2	78
V.4.2	Exemplo MAA 3	80
V.4.3	Exemplo MAA 4	82
VI	SINAIS LUMINOSOS DE COMANDO ACTUADO.....	84
VI.1	Enquadramento.....	84
VI.2	Estratégias base de actuação: activação e extensão dinâmica das fases	85
VI.2.1	Variação em tempo real da duração das fases	85
VI.2.2	Estratégias de activação selectiva das fases.....	88
VI.2.3	Soluções básicas de referência.....	89
VI.2.3.1	Solução semi-actuada com activação e extensão dinâmica da fase secundária	89
VI.2.3.2	Solução totalmente actuada com activação e extensão dinâmica das fases	90
VI.2.3.3	Solução actuada com fase de espera para períodos mortos.....	92
VI.2.3.4	Solução semi-actuada com fase especial para as viragens à esquerda	93
VI.2.3.5	Soluções com activação dinâmica de fases pedonais.....	93
VI.3	Outras soluções e estratégias de actuação.....	96
VI.3.1	Estratégias anti-bloqueio	96
VI.3.2	Variação dinâmica da prioridade de cada corrente de tráfego	98
VI.3.3	Soluções especiais de apoio ao peão e minimização de demoras dos veículos	98
VI.3.4	Estratégias e soluções de controlo das velocidades dos veículos	100
VI.3.5	Estratégias de atribuição de prioridade a veículos especiais.....	104

VI.3.6	Estratégias de minimização dos impactos do congestionamento na rede	105
VI.3.7	Estratégias de recurso	105
VI.4	Exemplo de aplicação integrada de um conjunto variado de estratégias.....	106
VII	COORDENAÇÃO DE SINAIS LUMINOSOS	110
VII.1	Introdução.....	110
VII.2	Sistemas coordenados em percursos de sentido único	110
VII.3	Sistemas coordenados em percursos de sentido duplo	112
VII.3.1	Introdução.....	112
VII.3.2	Método da maximização das durações de passagem	112
VII.3.3	Determinação da duração de passagem igual nos dois sentidos	114
VII.3.4	Determinação das durações de passagem proporcionais aos volumes de tráfego.....	116
VII.3.5	Exemplo de aplicação do método de maximização das bandas.....	118
VII.3.5.1	Enunciado do problema.....	118
VII.3.5.2	Processo de cálculo	119
VII.4	Sistemas centralizados de controlo do tráfego.....	124
ANEXO A	– CRITÉRIOS DE INSTALAÇÃO DE SINAIS LUMINOSOS	128
ANEXO B	– TEMPOS DE LIMPEZA: EXEMPLO DE APLICAÇÃO	134
BIBLIOGRAFIA	128

SIMBOLOGIA

Grupo	Designação	Símbolo	
Débitos/volumes de tráfego	débito de chegadas	q	
	débito de chegadas por via	q_v	
	débito de viragens à esquerda	q_e	
	débito de chegadas da c.t. oposta	q_{op}	
	débito de saturação	s	
	débito de saturação em frente	s_f	
	débito de saturação em g_u	s_u	
	(índice de) carga da corrente de tráfego i	y_{ci}	
	(índice de) carga da fase i	y_i	
	(índice de) carga do cruzamento	Y	
	n.º de veículos e chegadas em C	n_e	
	n.º de partidas de v.e. durante verde	n_u	
	n.º de veículos chegados em C	n_c	
	n.º de partidas após fim do verde	nf	
	Elementos geométricos	raio da curva	ρ
declive		i	
dist. entre a barra de paragem do movimento que termina e ponto crítico		d_T	
dist. entre a barra de paragem do movimento que inicia e ponto crítico		d_I	
largura da via		w	
n.º máx. de veíc. retidos no cruz.		n_s	
espaçamento entre cruzamentos		E	
dist. do fim da via BUS à barra de paragem		d_c	
Factores/coeficientes/índices		f. ajust. largura da via	f_w
		f. ajust. declive	f_i
	f. ajust. localização	f_z	
	f. ajust. posição da via	f_p	
	f. ajust. composição do tráfego	f_t	
	f. ajust. mudança de direcção	f_d	
	coeficiente de equivalência	E	
Indicadores de desempenho	capacidade	Q	
	capacidade de reserva	Q_r	
	índice carga máx. cruzamento	Y_{max}	

	grau de saturação	x
	grau de saturação da c. t. oposta	x_{op}
	atraso por veículo	d
	atraso por veículo de vir. esq.	d_e
	atraso total de vir. esq.	De
	n.º de veic. chegados no vermelho	N_u
	n.º veic. em fila após fim de verde	N_o
	n.º veic. cheg. no verm.+verde sat.	N
	dist. máx. à barra de paragem do veic. em fila	l_m
Parâmetros condutor/veículo	tempo de reacção	t_r
	distância de paragem	d_p
	comprimento do veículo	d_v
	espaçamento médio de veículos em fila	d_j
	velocidade	v
	veloc. do veículo/peão que inicia o mov.	v_T
	veloc. do veículo / peão que termina o movimento	v_I
	intervalo crítico de aceitação	α
	interv. mínimo entre veic. prior.	β_I
	interv. mín. entre veic. não prior.	β_2
Regulação dos sinais luminosos	duração do ciclo	C
	duração do ciclo óptimo	C_o
	duração do ciclo mínimo	C_{min}
	duração do ciclo máximo	C_{max}
	tempo de verde útil	g
	tempo de verde real	G
	tempo de amarelo	A
	tempo de verde útil saturado	g_s
	tempo de verde útil não saturado	g_u
	tempo perdido no arranque	t_{pa}
	tempo adicional de passagem	t_{ap}
	tempo perdido por fase	l
	tempo de interverde	I
	tempo perdido do ciclo	L
	tempo de vermelho integral	r
	proporção do tempo de verde útil	λ
	desfasamento entre sinais	δ, θ
	tempo de percurso entre i e j	t_{ij}
	largura da banda de passagem	b
	largura das bandas iguais	B