

Capítulo 4. TEORIA DO CONTROLE DE TRÁFEGO

O conhecimento apresentado até aqui é predominantemente de cunho descritivo, destinado a prever as condições de tráfego resultantes da interação entre oferta e demanda na via.

O reconhecimento dos fatores que influenciam o desempenho viário pode, naturalmente, ser utilizado para propor melhorias ou controlar o tráfego, mas estas intervenções são analisadas seguindo o mesmo padrão de análise descritiva (ou preditiva), a partir de novas condições de projeto propostas.

Um entendimento mais sistemático sobre o efeito dos fatores influentes sob o controle da Engenharia de Tráfego pode, no entanto, ensejar a proposição de métodos de análise voltados diretamente para o estabelecimento das condições de projeto desejadas (considerando critérios de projeto estabelecidos ou os objetivos do projeto, mais genericamente).

A Teoria do Controle de Tráfego visa desenvolver este entendimento sistemático adicional e busca, desta forma, propor os métodos de análise orientados para projeto mencionados acima.

Ao contrário do conhecimento anteriormente apresentado, a discussão sobre controle de tráfego tem um cunho predominantemente normativo, destinado a determinar a forma de intervenção sobre o sistema viário que permite obter uma operação adequada ou ótima.

Aqui novamente, os princípios aplicados ao controle de tráfego serão distintos para elementos viários que operam em fluxo contínuo (a situação predominante em sistemas rodoviários) ou descontínuo (a situação predominante em sistemas viários urbanos, exceto nas vias expressas), em cada caso distinguindo-se alguns tipos de elementos que necessitam de análise particularizada.

Embora os princípios aplicados à análise da capacidade e operação do tráfego e as técnicas de comparação de alternativas de projeto permaneçam válidas como práticas profissionais aplicáveis, a discussão feita a seguir será mais diretamente direcionada a identificar condições de projeto que possam garantir a operação adequada ou ótima. Além disso, ao invés de considerar intervenções físicas ou de maior dificuldade, o controle de tráfego seleciona variáveis de intervenção mais operacionais (compatível com a natureza operacional da Engenharia de Tráfego).

Idealmente, o controle de tráfego buscaria ajustar suas variáveis de intervenção continuamente, na medida em que as condições de oferta e/ou de demanda fossem alterando-se ao longo do tempo, de forma a buscar o desempenho pretendido. Em termos práticos, as estratégias, modos e métodos de controle usuais podem ser classificados em:

- estratégias de controle isolado (em elemento viário, como ramais de acesso ou interseções semaforizadas, aplicável onde o espaçamento entre elementos é grande e o número de elementos é pequeno) e coordenado (necessário quando o sistema controlado é mais complexo, criando interações entre os diversos elementos controlados, elementos de sinalização variável e/ou gargalos potenciais);
- métodos de controle programado (baseados nos perfis históricos de demanda e capacidade, com variação previamente

Enfoque de Análise X Projeto:

- Análise: dadas as condições de projeto, prevê o desempenho;
- Projeto: dado o desempenho definido, determina o projeto (Controle: distingue-se apenas por considerar variáveis de projeto mais operacionais ...)

Estratégias de controle:

- Isolado, de cada elemento (quando espaçados);
- Coordenado (dos elementos e de sua interação ou integração).

Métodos de controle:

- Programado (baseado em com dados históricos, podendo variar por tabela horária, dia da semana, tipo de dia, ...);
- Responsivo (baseado em detectores de tráfego, de fila, de clima, ...), sendo parametrizados com diferentes lógicas (controle atuado, controle adaptativo, controle em tempo real, ...)

programada em função do período do dia, tipo de dia e datas especiais) ou responsivo (parametrizados externamente mas programados com base em dados efetivos sobre a demanda medida, normalmente obtida através de detectores de veículos, informados a cada chegada de veículo ou agregados em períodos de poucos segundos); os métodos de programação sob demanda podem ainda ser classificados em:

- o controle atuado pelo tráfego, com temporização baseada em parâmetros simples que são utilizados para monitorar detecção imediata das chegadas de veículos (ou pedestres) para decidir a extensão ou finalização de cada estado do controle de tráfego;
 - o controle adaptativo, com temporização revisada para cada ciclo de controle de tráfego a partir de dados continuamente atualizados, utilizados para projeções imediatas, eventualmente ajustadas, sobre a demanda e oferta relevante para cada elemento viário; ou
 - o sistemas de controle em tempo real, onde estratégias de controle adaptativo são aplicadas aos elementos viários de toda a área de controle, combinando dados atualizados sobre cada elemento viário e sobre toda a área de controle, mas baseado em ações incrementais.
- modos de controle local (decidido pelo equipamento que controla cada elemento viário, de forma distribuída mas não necessariamente isolada, podendo utilizar dados coletados o elemento viário controlado e também informações sobre pontos de interface ou elementos viários adjacentes) e centralizado (decidido por um sistema/unidade central de controle que monitora diversos elementos viários que controlam uma área, rede ou corredor, com diferentes níveis de informação e/ou de intervenção sobre o controle de cada elemento viário).

Modos de controle:

- Local, decidido em cada elemento, de forma distribuída (não necessariamente isolado);
- Centralizado, decidido em um sistema/unidade central que monitora diversos elementos.

Naturalmente, existem diversas tarefas que podem ser atribuídas aos sistemas de controle de tráfego e podem existir sistemas com estratégias, métodos ou modos de controle mistos. Atualmente, sistemas de controle mais amplos em cobertura são incrementais e sistemas de controle de intervenção mais ampla tem de ser reduzidos.

Em qualquer destas tarefas, estratégias, métodos ou modos de controle, existem dois aspectos principais envolvidos: o entendimento essencial das variáveis que afetam o desempenho viário, incluindo a forma da sua interação em cada elemento viário ou entre os elementos, e a definição de objetivos a serem atingidos pelo controle de tráfego para obter as condições de operação pretendidas.

O primeiro aspecto decorre da análise teórica dos fatores envolvidos na operação do tráfego em cada tipo de elemento viário e da significação empírica do impacto efetivo produzido pela intervenção sobre cada um destes fatores. Adicionando-se a avaliação dos custos e restrições envolvidos na aplicação de cada intervenção, este aspecto obtém a definição do quadro de possibilidades de técnicas abertas à operação do tráfego em cada elemento viário.

O segundo aspecto decorre da identificação dos atributos que descrevem a operação viária adequada ou ótima. Como descrito na discussão sobre as variáveis de serviço ou operação do tráfego, esta identificação corresponde ao reconhecimento das variáveis que descrevem a qualidade da operação do tráfego para os usuários da via e para a sociedade como um todo, que desembocam na formulação de conceitos como custo generalizado de viagem, custo social do

transporte (e outros comumente aplicados na avaliação de projetos em transportes), eventualmente reduzidos a algumas dimensões básicas.

Uma técnica de controle de tráfego adequada deveria manipular diretamente estes dois tipos de informação em um procedimento destinado a obter as decisões a serem adotadas. Como afirmado anteriormente, muito da pesquisa mais avançada neste campo está orientada para o desenvolvimento de técnicas desta natureza.

A complexidade desta tarefa cresce de forma dramática quando se verifica que muitos elementos viários relacionam-se entre si, tornando sua operação e as decisões de controle decorrentes interdependentes, e que o sistema viário é um componente de sistemas de nível superior (o sistema de transportes e o sistema de atividades sociais) que influenciam e condicionam sua operação mas que também sofrem sua influência e estabelecem um contexto mais geral em que os efeitos finais da sua operação podem ser melhor avaliados.

A simplificação desta tarefa é buscada percorrendo o caminho inverso: a decomposição de objetivos e sistemas de nível superior em objetivos e elementos de nível inferior, com perspicácia e arte. No estágio atual de evolução das técnicas de controle de tráfego, o recurso a este tipo de estratégia é usual e fundamental para a obtenção de procedimentos viáveis.

Por este motivo, a apresentação feita a seguir normalmente analisará a operação de cada tipo de elemento viário separadamente, na maior parte das vezes ignorando sua interação com outros elementos adjacentes ou críticos do sistema viário correspondente (com exceção de poucos casos em que esta interação é reconhecidamente essencial e tem de ser considerada).

Usualmente, uma discussão mais ampla e completa sobre as variáveis afetadas e os objetivos pretendidos também é evitada, propondo-se a análise de alguma variável particular (como capacidade, atraso ou tempo de viagem) ou critérios diretos de projeto (como níveis de serviço ou uso da capacidade) na busca das intervenções adequadas ou ótimas em cada caso.

Como é usual dizer, a simplificação é uma virtude e tudo deve ser tão simples quanto possível (mas não mais do que seja possível). Portanto, cumpre ao profissional da Engenharia de Tráfego verificar se as condições em que as técnicas tradicionais podem garantir resultados adequados estão satisfeitas em cada análise. Caso contrário, deve buscar exercer o melhor da sua experiência acumulada ou da pesquisa mais avançada para contribuir para melhores resultados.

4.1. CONTROLE DE TRÁFEGO EM FLUXO CONTÍNUO.

A discussão sobre a análise da capacidade e operação nos elementos viários que operam em fluxo contínuo permitiu estabelecer que a interação entre os veículos na corrente de tráfego, para um dado elemento viário, é decorrente de fatores autônomos relacionados com o comportamento dos usuários da via e de seus veículos.

Esta interação interna à corrente de tráfego manifesta-se por dois efeitos externos:

- o congestionamento, isto é, a redução de velocidade média do tráfego decorrente da dificuldade de manter a condição de

A complexidade da tarefa de controle do tráfego, considerando as relações entre elementos viários e com outros níveis dos sistemas de transportes, faz com a técnica atual trate interações parciais e avalie efeitos diretos (como rede de semáforos e atraso no tráfego).

- tráfego desejada por cada usuário, em função de restrições decorrentes da ocorrência de conflitos com outros usuários da via (cujas condições desejadas efetivas são distintas), que crescem rapidamente com o aumento da densidade de tráfego (que pode ser medida em veículos por quilômetro de faixa);
- a saturação, isto é, a formação de filas de veículos acumuladas em função da existência de restrições de capacidade em elementos críticos do sistema viário (os gargalos de capacidade, sejam os estruturais ou os incidentais), que geram a operação em condições de fluxo forçado (com baixas velocidades e redução da capacidade máxima de escoamento de veículos nos elementos críticos, pela formação de fila).

Por este motivo, o princípio básico atribuído ao controle de tráfego em sistemas viários que operam em fluxo contínuo pode ser sintetizado na utilização de técnicas de controle de demanda/regulação de acesso e/ou de atendimento de incidentes orientados para impedir que as condições de operação cheguem ao regime saturado ou para reduzir o período no qual o regime de operação saturado predomina.

É possível conceber princípios mais conservativos (como evitar a operação próxima da instabilidade de regime ou de situações potencialmente perigosas para a segurança de trânsito) mas nem sempre é viável praticar estes princípios mais exigentes.

A instabilidade de regime está relacionada com o reconhecimento do caráter aleatório da capacidade e da demanda de tráfego e faz com que exista uma probabilidade crescente de cair no regime de operação saturada ao escoar fluxos de tráfego maiores. Portanto, evitar situações em que existe uma probabilidade baixa de cair no regime de operação saturada (digamos, 5% de chance) significaria abdicar da possibilidade de admitir o escoamento de fluxos maiores, que ocorreriam sem problemas na maior parte do tempo (no caso, 95% do tempo), eventualmente aumentando a retenção de veículos no sistema viário. O efeito de evitar situações de risco potencial de acidentes é similar, embora neste caso a tolerância tenha de ser reduzida em função dos danos eventualmente produzidos.

Ambos os casos, apontam para a existência de um aspecto essencialmente probabilístico envolvido na definição prática da capacidade de tráfego, ainda não claramente explicitado.

Os dois tipos de intervenção usualmente importantes, no caso dos sistemas que operam em fluxo contínuo, estão identificados na definição de princípio estabelecida acima:

- os sistemas de controle de demanda (em geral de acesso) e
- os sistemas de controle/atendimento a incidentes.

Estas intervenções não excluem a possibilidade de utilizar alterações físicas destinadas a aumentar a capacidade de tráfego ou a reduzir os conflitos entre usuários da via como estratégias de melhoria em sistemas que operam em fluxo contínuo. No entanto, esgotadas estas alternativas de alteração física ou mesmo aplicadas em conjunto, as alternativas de controle de tráfego podem buscar uma melhoria adicional, normalmente com baixo custo.

Existem também, atualmente, estratégias experimentais de controle de tráfego que incluem a regulação da demanda de tráfego na via principal antes dos gargalos de capacidade. A estratégia mais usual é o controle seletivo de velocidade (exibindo limites de velocidade variáveis, através de Painéis de Mensagem Variável), que busca

Princípio Básico de Controle do Tráfego em Fluxo Contínuo: impedir a formação de filas, e a perda de capacidade, que decorre do regime de operação saturada (secundariamente, reduzir o período de tempo em que o regime de operação saturada ocorre) para garantir a melhor operação.

Os tipos de intervenção usual para Controle do Tráfego em Fluxo Contínuo são:

- os sistemas de controle de demanda (em geral de acesso);
- os sistemas de controle/atendimento a incidentes;

(esgotadas as melhorias físicas).

reduzir a demanda que segue para o gargalo de capacidade pela redução da capacidade na seção controlada. Em sistemas pedagiados, estratégias de retenção de demanda nos postos de pedágio foram também testados no passado. Estas estratégias também são discutidas brevemente a seguir.

4.1.1. Regulação de Demanda nos Acessos

Os sistemas de controle de acesso atuam através da regulação da demanda que entra e sai ao longo de uma via expressa ou sistema de vias expressas. A regulação de acesso (isto é, da demanda que entra) pode ser feita diretamente nos ramais de acesso, através de intervenções físicas (como a redução do número de faixas ou até fechamento total em acessos selecionados) ou do uso de semáforos (sinalizando ciclos curtos de até 20 segundos com sinalização intermitente, Ir/Não Ir, admitindo 1 a 2 veículos por verde, como usual nos Estados Unidos, ou sinalizando ciclos médios de até 40 segundos, como praticado na Europa ou Japão). Indiretamente, a sinalização de indicação (através de placas de orientação ou de painéis de mensagens variáveis) pode buscar atuar pela alteração das rotas dos usuários.

A regulação de fluxo ou velocidade ao longo da via principal é uma possibilidade teórica ainda não firmemente estabelecida na prática (que vai desde a limitação da velocidade até a parada do tráfego em praças de pedágio ou outros locais convenientemente selecionados).

A estratégia básica de controle através de limites de velocidade variável considera que a capacidade de tráfego na seção controlada é reduzida se a velocidade limitada é inferior à velocidade que corresponde à capacidade normal. Portanto, teria normalmente de aplicar limites de velocidade inferiores a 80km/h e ter efeitos reduzidos para valores superiores a 60km/h (especialmente se ocorre o efeito de homogeneização do tráfego que, segundo alguns estudos, aumenta a capacidade da via quando a velocidade é mais uniforme no tráfego). A redução da capacidade na seção controlada busca reter a demanda e reduzir o fluxo escoado, de forma a impedir a saturação e a perda de capacidade no gargalo adiante.

Embora o princípio básico de limitar e/ou reduzir a demanda direcionada aos gargalos de capacidade do sistema considerado seja seguido de forma geral, existem diferentes métodos de controle de tráfego possíveis. Métodos de controle isolado ou coordenado, programados a tempos fixos ou sob demanda, cada um destes podem ser aplicados com variações que consideram estratégias e/ou configurações distintas, como discutido adiante.

4.1.2. Atendimento de Incidentes no Tráfego

Os sistemas de controle de incidentes atuam através de sub-sistemas orientados à detecção dos incidentes, mobilização do atendimento, remoção dos incidentes, atendimento aos usuários e normalização do tráfego, agindo autonomamente ou de forma compartilhada com atividades orientadas a outras funções do controle ou operação do tráfego. Também neste caso, a ação direta direcionada para o rápido atendimento e remoção (total ou pelo menos parcial) do incidente que cause interferência relevante sobre as condições de tráfego pode ser combinada com a ação indireta direcionada para reorientar a demanda de tráfego das rotas ou períodos afetados pelo incidente para outras rotas ou períodos mais favoráveis.

Regulação de Demanda:

- usualmente nos acessos (demanda que entra), através de semáforos nos ramais de acesso; estratégia de ciclos curtos de até 20seg para 1 a 2 veículos por verde (Ir/Não Ir) ou de ciclos médios de até 40seg (convencional); também com ações físicas (redução de faixas ou fechamento de acessos);
- ao longo da via: estratégia experimental, com limites de velocidade variáveis em PMVs; antigo: retenção em postos de pedágio.

Atendimento a Incidentes:

- sistemas de detecção de incidentes (eventualmente remotos e/ou automatizados);
- sistemas de comunicação e mobilização de atendimento;
- sistemas de atendimento de incidentes e remoção de obstruções ao tráfego;
- sistemas de informação ao usuário e normalização do tráfego. (Ação rápida exige pré-mobilização).

Embora existam muitas iniciativas para emprego de novas tecnologias, em particular para detecção de incidentes (seja através de meios de monitoração remota, como sistemas de Circuito Fechado de TV, ou de recursos automação, como sistemas de processamento de vídeo em tempo real para detecção de incidentes), a necessidade de ação rápida para evitar os problemas decorrentes de incidentes mais graves (que produzem congestionamentos que se propagam rapidamente) em geral depende de um grau alto de pré-mobilização de recursos (viaturas, equipamentos de atendimento e remoção de veículos) e favorece tecnologias tradicionais (como a criação de postos de atendimento de campo, com estacionamento de unidades especiais de atendimento ao longo da via, ou a utilização de rondas em viaturas, providas de recursos básicos de atendimento aos incidentes), especialmente notando a dificuldade de mobilização após o incidente. As mesmas características também limitam a eficácia das ações de normalização do tráfego, incluindo os meios mais efetivos de informações aos usuários da via (seja sistemas de informação na via, com PMVs informando rotas alternativas e seus tempos de viagem, os sistemas de comunicação com veículos, via rádio ou telefonia móvel).

O conceito de incidente de tráfego é amplo, podendo incluir qualquer ocorrência eventual (inesperada e/ou excepcional) com efeitos relevantes sobre a operação de tráfego. Neste conceito amplo, eventos programados e/ou intempéris do clima (e seus efeitos como obstruções na via) são incidentes de tráfego e seriam objeto de atenção dos sistemas de controle de incidentes. Embora esta seja uma visão claramente conveniente, o entendimento mais restrito que mantém o foco em eventos inesperados e passíveis de remoção (como quebra de veículos e acidentes de trânsito) é mais usual e destaca os incidentes de maior importância cotidiana.

O princípio básico de minimizar a interferência dos incidentes sobre o tráfego (tanto em termos de tempo que ele ocupa a via quanto em termos de seu impacto sobre a eficiência no escoamento do tráfego), tem de ser combinada com a manutenção de condições de segurança adequada para os envolvidos no incidente, para a equipe de atendimento e remoção dos incidentes e para os demais usuários (potencialmente colocados em situações de risco inesperadas). Recursos diversos de detecção e atendimento dos incidentes, humanos ou técnicos, posicionados ao longo da via ou em locais estratégicos, estacionados ou em movimento, podem configurar sistemas de controle de incidentes bem complexos e precisam ser claramente articulados para obter eficiência em curtos períodos de atuação.

4.1.3. Sistemas de Controle de Tráfego em Fluxo Contínuo

Em ambos os tipos de intervenção usuais, isto é, os sistemas de regulação/controle de acesso e os sistemas de controle/atendimento de incidentes, o controle de tráfego pode ter estratégias várias, tanto mais complexas quanto mais interdependente for o sistema viário a ser controlado.

Dada a importância estrutural dos elementos viários que operam em fluxo contínuo, estas intervenções clamam por estratégias de controle mais globais e integradas, que desafiam a capacidade efetiva dos sistemas de controle de tráfego mais atuais.

Uma concepção e análise mais esclarecida das diferentes estratégias de intervenção não pode prescindir, em muitos casos, de uma visão mais fundamental dos objetivos e restrições do controle de tráfego, em termos globais. Nestes casos, critérios de projeto mais simples ou

Incidentes são também riscos relevantes de acidentes, particularmente quando as circunstâncias do atendimento aos incidentes são mais restritas. (Ação rápida mas segura).

intermediários devem ser avaliados diante de uma lógica de controle mais ampla.

Um exemplo imediato é o referente à regulação da demanda de acesso. A visão local simples poderia ser formulada como a limitação da demanda escoada nos ramais de acesso para um valor que evitaria saturar o gargalo potencial de capacidade adiante na via expressa (à jusante), com um grau de confiabilidade adequado. Embora cumpra o objetivo de preservar a fluidez na via com controle de acesso, o impacto desta ação de controle sobre a operação no ramal de acesso (e sobre seus usuários) e as repercussões decorrentes sobre outros elementos viários (em função das filas acumuladas nos ramais de acesso e da demanda desviada por rotas alternativas) pode frequentemente representar uma operação pior, em termos globais.

Outro exemplo imediato é o referente aos sistemas automatizados de monitoração do tráfego (como os baseados em CFTV-Circuitos Fechados de Televisão ou detectores automáticos baseados em qualquer das diversas tecnologias existentes). A eficácia restrita destes componentes em permitir a detecção e ainda obter informações requeridas (confiáveis) sobre a operação do tráfego (seja a demanda, a capacidade ou o serviço) tem de ser combinada com a possibilidade de dar uso efetivo aos dados observados. A “obtenção” da informação em tempo real ou mesmo a redução do tempo de detecção de incidentes tem de ser ponderado pela previsão do ganho final em termos de tempo de bloqueio da via ou de tempo de normalização do tráfego, ponderando a margem de erro de detecção ou informação, contra ou a favor da preservação da fluidez e segurança.

Objetivos mais fundamentais do controle de tráfego teriam de ser formulados a partir da ponderação dos tempos de viagem dos diferentes usuários (minimização dos tempos de viagem total ou médio) ou do atendimento efetivo das diferentes demandas existentes em menor tempo (maximização do total de veículos ou de veículos-quilômetro escoados nos picos ou minimização do tempo de escoamento das demandas dos picos), sem deixar de considerar os requisitos de manutenção de condições adequadas de segurança. Em termos sociais, outros custos teriam de ser também ponderados (como a emissão de poluentes atmosféricos, a produção de ruído ou outras interferências sobre as atividades locais). As estratégias de controle global discutidas adiante adotarão estas visões mais amplas.

Portanto, cumpre ao Engenheiro de Tráfego identificar a pertinência e adequação de estratégias de controle mais ou menos simples, entre aquelas discutidas a seguir.

4.2. MÉTODOS DE REGULAÇÃO DE ACESSOS ISOLADOS.

Como mencionado anteriormente, o controle de tráfego somente pode ser utilizado de forma isolada quando os elementos viários importantes são bastante espaçados e o número de elementos é pequeno. O maior espaçamento entre elementos viários permite aplicar técnicas de controle de tráfego isolado mesmo quando o número de elementos é significativo, com uma perda de eficiência eventualmente aceitável, especialmente quando alguns poucos elementos viários tem importância dominante no sistema como um todo. Não existe experiência suficiente para fixar o espaçamento mínimo que justifica o controle isolado mas é certamente da escala superior a quilômetros.

Para a regulação de tráfego em sistemas de controle de acessos para vias que operam em fluxo contínuo, os elementos críticos para o controle de tráfego são aqueles localizados antes dos potenciais gargalos de capacidade do sistema, cuja demanda pode ter de ser controlada para evitar que o sistema apresente sobre-demanda e opere em condições saturadas. Entre os elementos situados antes dos gargalos potenciais de capacidade, aqueles com maior demanda são naturalmente mais importantes e normalmente teriam a atenção principal (algumas peculiaridades, como a falta de capacidade de armazenamento de filas ou a articulação desfavorável com o sistema viário auxiliar, podem alterar esta condição).

As formas mais grosseiras de regulação da demanda nos acessos controlados, como o bloqueio de faixas ou o fechamento total, não serão especificamente discutidos aqui, visto que os princípios envolvidos são os mesmos considerados nas formas mais sensíveis. As formas mais avançadas de regulação da demanda, que consideram a possibilidade de alterar as rotas e/ou períodos de viagens dos usuários também não serão discutidos (neste caso, técnicas detalhadas ou mesmo princípios de análise ainda não têm reconhecimento amplo).

O problema básico considerado refere-se, portanto, à regulação da demanda em um acesso controlado por semáforos em um trecho anterior ao gargalo de capacidade potencial. Este semáforo não altera a preferência no uso da via mas apenas interrompe periodicamente o fluxo no ramal de acesso (a via principal ainda opera em fluxo contínuo e mantém a preferência em relação ao fluxo de entrada vindo do acesso controlado). Pode-se também analisar de forma semelhante algumas situações similares que envolvem alguns poucos ramais adjacentes (um ou dois pares de ramais de acesso e alguns ramais de saída intermediários) anteriores a uma mesma seção crítica (o gargalo potencial de capacidade).

No caso básico, deve-se considerar métodos de controle com programação a tempos fixos ou responsivos e, neste segundo caso, pelo menos duas estratégias de controle alternativas, com controle de laço aberto (sem realimentação) ou de laço fechado (com realimentação). As duas estratégias alternativas de controle da programação sob demanda podem ser consideradas como estratégias de controle adaptativo que implementam o mesmo princípio de impedir a saturação da via utilizando diferentes seções para obtenção das medidas de tráfego coletadas para decidir o ajuste da temporização dos semáforos utilizados na regulação de acesso.

Em todos estes casos de controle local na regulação da demanda nos acessos controlados, pode-se partir de uma situação em que a demanda no ramal de acesso Q_R faria com que houvesse sobre-demanda na seção crítica adiante, dada sua capacidade C_{out} de escoamento do fluxo de tráfego.

Portanto, sendo Q_{in} a demanda (em fluxo normal) na seção anterior à entrada do ramal de acesso, a condição mencionada corresponde a ter $Q_{in} + Q_R = Q_{out} > C_{out}$ (o que pode ser expresso em regular o fluxo escoado do ramal de acesso para $q_R \leq C_{out} - Q_{in} < Q_R$).

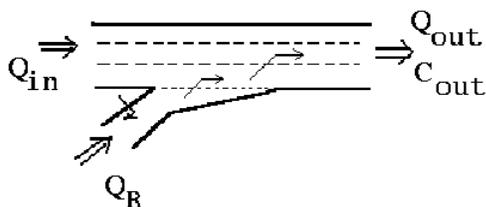
Nas demais condições, a análise local não determina a necessidade de regulação da demanda e pode-se permitir $q_R = Q_R$ (os métodos coordenados de regulação de demanda alteram esta conclusão ao reconhecer que a demanda na seção anterior Q_{in} é influenciada pela

Regulação de demanda em um acesso isolado (anterior ao elemento crítico, potencial gargalo da via):

- problema básico: reter o tráfego de acesso para evitar sobre-demanda (operação saturada) no gargalo potencial da via;
- dados básicos: capacidade no gargalo potencial (normal ou com incidente); fluxo de tráfego à seção de controle; demanda de tráfego no ramal de acesso regulado pela seção de controle.

Métodos de Controle de Acesso Isolado:

- programado a tempos fixos (baseado em padrões históricos/típicos);
- responsivo de laço aberto (detecção antes, sem realimentação);
- responsivo de laço fechado (detecção depois, para realimentação).



contribuição de ramais anteriores e estas, por sua vez, influenciam a condição local).

A programação com tempos fixos é uma aplicação direta do conceito de capacidade em fluxo descontínuo, pois a regulação da demanda nos acessos controlados é feita impondo uma restrição de capacidade no ramal de acesso de modo que $q_R = C_R = \varphi_R \cdot S_R \leq C_{out} - Q_{in}$. Em geral, é possível selecionar diversas combinações de tempos de verde e de ciclo para satisfazer esta condição de projeto. Sendo $\varphi_R = \frac{g_R - \ell}{t_c}$

(ou $\varphi_R = \frac{g_R + I_a - \ell}{t_c}$ se for utilizado um intervalo de amarelo I_a),

adota-se $g_R \leq \ell + \frac{C_{out} - Q_{in}}{S_R} \cdot t_c$ (S_R é o fluxo de saturação no

escoamento das filas formadas no ramal de acesso e t_c é o tempo de ciclo do semáforo).

A estratégia mais usual é limitar o fluxo escoado em cada período de verde a uns poucos veículos de forma a facilitar a sua incorporação à corrente de tráfego principal. Esta estratégia de uso de tempos de verdes curtos (chamada de Ir/Não Ir) seleciona o número de veículos liberados N_I (em geral 1 ou 2 veículos) e a capacidade é $C_R = \frac{N_I}{t_c}$.

Neste caso, pode-se sinalizar o número de veículos admitidos em cada período de verde e até dispensar o uso do intervalo de amarelo. Tem-se

então $t_c \geq \frac{C_{out} - Q_{in}}{N_I}$, usualmente limitado a valores entre 20 e 40

segundos, e $g_R = \ell + \frac{N_I}{S_R}$ ($g_R = \ell + \frac{N_I}{S_R} - I_a$, com intervalo de amarelo).

Em ambos os casos, o dimensionamento decorre da escolha do nível de regulação de demanda no acesso controlado, definido por $q_R \leq C_{out} - Q_{in}$, tendo-se então:

$$g_R = \ell + \frac{q_R}{S_R} \cdot t_c - I_a \quad g_R = \ell + \frac{q_R}{S_R} \cdot t_c \quad (4.1)$$

(ou $g_R = \ell + \frac{q_R}{S_R} \cdot t_c - I_a$ usando amarelo) com $t_c = 20a40$ segundos,

ou

$$t_c = \frac{N_I}{q_R} \quad (4.2)$$

com $N_I = 1$ ou 2 veículos (e $g_R = \ell + \frac{N_I}{S_R}$ ou $g_R = \ell + \frac{N_I}{S_R} - I_a$, usando

amarelo) apenas se $q_{Rmin} \leq q_R \leq q_{Rmax}$ (em geral, neste caso $I_a = 0$,

$q_{Rmin} = \frac{N_{Imin}}{t_{cmax}} = 180v/h$ e $q_{Rmax} = \frac{N_{Imax}}{t_{cmin}} = 640v/h$ por faixa).

Naturalmente, a regulação da demanda nos acessos controlados implica na necessidade de acomodar as filas de sobre-demanda nos ramais de acesso ou nas vias auxiliares adjacentes.

Dimensionamento do Semáforo de Controle de Acesso Isolado:
- ciclo médio (20a40seg):

$$g_R = \ell + \frac{q_R}{S_R} \cdot t_c - I_a$$

(em geral, usa-se o amarelo);
- ciclo curto (1a2veículos/ciclo)

$$t_c = \frac{N_I}{q_R} \text{ e } g_R = \ell + \frac{N_I}{S_R} - I_a$$

(em geral, não usa o amarelo).

A extensão das filas acumuladas depende do número de faixas no ramal de acesso. Se o período de sobre-demanda potencial (o pico local) tem duração T_p , a estimativa inicial da fila acumulada ao

$$\text{final do pico é } \tilde{n}_R = (Q_R - C_R)T_p \text{ ou } n_R = \frac{(Q_R - C_R)T_p}{1 - \frac{Q_R}{m} \cdot \frac{\ell_v}{V_R}} \text{ com a}$$

correção devida à dimensão física da fila, tendo-se $z_R = \frac{n_R}{m} \cdot \ell_v$

como extensão da fila (onde m é o número de faixas no ramal, $\ell_v \cong 6a8m$ é a extensão média ocupada por veículo na fila e V_R é a velocidade de chegada do tráfego na fila). A forma como a sobre-demanda será eliminada também influencia a extensão máxima atingida pelas filas, como discutido anteriormente, mas este efeito é em geral desprezível.

Estas filas podem ser excessivas e gerar interferências inadmissíveis com os elementos viários adjacentes. Neste caso, existe uma restrição mínima para o fluxo a ser escoado no ramal de acesso, em vista das filas máximas admitidas. Então, a eliminação do período de saturação não pode ser obtido apenas com a regulação da demanda no acesso controlado considerado.

Portanto, os ganhos obtidos serão reduzidos e a necessidade de controlar acessos anteriores (ou de melhorar a capacidade do gargalo potencial) cresce.

A capacidade de escoamento na seção crítica pode ser também ser estabelecida seguindo diferentes critérios, a partir dos valores práticos usuais ou de valores conservativos (que consideram a eventual saturação da via quando a demanda aproxima-se de 90% a 95% da capacidade usual). Os valores conservativos implicam, naturalmente, em condições de dimensionamento mais difíceis e, eventualmente, em atrasos desnecessários para os usuários que estão sendo servidos nos ramais de acesso controlados.

A aplicação trivial destes conceitos e técnicas é ilustrada em um exercício proposto ao final deste item.

Antes disso, será discutido como os mesmos conceitos estão envolvidos nos métodos de programação responsivos locais (ou isolados), que são baseados em medidas das variáveis de tráfego obtidas de detectores veiculares.

Historicamente, as primeiras estratégias de controle responsivo utilizaram a medição do fluxo de tráfego \hat{Q}_{in} na seção anterior à entrada do ramal de acesso para ajustar continuamente os tempos de verde no semáforo que executa a regulação da demanda no acesso controlado, de forma a impedir a geração de sobre-demanda.

O simples exame das expressões formuladas acima revela que esta medição fornece a variável fundamental de entrada para temporização, pelo menos em situações de tráfego normais (em que a capacidade de escoamento na seção crítica correspondente ao gargalo potencial mantém-se próxima do valor usual C_{out}). Como esta estratégia controla através de medição uma variável fundamental de entrada do processo, sua adequação repousa na pressuposição de que as demais relações e informações permanecem válidas e permitem obter uma temporização adequada. Esta é, portanto, uma estratégia de controle aberto (*open-loop control*) ou para frente (*forward control*).

Exemplo: $Q_R = 500 \text{ v/h}$, $S_R = 1800 \text{ v/h}$,
 $Q_{in} = 5200 \text{ v/h}$, $C_{out} = 5500 \text{ v/h}$, e $T_p = \frac{1}{2} \text{ h}$,
 tendo-se $C_{out} - Q_{in} < Q_R$.

Para $q_R \leq 300 \text{ v/h}$ as opções são (admitindo ramal com $m = 1$ faixa):

- ficando $t_c = 40 \text{ s}$ ($I_a = 3 \text{ seg}$, $\ell = 2 \text{ seg}$)

$$g_R^{ef} = \frac{300}{1800} \cdot 40 = 6 \text{ s}, \quad g_R = 5 \text{ s}, \text{ ou}$$

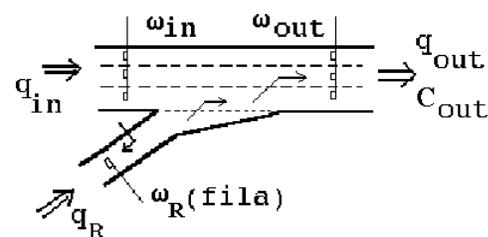
- fixando $N_I = 1 \text{ veic}$ ($I_a = 0$, $\ell = 2 \text{ seg}$)

$$t_c = \frac{3600}{300} = 12 \text{ s}, \quad g_R = \frac{300 \cdot 12}{1800} + 2 = 4 \text{ s}.$$

A extensão da fila acumulada em

$$T_p = \frac{1}{2} \text{ h}, \text{ adotando } \ell_v \cong 8 \text{ m}, V_R \cong 50 \text{ km/h},$$

$$\text{é } n_R = \frac{(500 - 300) \cdot \frac{1}{2}}{1 - \frac{500}{1} \cdot \frac{0,008}{50}} = 109 \text{ v} (870 \text{ m}).$$



Esta estratégia não envolve nenhum conceito teórico adicional, embora tenha de tratar uma série de aspectos práticos fundamentais. Por exemplo, uma nova medição de demanda pode ser obtida a cada novo ciclo de controle (usualmente correspondente a um ou mais tempos de ciclos) ou pode-se atualizar a medição de demanda corrente como uma combinação da medição corrente anterior e a nova medição obtida dos detectores (o que corresponde aos esquemas usuais de média móvel, utilizados para amortecer as oscilações aleatórias eventualmente presentes nas medições em curtos períodos de tempo).

Da mesma forma, a obtenção de medição a partir de um detector para todas as faixas, de um detector por faixa, de linhas sucessivas de detectores ou de disposições de detectores duplicados (intercalados ou em sequência), combinados com o uso de algoritmos robustos para uso de dados redundantes (fornecidas pelas linhas sucessivas de detectores) ou defeituosos (decorrentes de detectores em mau funcionamento), são recursos importantes para implementar os princípios previamente discutidos em tempo real.

A forma de tratamento dos dados sobre detectores também é variada. Normalmente, detectores simples permitem obter contagens veiculares e calcular fluxos de tráfego escoados sobre o detector. Não é possível detectar diretamente, portanto, a operação em fluxo normal ou forçado sem informação adicional. Este dado adicional pode ser provido por estimativas de velocidade (pouco precisas em detectores simples) ou da ocupância dos detectores (definida como a porcentagem do tempo em que a seção do detector está ocupada por veículos, que é uma medida indireta da densidade do tráfego).

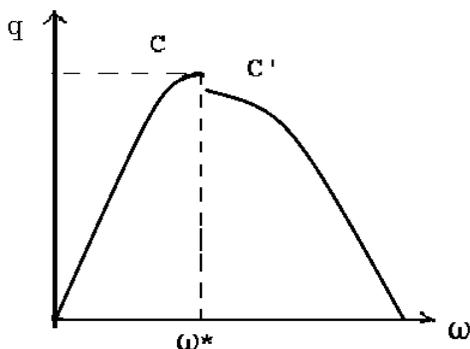
Detectores adicionais podem ser localizados no ramal de acesso controlado, seja na linha de retenção ou adiante dela (para verificar o escoamento do fluxo pretendido q_R , seja no final da extensão do ramal para detectar o crescimento preocupante das filas acumuladas (o que deve determinar uma alteração da lógica de regulação da demanda para evitar repercussões em outros elementos viários). Outros detectores na seção após a entrada do ramal de acesso (onde é possível medir q_{out}) ou em ramais de entrada adjacentes podem ser também usados, formulando lógicas de controle mais complexas a partir do mesmo princípio.

Mais recentemente, as estratégias de controle responsivo evoluíram para esquemas baseados nas variáveis de saída do processo, como é o caso da condição de fluxo (normal ou forçado) na seção após a entrada do ramal de acesso. Técnicas de controle que monitoram variáveis de saída são convencionalmente chamadas de estratégias com realimentação (*feedback control*).

A condição de fluxo pode ser melhor medida através da ocupância ω_{out} (por faixa ou média por faixa) do que pelo fluxo correspondente q_{out} , estabelecendo-se empiricamente o valor crítico ω_{crit} que corresponde ao limiar da transição entre o regime com fluxo normal para o regime com fluxo forçado. O princípio perseguido pela estratégia de controle é verificado diretamente através da medição da variável de saída, sem depende de suposições quaisquer. Portanto, esta é uma estratégia de controle fechado (*closed-loop control*) ou para trás (*backward control*).

Embora esta seja uma vantagem decisiva, novamente o exame das expressões formuladas acima é suficiente para mostrar que a informação coletada permite verificar o princípio perseguido mas não

Na estratégia de controle de laço aberto (para frente), o Controle de Acesso Responsivo Isolado utiliza a mesma formulação do controle programado com tempos fixos, usando detectores para medir o fluxo entrante Q_{in} (assume-se conhecida a capacidade C_{out}). No entanto, a estratégia de controle com laço fechado (para trás) é em geral mais adequada por introduzir um mecanismo de realimentação que monitoram diretamente o risco de saturação do gargalo de capacidade (tendo de agir com rápidos ajustes, numa escala menor que 15s a 60s, para corrigir as regras de operação a tempo de evitar a saturação), sendo robusta a mudanças de capacidade que não afetem o parâmetro de controle ω_{o*} (0,15 a 0,20 se mais homogêneo).



permite determinar a temporização necessária para corrigir o curso de ação do controle em uso. Por este motivo, regras adaptativas (preferencialmente validadas em condições empíricas típicas) tem de ser concebidas para definir uma estratégia de controle completa. Um exemplo usual é a regra de controle utilizada pelo ALINEA, em que o fluxo regulado em cada ciclo de controle k é ajustado por $q_R[k] = q_R[k-1] + \gamma_R \cdot (\omega_{o^*} - \omega_{out}[k])$, onde normalmente $\omega_{o^*} = \omega_{crit}$ e $\gamma_R \cong 70v/h$ é um parâmetro determinado empiricamente para determinar a rapidez de ajuste na regulação da demanda.

Esta lógica básica tem de ser complementada e adaptada para tratar os diversos aspectos práticos previamente mencionados, como a restrição de acumulação de filas nos ramais de acesso (quando existem detectores capazes de identificá-la).

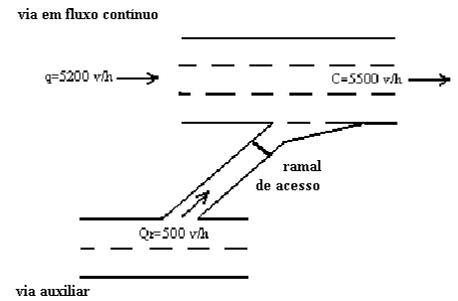
Deve-se observar que a lógica também é aplicável em situações com incidentes que determinem a redução da capacidade de escoamento da demanda no gargalo potencial. No entanto, o limiar entre a operação em fluxo normal e em fluxo forçado pode ser alterado pelos mesmos fatores que determinam a capacidade reduzida (como o bloqueio de faixas). Por este motivo, deve-se definir a forma de controle de uma forma sensível aos incidentes usuais e pode-se esperar, mesmo com cuidados especiais, uma redução na eficácia do controle.

EXERCÍCIO PROPOSTO: Controle de Demanda em Acessos de Vias Expressas

Considere que o ramal de acesso mostrado ao lado deve ser controlado por um semáforo para evitar a saturação do gargalo de capacidade adiante.

- Qual a programação adequada, utilizado um semáforo de ciclo rápido (Ir/Não Ir) com 2 veículos liberados com verde de 8s por ciclo semafórico?
- Qual deve ser o verde no semáforo do controle de acesso para um tempo de ciclo de 40s se o tempo morto é de 3s?
- Qual a fila no ramal ao final de meia-hora, com ou sem regulação de acesso, admitindo preferência da via principal?
- Qual a fila na via principal ao final de meia-hora sem regulação de acesso? Como controlar a demanda também na via principal?

(Admita 1 faixa no acesso e $s_R = 1800v/h/faixa$).



SOLUÇÃO DO EXERCÍCIO: Controle de Demanda em Acessos de Vias Expressas

- a) Segundo a política usual de controle de acesso, deve-se ter $q_r \leq C_{out} - q_{int}$, portanto: $q_r \leq 5500 - 5200 \leq 300 \frac{v}{h}$.

Como o ciclo semafórico permite passar 2 veículos em cada ciclo, com $g_r = 8s$, os 300 veículos passarão em 150 ciclos e ter-se-á: $t_c = \frac{3600}{150} = 24s$ com $g_r = 8s$. Note que, considerando a fórmula $g_r = \frac{q_r}{S} \cdot t_c + \ell$, implicitamente está sendo admitido que $\ell = 8 - \frac{300}{1800} \cdot 24 = 4,0s$ (tempo morto) em cada ciclo.

- b) Com $t_c = 40s$, o tempo de verde do semáforo é calculado por $g_r = \frac{q_r}{S} \cdot t_c + \ell$ e, portanto, tem-se: $g_r = \frac{300}{1800} \cdot 40 + 3$, ou seja, $g_r = 10s$ (embora usualmente seja utilizado um amarelo de 3 a 4s).

Note que neste caso, ter-se-ia $(10 - 3) \cdot \frac{1800}{3600} = 3,5 \frac{v}{ciclo}$, isto é, passariam cerca de 3a4 veículos em cada ciclo.

Casos com pelotões maiores exigiriam condições de especiais de incorporação ao fluxo da via expressa ou exigiriam uma faixa de entrada livre (alternativamente pode-se diminuir t_c).

- c) O ramal de acesso opera de forma intermitente a partir de uma fila contínua e crescente, dado que sua demanda é maior do que a capacidade proporcionada ($C_r < Q_r$) na $\frac{1}{2}$ hora de pico. A estimativa mais simples é $\tilde{n}_r = \tilde{n}_i + (Q_r - C_r) \cdot T_p$ (fila vertical), ou seja, tem-se: $\tilde{n}_r = 0 + (500 - 300) \cdot 0,5 = 100$ veículos ou 600 metros.

Dado que o ramal tem apenas 1 faixa, haveria interferência com a intersecção na entrada do ramal, visto que sua extensão é de 200 m ! Portanto, seria conveniente usar 2 faixas na aproximação do semáforo, antes da retenção (que pode manter 1 faixa) e eventualmente adicionar uma faixa de conversão para o ramal na pista auxiliar.

O ponto importante é que a fila ocorreria sem o semáforo. A saturação reduziria o fluxo escoado no gargalo de capacidade para cerca de 4950v/h (redução de 5% a 15%, entre 5225 a 4675v/h). Portanto, o fluxo escoado no ramal de acesso, com respeito à prioridade da via principal (onde $Q=5200v/h$) seria ainda menor. Com saturação, usualmente a regra legal de preferência não é observada (pela impaciência dos motoristas em fila) e um esquema de preferência alternada na faixa adjacente ao ramal de entrada é uma aproximação razoável para o comportamento real (isto tornaria a fila no ramal estacionária, num valor indefinido, e reduziria o fluxo na via principal para 4450v/h).

- d) Admitindo as observações anteriores e a estimativa mais simples, tem-se uma retenção de 425veículos na via principal. Não há uma forma usual de controle de demanda nas vias principais mas a proposta mais estudada é restringir a capacidade usando limites de velocidade restritos. No caso, se apenas a via expressa fosse controlada (o ramal de acesso seria livre), a capacidade na via expressa teria de ser reduzida para 5000v/h e a fila acumulada em meia-hora, com a estimativa simples, seria de 250veículos (menor que a fila sem regulação de acesso).

Os resultados acima podem ter a precisão melhorada mas o principal ponto é concluir que, na presença do fenômeno das duas capacidades, a regulação de acesso é potencialmente melhor para todos os usuários da via.

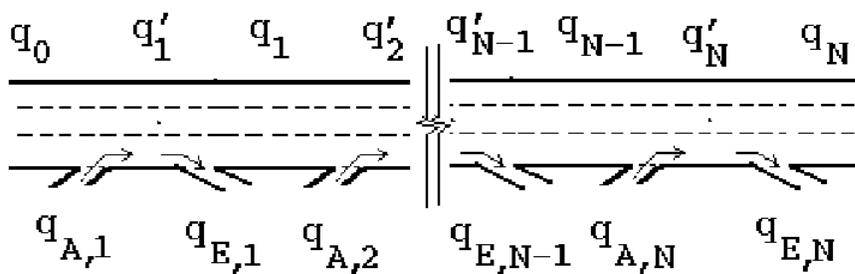
4.3. MÉTODOS COORDENADOS DE REGULAÇÃO DE ACESSO.

Em sistemas expressos mais complexos, o controle isolado com a regulação da demanda em um acesso controlado torna-se rapidamente ineficaz. Especialmente em sistemas mais saturados, a deficiência de capacidade no principal gargalo potencial dificilmente pode ser eliminada controlando a demanda em um único ramal de acesso. Por este motivo, estratégias de regulação de demanda que coordenam as decisões referentes aos diversos ramais de acesso do sistema, considerando as características de cada trecho e a posição relativa dos ramais de egresso intermediários, tornam-se passos de evolução natural.

Como no caso dos métodos de controle local, os métodos coordenados podem ser programados a tempos fixos (com base nos dados históricos de demanda e capacidade, considerando sua variação usual entre diferentes tipos de períodos e de dia) ou sob demanda (utilizando a informação obtida de detectores veiculares). Os métodos de regulação da demanda nos acessos controlados também são os mais usuais, embora novamente possam ser combinados com a disseminação de informações para alterar a escolha de rotas ou períodos de viagens dos usuários (através de comunicação por rádio ou sinalização com PMV-painéis de mensagem variáveis) e com o controle de fluxo na via (também aqui a técnica menos desenvolvida, normalmente implementada através do controle de velocidade usando PMVs).

A discussão feita a seguir tratará, brevemente, apenas das técnicas de

programação a tempos fixos para coordenação na regulação de demanda em acessos controlados. Os princípios discutidos também são considerados no controle responsivo, nas suas diversas estratégias.



O princípio básico perseguido pela regulação da demanda nos acessos controlados nas estratégias coordenadas é o

mesmo das estratégias locais: impedir que a sobre-demanda ocorra nos gargalos potenciais de capacidade da via (impedindo, desta forma, a perda de eficiência decorrente da operação saturada na via).

Toda a discussão feita no item anterior é, portanto, pertinente às técnicas coordenadas, incluindo o entendimento das limitações das estratégias locais (cuja viabilidade depende da possibilidade de acumular as filas retidas para limitar o fluxo na saída do ramal de acesso) e a interação entre acessos adjacentes (dado que o fluxo admitido em um acesso controlado anterior é um determinante fundamental do fluxo que chega pela via principal antes da seção de entrada do acesso seguinte e, portanto, da viabilidade da sua regulação de demanda).

A lógica orientadora do controle de tráfego tem, entretanto, de ser mais compreensiva.

No caso de controle isolado, o fluxo pré-existente na via principal é normalmente muito superior à demanda no ramal de acesso e uma lógica que subordina o atendimento à demanda no ramal de acesso totalmente à possibilidade residual de acomodação no gargalo

potencial de capacidade adiante na via é totalmente defensável (desde que esta ação seja viável).

No caso de considerar toda a via, normalmente operada com uma ou mais dezenas de ramais de acesso, a demanda dos acessos controlados (influenciada pela regulação da demanda) normalmente supera a demanda inicial da via principal. Além disso, a interdependência entre as condições de operação entre os ramais de acesso controlados torna impossível adotar uma lógica de subordinação simples, exceto quando uns poucos ramais de acesso e gargalos potenciais coexistem bastante espaçados (e quase independentes).

O primeiro passo para a formulação de um método de controle coordenado compreensivo é a representação da demanda de tráfego através de suas origens e destinos no sistema expresso. As entradas são a seção inicial da via principal ($i = 0$) e cada ramal de acesso existente ($i = 1, 2, \dots, N_A$). As saídas são cada ramal de egresso existente $j = 1, 2, \dots, N_E$ ou a seção final da via principal ($j = 0$). As demandas são, portanto, representadas por fluxos Q_{ij} (que chegam a via na seção i e deixam a via na seção j). Considerando a configuração da via, a rota percorrida entre a entrada i e a saída j permite identificar os trechos de via k utilizados no percurso (representado por uma variável $\delta_{ij}^k = 1$ se o trecho k é usado e 0 em caso contrário).

A matriz das origens e destinos dos deslocamentos é normalmente descrita pela proporção $p_{j/i}$ das viagens que chegam pela entrada i Q_i e direcionam-se ao destino j , tendo-se então $Q_{ij} = Q_i \cdot p_{j/i}$. Admite-se também que $q_{ij} = p_{j/i} \cdot q_i$ se a regulação da demanda decidir escoar um fluxo de tráfego q_i diferente da demanda de tráfego no ramal de acesso. Neste caso, acumulam-se filas $n_i = (Q_i - q_i)T$, durante o período T , no ramal de acesso considerado.

Considerando que as decisões de controle determinam diretamente o fluxo nos ramais de acesso q_i (através da temporização correspondente g_{Ri}, t_{ci}), a demanda de tráfego em cada trecho k do sistema expresso pode ser obtida como $Q_k = \sum_{ij} q_i \cdot p_{j/i} \cdot \delta_{ij}^k$ e deve ser menor que a sua capacidade C_k , se for desejado evitar a ocorrência de sobre-demanda. Esta expressão pressupõe que a demanda de tráfego será escoada em todos os trechos intermediários (isto é, que $q_k = Q_k \leq C_k$) e incorpora a relação entre a demanda em trechos adjacentes, com $Q_{k+1} = Q_k + q_{i_k}$ se a entrada i_k localiza-se entre os trechos k e $k+1$ ou $Q_{k+1} = Q_k - q_{j_k}$ se a saída j_k localiza-se entre os trechos k e $k+1$, implicitamente.

Em resumo, estas relações podem ser expressas nas restrições $\sum_{ij} q_i \cdot p_{j/i} \cdot \delta_{ij}^k \leq C_k$ que consideram todos os trechos como gargalos de capacidade potenciais. Naturalmente, com as decisões mantidas durante todo o período de controle T , deve-se ter $q_i \leq Q_i$ mas esta restrição não precisa normalmente ser considerada se a estratégia de controle buscar o melhor atendimento da demanda, como será discutido a seguir. Outras restrições podem ser consideradas como

fluxos mínimos $q_i \geq q_i^{\min}$ e/ou filas máximas $n_i \leq n_i^{\max}$ (ignorando filas iniciais). Deve-se notar que, embora possam ser formuladas de forma trivial, estas restrições podem novamente limitar a viabilidade do controle (como no caso das estratégias locais).

Note que esta formulação considera que a demanda de tráfego e a estrutura da origem e destinos dos deslocamentos é uniforme ao longo do período de controle T e é independente das decisões de controle na regulação da demanda. Estas são as principais simplificações admitidas aqui, a serem eliminadas para formular estratégias de controle mais avançadas, que permitem variar as decisões ao longo dos sub-períodos de controle. Neste caso, a variação das filas ao longo do período tem de ser consideradas (sua formação e dissipação) e é mais usual ter formulações em termos de volume de tráfego (ao invés de fluxo de tráfego).

A formulação de uma estratégia de controle é completada pela definição de um objetivo capaz de identificar as decisões a serem tomadas em cada ramal de acesso controlado.

Formulações de otimização são cada vez mais comuns e acessíveis, dada a larga disponibilidade atual de *softwares* de otimização (tanto na programação a tempos fixos como sob demanda). Neste caso, as funções objetivo mais usuais são relacionadas com a maximização do tráfego escoado no período de controle, medido em termos de veículos ou de veículos-quilômetro, e estão indiretamente relacionadas com medidas de serviço de interesse para os usuários (que seriam utilizadas em funções objetivo mais diretas, como a minimização dos tempos de viagem ou dos atrasos nos acessos experimentados pelos usuários).

Estas funções objetivo podem normalmente ser expressas diretamente a partir dos fluxos nos acessos ou, mais diretamente, dos fluxos nos trechos. Por exemplo, pode-se exprimir a maximização do fluxo escoado como $\max \sum_k q_k$ ou $\max \sum_k q_k \cdot \ell_k$ (onde ℓ_k é a extensão do trecho k). Note que o fluxo escoado é a parcela complementar da demanda de tráfego em relação às filas retidas, que por sua vez estão relacionadas com os atrasos nos acessos. No entanto, formulações mais avançadas podem preferir funções objetivo mais diretamente relacionadas com as medidas de serviço de interesse para os usuários, introduzindo pouca dificuldade adicional em face dos recursos computacionais atuais.

No caso de regulação da demanda de acesso em sistemas expressos mais simples, a informação sobre a matriz de origem e destino dos deslocamentos pode ser dispensada e substituída por um dado mais direto: para cada ramal de acesso i , deve-se determinar a proporção da demanda β_{ik} que permanece na via principal em cada um dos trechos sucessivos k adiante do ramal de entrada i (uma informação que se altera após cada ramal de egresso e contém implícita a estrutura da origem e destino das viagens vindas de cada acesso).

Além de métodos de otimização como o apresentado até aqui, existem diversas formulações heurísticas aproximadas, mas todas normalmente têm de ser resolvidos com a utilização de ferramentas computacionais, especialmente para programação sob demanda. Por exemplo, tomando a formulação mais simples, as variáveis de decisão q_i seriam obtidas de:

$$\text{máx} \sum_k q_k = \sum_{ik} q_i \cdot \beta_{ik}$$

$$\text{com} \sum_i q_i \cdot \beta_{ik} \leq C_k$$

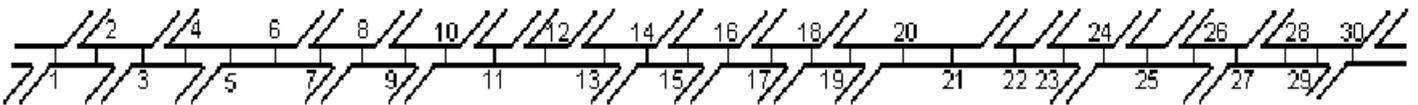
(obtendo-se os tempos de verde por $g_{Ri} = \ell_i + \frac{q_i}{S_{Ri}} \cdot t_{ci}$ ou outra das expressões anteriores).

A utilização de ferramentas computacionais faz com que a aplicação para o controle responsivo, em sistemas em tempo real, seja uma extensão razoavelmente direta dos métodos de programação a tempos fixos, simplesmente substituindo as informações obtidas dos perfis históricos por dados coletados dos detectores veiculares em períodos relevantes. Por exemplo, um dos sistemas mais famosos (o de Hanshin, Japão) utiliza uma formulação similar à apresentada anteriormente aplicada a cada 5 minutos (critérios particulares são adotados para atualização das medições e para tratar restrições de filas máximas críticas).

EXERCÍCIO PROPOSTO: Controle Coordenado de Demanda em Vias Expressas

Considere o segmento de via expressa esquematizado abaixo, que apresenta problemas de congestionamento no pico, e os dados a seguir apresentados:

Trechos da via expressa:



	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
capacidade (v/h)	9434	9453	9615	7619	7550	7550	7692	7692	7563	9130	7619	5671	5750	5806	5728
n° de faixas	5	5	5	4	4	4	4	4	4	5	4	3	3	3	3
extensão (km)	0,50	0,60	0,47	0,60	0,15	1,46	0,92	0,66	0,62	0,38	0,27	0,40	0,22	0,80	0,51

	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
Capacidade (v/h)	5806	5520	7930	7680	9140	9230	7930	7840	8840	7604	7760	7680	6732	6480	6265
n° de faixas	3	3	4	4	5	5	4	4	5	4	4	4	4	4	4
Extensão (km)	0,58	0,70	0,45	1,16	0,34	0,20	0,45	0,45	0,24	1,43	0,67	0,71	0,25	0,36	0,78

Matriz Origem-Destino:

on\off	1	3	6	8	10	11	12	14	16	18	21	22	24	25	27	30	Qr
1	203	191	171	45	129	215	4	71	0	76	33	67	5	27	10	562	1809
3				4	6	19	4	16	0	0	0	0	4	12	7	40	112
5			2	0	7	58	2	15	10	17	12	28	10	33	19	103	316
8						34	0	4	11	11	20	13	12	41	24	126	296
10					20	83	0	20	48	21	0	10	6	20	12	66	306
14								2	0	0	2	3	9	5	30	51	51
16									3	3	6	9	4	19	7	39	90
18										7	3	0	5	14	9	44	82
20													34	108	40	153	335
24													13	39	23	124	199
27															10	56	66
30																44	44
																	370
																	6

Utilizando as formulações simplificadas, como a usada em Hanshin/Japão, determinar:

- as possíveis alternativas que poderiam ser adotadas para determinar os fluxos de acesso admissíveis;
- os valores recomendados para os fluxos de acesso para os dados de demanda no período de pico.

SOLUÇÃO DO EXERCÍCIO: Controle Coordenado de Demanda em Vias Expressas

A formulação de Hanshin (Japão) utiliza uma programação linear em tempo real com o auxílio de detetores. O fluxo na via é medido de cinco em cinco minutos e esses dados analisados servirão posteriormente de base para se determinar o volume de veículos que irão ter acesso a via nos ramais.

O parâmetro β_{ik} indica a proporção do fluxo de um trecho i da via que prossegue até um outro trecho k .

O fator β_{ik} é calculado através da divisão da soma da quantidade de veículos medidos nos trechos i até k dividido pelo volume total medido entre os trechos. É este parâmetro que servirá de base para se determinar o volume que poderá entrar na via expressa nos ramais de acesso.

O princípio básico é o de maximizar o volume processado (Hanshin/Japão) em veículos ou veículo.kilômetros:

$$\max_{\{X_i\}} \sum_i \alpha_i \cdot X_i \text{ com } \alpha_i = 1 \text{ (volume de tráfego) ou } \alpha_i = \bar{\ell}_i \text{ (veículo-km)}$$

onde $X_i = q_{A,i} \cdot T$ é o volume correspondente ao fluxo determinado na ligação de acesso i no período T sujeito às restrições dos gargalos de tráfego, isto é, os volumes processados nos ramais diminuem à medida que os gargalos vão surgindo.

$$\beta_{0k} \cdot \bar{X}_0 + \sum_i \beta_{ik} \cdot X_i \leq Z_k \text{ para cada segmento } k \text{ em que } \bar{X}_0 = q_0 \cdot T \text{ é o volume}$$

correspondente ao fluxo que entra no início da via expressa, β_{ik} é a proporção do fluxo de i (inclusive $i=0$) que prossegue até o segmento k e $Z_k = C_k \cdot T$ é o volume que pode ser processado no segmento k (dada sua capacidade).

Existe ainda uma outra solução que seria a de minimizar os atrasos gerados pelas filas nos ramais.

Restrições relacionadas com as demandas e filas nos acessos:

$$0 \leq X_i \leq n_i + \bar{Y}_i \text{ e } n'_i = n_i + \bar{Y}_i - X_i \leq \bar{n}_{\max,i}$$

em que n_i , n'_i são a fila na ligação de acesso i no início e final do período (igual à fila restante ao final do período anterior), $\bar{n}_{\max,i}$ é a fila máxima que pode ser armazenada no acesso i e $\bar{Y}_i = \bar{Q}_i \cdot T$ é o volume correspondente à demanda no acesso i (suposta dada).

Na resolução do problema é importante levar em consideração algumas restrições como por exemplo evitar que as filas geradas nos ramais ultrapassem a sua própria extensão, para se evitar que elas atrapalhem o fluxo da via.

Exemplo de cálculo de β :

$$\beta_{13} = \frac{191 + 171 + 45 + 129 + 215 + 4 + 71 + 0 + 76 + 33 + 67 + 5 + 27 + 10 + 562}{1809} \quad \text{ou } \beta_{13} = 0,89$$

Note ainda que, para implementar cada uma das opções de controle, deveriam ser especificados os valores de fluxo mínimo e de fila máxima em cada ramal de acesso e de fluxo máximo em cada ramal de acesso ou egresso. A seguir, foram assumidos valores genéricos para estas variáveis e foram determinadas as estratégias de controle correspondente à maximização do volume de tráfego escoado, que é a soma dos fluxos de entrada (qr) nos ramais de acesso do trecho (o fluxo inicial está incluído).

ramal	qr	Qr	qmin	qmax	ni	nf	nmax	atraso
1	1809	1809	905	2000	0	0	0	0,00
3	112	112	56	500	0	0	150	0,00
5	185	316	158	500	0	131	150	5,31
8	148	296	148	500	0	148	150	7,50
10	306	306	153	500	0	0	150	0,00
14	43	51	26	500	0	8	150	1,41
16	90	90	45	500	0	0	150	0,00
18	82	82	41	500	0	0	150	0,00
20	335	335	168	500	0	0	150	0,00
24	199	199	100	500	0	0	150	0,00
27	66	66	33	500	0	0	150	0,00
30	44	44	22	2500	0	0	150	0,00
fluxo	3419	3706	v-km	26.350	Nf	287	Atraso	14,22

Neste caso o critério utilizado corresponde ao de minimizar as filas nos ramais de acesso (a diferença entre as chegadas e saídas nos ramais). Diferentes objetivos podem ser formulados e avaliados comparativamente.

4.4. CONTROLE DE TRÁFEGO EM FLUXO DESCONTÍNUO.

A discussão sobre a análise da capacidade e operação nos elementos viários que operam em fluxo descontínuo permite verificar que as interseções são os pontos críticos da sua operação e que a combinação de dois aspectos distintos tem de ser considerada:

- a seleção do tipo de controle de tráfego a ser adotado nas interseções do sistema viário em análise (especialmente a escolha entre sinalização de preferência e sinalização semafórica), de forma a atender adequadamente a todos os usuários da via;
- a seleção da configuração e sinalização mais adequada para o atendimento às demandas existentes e, no caso da utilização de semáforos, a definição dos planos e programas de operação semafóricos adequados a cada período do dia; o controle semafórico comporta ainda a seleção do modo de operação (programação a tempos fixos ou controle responsivo e, neste segundo caso, o controle atuado pelo tráfego, o controle adaptativo e os sistemas de controle em tempo real).

Decididas estas ações prévias, o elemento mais usualmente empregado para controle de tráfego em fluxo descontínuo é o semáforo (elemento predominante nas vias estruturais de sistemas de vias arteriais). A técnica de operação de semáforos e sistemas de controle semafóricos é, na verdade, um dos aspectos mais bem desenvolvidos no arcabouço do controle da Engenharia de Tráfego tradicional.

O aspecto crítico da operação nas interseções decorre do fato de que os conflitos entre correntes de tráfego distintas concentram-se nestes pontos do sistema viário. A acomodação (ou não) destes conflitos em uma interseção deve utilizar uma das estratégias seguintes:

- estabelecimento de prioridade para entre as correntes de tráfego conflitantes (usualmente a mais importante, em função do volume de tráfego, exceto quando há critérios peculiares);
- a separação de conflitos simultâneos no espaço (em posições sucessivas e/ou em vias que cruzam em níveis diferentes), de forma que conflitos reduzidos ocorram em posição separada e permitam realizar as manobras em etapas;
- a separação dos conflitos simultâneos no tempo, de forma que alguns movimentos sejam temporariamente bloqueados para permitir a operação dos demais;
- a proibição local de movimentos conflituosos (que são atendidos por rotas alternativas que usam a mesma interseção ou outras interseções e/ou vias adjacentes).

Estas estratégias podem ser aplicadas individualmente, como sugere a discussão a seguir, ou de forma combinada, como exige o tratamento dos casos mais complexos.

Como a regra geral de preferência na circulação (na ausência de sinalização) interrompe todas as correntes de tráfego, a resolução destes conflitos inicia-se pela sinalização de preferência ou prioridade no uso da via, que é a forma mais adequada de operação quando:

- existe um vetor de deslocamento consistentemente mais importante (considerando as diferentes condições operacionais que ocorrem ao longo do dia), que receberá a preferência estabelecida pela sinalização e operará em fluxo contínuo;
- a operação dos movimentos secundários (não prioritários) poderá ocorrer com condições de desempenho aceitável, apesar

As interseções são os elementos críticos de vias que operam em Fluxo Descontínuo, devendo-se:

- selecionar o tipo de controle de tráfego mais adequado a cada interseção;
- selecionar o tipo de configuração e sinalização mais adequada (no caso de interseções semaforizadas, a decisão inclui o plano semafórico e seu modo de operação, além de permitir sua integração ao controle de uma rede de semáforos monitorado de forma centralizada ou distribuída).

Decididas estas ações prévias, o controle de tráfego em fluxo descontínuo busca obter a melhor operação dos semáforos, elementos básicos em sistemas de vias arteriais.

A seleção da forma adequada para o controle, configuração e sinalização das interseções deve considerar:

- o estabelecimento de prioridade entre as correntes de tráfego conflitantes;
 - a separação de conflitos simultâneos no espaço (permitindo manobras em etapas para vencer conflitos múltiplos);
 - a separação de conflitos simultâneos no tempo (definindo estágios de operação de semáforos na interseção);
 - a proibição local de movimentos conflituosos (provendo uma rota alternativa para os usuários).
- (Em casos complexos, combinadas).

O primeiro passo da intervenção sobre as regras gerais de circulação nas interseções é, em geral, a implantação da sinalização de prioridade.

A sinalização de prioridade em interseções é, em geral, satisfatória se:

- existe um vetor de deslocamento consistentemente mais importante;
- a operação dos movimentos secundários tem condições aceitáveis;
- existem condições seguras para os diferentes tipos de usuário (em particular, de intervisibilidade).

- de descontínuos (em função da necessidade de ceder a preferência para os movimentos preferenciais ou prioritários);
- existem condições de segurança adequadas para que as regras de preferência e as demais formas de interação entre os usuários da via sejam percebidas e avaliadas (em particular, as condições de intervisibilidade permitem decisões seguras sobre o risco de manobra para os diferentes tipos de usuário)

A implantação da sinalização semafórica é um recurso disponível para utilização quando alguma destas condições não ocorre e prefere-se aplicar uma estratégia de minoração dos conflitos pela sua separação no tempo. A estratégia de semaforização consiste na definição de alternar ao longo do tempo as regras de preferência no uso da via de maneira a atender todas as demandas existentes na interseção.

Em cada período de operação semafórica, os movimentos podem ser bloqueados ou autorizados e, neste segundo caso, podem ser protegidos (isto é, preferenciais) ou apenas permitidos (isto é, secundários). Cada período de tempo na operação semafórica em que o conjunto de movimentos autorizados e bloqueados, protegidos e permitidos, é o mesmo constitui um Estágio Semafórico e terá uma duração correspondente ao tempo de verde necessário para sua operação. Entre os tempos de verde de estágios sucessivos, existem os intervalos de entreverdes, constituídos pelo intervalo de amarelo e pelo intervalo de vermelho de segurança (ou vermelho total/geral, como é eventualmente chamado), cuja função é permitir a transição segura para os movimentos que param e para os conflitos entre os que param e iniciam a operação entre os estágios sucessivos.

Normalmente, todos os movimentos terão de ser bloqueados em algum estágio (a menos que não existam outros movimentos com conflitos relevantes com um dado movimento) e terão operação descontínua (incluindo eventuais bloqueios causados por movimentos preferenciais).

Por este motivo, em geral pode-se considerar que a operação com sinalização de prioridade deve ser mantida sempre que possível, para preservar de interrupções as correntes de tráfego preferenciais em uma dada interseção. Para isso, abrindo-se mão da estratégia de separação dos conflitos no tempo representada pela semaforização, a estratégia de separação dos conflitos no espaço e a opção de proibição local passam a ser as alternativas possíveis.

A proibição local de movimentos é em geral uma ação de efeitos dúbios. Normalmente, as manobras proibidas alteram a forma de realização dos deslocamentos. Raramente, as viagens mudam de origem e/ou destino, sofrem outras alterações ou são mesmo suprimidas. Na hipótese usual de alteração da forma de realização dos deslocamentos, normalmente uma nova rota é escolhida, percorrendo o mesmo local com a realização de outros movimentos ou utilizando vias paralelas (e deixando o local). Não raramente, uma manobra proibida tem de realizar dois movimentos complementares, quando permanece no mesmo local, para atender sua necessidade de deslocamento, e pode ter de passar pela interseção mais de uma vez (aumentando a demanda de tráfego total na interseção).

Os efeitos da intervenção devem, portanto, ser cuidadosamente avaliados contrabalançando a circuitação adicional trazida aos movimentos proibidos e os potenciais ganhos de desempenho obtidos para todos. Os ganhos de desempenho podem eventualmente beneficiar os próprios movimentos proibidos (demonstrando a

O segundo passo da intervenção sobre a circulação nas interseções é, em geral, a melhoria da configuração (canalização de tráfego).

A geometria e o controle de tráfego pode dar sobrevida à sinalização de prioridade com pequenas intervenções mas, eventualmente, pode também justificar intervenções maiores ou tratamentos complementares de circulação (vias de mão única, binários em sentidos opostos, laços de circulação em mão única, ...) ou separação de nível (viadutos ou passarelas), de maior custo/impacto.

existência de ganhos do controle de tráfego externo) mas este é um efeito pouco esperado. O efeito normal é, entretanto, o sacrifício dos usuários restringidos pelo benefício dos demais (o que explica a reação usual a este tipo de ação).

A separação dos conflitos no espaço é, portanto, o passo seguinte na evolução desejada do controle de tráfego nas interseções. Com exceção da separação de nível (pela criação de interconexões, seja para veículos ou para pedestres), estas estratégias são aplicadas pela reorganização da disposição física dos movimentos na superfície da interseção alocando os movimentos de forma a permitir que os conflitos múltiplos sejam resolvidos em etapas, utilizando posições sucessivas no espaço e obtenham condições de operação e segurança adequadas. Esta estratégia é usualmente consolidada em princípios de canalização de tráfego e em técnicas de projeto viário que visam proporcionar sua implantação eficiente e segura.

Portanto, a utilização de semaforização e a proibição de movimentos são, em princípio, estratégias que devem ser adiadas tanto quanto possível. Existem poucas circunstâncias que recomendam a adoção da semaforização antes de considerar outras opções, normalmente relacionadas com a existência de semáforos adjacentes que tornem vantajoso incorporar a interseção considerada em um sistema coordenado eficiente.

A análise da adoção das opções sem semaforização, assim como a seleção entre formas alternativas propostas para circulação, semaforização ou canalização, em geral deve seguir os procedimentos usuais de comparação dos custos e benefícios das diferentes alternativas. Além disso, na medida que as intervenções tenham maior impacto (como seria o caso de tratamentos de circulação mais amplos, pela área afetada ou magnitude dos efeitos), em geral justifica-se também uma ótica de avaliação igualmente ampliada (por exemplo, considerando aspectos urbanísticos e ambientais, além dos custos e benefícios relacionados com a circulação viária).

A seguir, serão discutidos os princípios usualmente aplicáveis para a concepção de alternativas de canalização de tráfego e de semaforização e sua temporização. Apenas a semaforização e a temporização de semáforos isolados ou coordenados envolvem procedimentos específicos de controle de tráfego, orientados a determinar diretamente o projeto adequado e, por este motivo, receberão atenção especial.

4.5. PRINCÍPIOS DE CANALIZAÇÃO DE TRÁFEGO EM INTERSEÇÕES.

Canalização de tráfego é o termo genérico utilizado para denominar um conjunto razoavelmente amplo de princípios e técnicas aplicadas para organizar a operação de interseções em nível, especialmente não semaforizadas (embora apliquem-se também às semaforizadas).

Seu objetivo geral pode ser definido como a utilização de dispositivos físicos (a sinalização horizontal e o alinhamento da via, incluindo ilhas físicas ou pintadas, além de gradis, barreiras e outros dispositivos auxiliares de sinalização) para delinear as trajetórias adequadas para cada movimento de forma a permitir manobras eficientes e seguras. A redução e/ou separação dos pontos de conflitos na via (provisão de áreas de espera intermediária) e, caso ainda restem conflitos relevantes, a melhoria da intervisibilidade entre usuários de diferentes

O terceiro passo da intervenção sobre a operação nas interseções é, em geral, a implantação da sinalização semafórica de controle (regulamentação).

O quarto passo da intervenção sobre a operação das interseções é, em geral, a proibição de movimentos conflituosos (e definição de trajetos de circuitação para atendimento à demanda correspondente em rotas alternativas).

A comparação de custos e benefícios das intervenções viáveis em cada contexto pode, entretanto, alterar esta ordem usual de forma significativa.

Em particular, tratamentos de circulação mais amplos tem grande impacto e exigem uma ótica de avaliação igualmente ampliada (urbanística, ambiental, ...).

movimentos conflituosos e a redução das velocidades relativas de impacto dos usuários, entre si ou em relação a elementos da via, são as orientações gerais de suas medidas.

Os conflitos usuais em interseções são tradicionalmente classificados nos seguintes tipos:

- divergência (ou separação), onde correntes de tráfego paralelas devem buscar trajetórias distintas a partir de um ponto comum; é um conflito de menos gravidade mas pode ser perigoso onde as velocidades praticadas são distintas (como no caso em que apenas uma das correntes de tráfego deva parar antes de realizar a manobra) e onde as oportunidades para realização das manobras não são simultâneas (como no caso em cada uma tem de cruzar fluxos opostos distintos, pelo menos em parte);
- convergência (ou incorporação), onde correntes de tráfego provenientes de pontos distintos buscam utilizar trajetórias paralelas utilizando o mesmo trecho da via; é um conflito que normalmente ocorre com intervisibilidade deficiente (exceto quando é possível prover faixas de incorporação e/ou aceleração paralelas ao trecho comum) e que também pode ter diferenciais de velocidade importantes (como no caso de fluxos vindos de vias de velocidades diferentes ou envolvendo trajetórias em curva);
- cruzamento, onde correntes de tráfego de movimentos com origem e destino distintas percorrem uma mesma área da interseção; as condições de intervisibilidade variam de forma ampla assim como varia a velocidade relativa de impacto, em função do ângulo de cruzamento e da orientação das trajetórias (que podem incluir sentidos opostos, como nos casos de ultrapassagens e invasões de pista).

Embora estes conflitos normalmente envolvam movimentos regulares, os conflitos decorrentes de manobras irregulares (intencionais ou não) também são relevantes, assim como são relevantes conflitos entre veículos e pedestres (além dos conflitos veiculares).

Em função dos conflitos existentes, os pares de movimentos podem ser classificados em compatíveis, quando não existe conflito entre eles (tais movimentos são ditos concordantes), ou não. Em certos casos mais difíceis, os pares de movimentos podem ser classificados em admissíveis, quando existe conflito aceitável entre eles (seriam movimentos aceitáveis simultaneamente), ou não. Estes são conceitos fundamentais para a definição de planos semafóricos, ponto que será analisado no item seguinte.

A compatibilidade normalmente é avaliada para movimentos de vias ou sentidos distintos (o que excluiria os conflitos de divergência) mas eventualmente tem de considerar os movimentos de uma mesma via quando geram condições de operação conflitantes (manobras que andam e param em períodos distintos) ou diferenciais de velocidade relevantes (normalmente decorrentes de raios de manobra reduzidos).

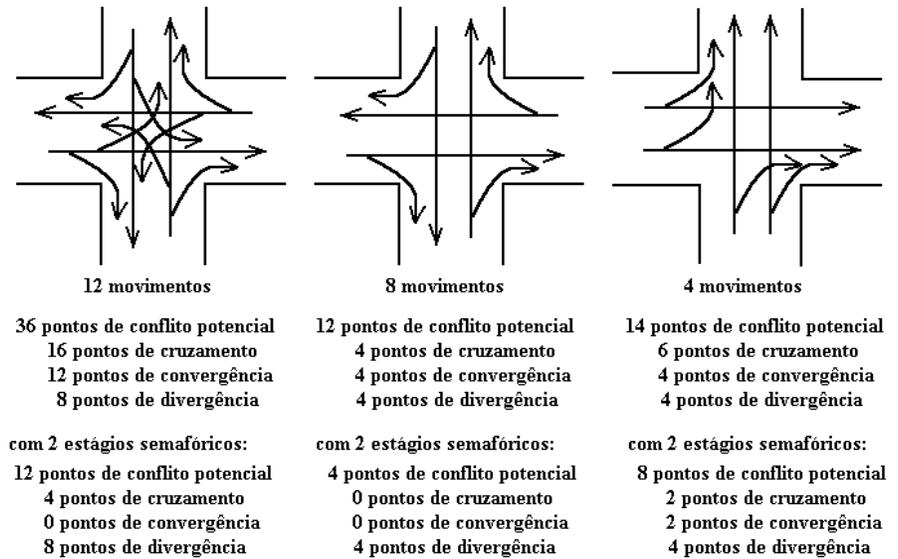
A compatibilidade pode recomendar que as manobras operem junto (usual para movimentos da mesma via) ou não (usual para movimentos que se cruzam ou que convergem para o mesmo trecho da via).

A admissibilidade ou não dos conflitos remanescentes depende de aspectos relacionados com a segurança viária (como a existência de intervisibilidade adequada) e com a fluidez do tráfego (como a existência de capacidade e desempenho adequados).

Em função dos conflitos existentes (divergência, convergência ou cruzamento), os pares de movimentos são classificados em compatíveis (sem conflito) ou não, admissíveis (com grau de conflito aceitável) ou não. A classificação aplica-se a movimentos regulares ou irregulares (intencionais ou não), de veículos ou de pedestres.

Esta admissibilidade é função da configuração da interseção, dos movimentos proibidos (ou permitidos) e dos volumes de tráfego envolvidos e seu nível de prioridade.

Os dois primeiros fatores aparecem com clareza na análise dos pontos de conflito potencial na interseção.



A proibição de movimentos ou a semaforização reduzem o potencial de conflito de manobras regulares mas tem outros efeitos que devem ser ponderados (como circuitação e velocidades inseguras).

Considerando apenas as manobras regulares, a proibição das conversões à esquerda em um cruzamento usual de vias com sentido duplo de operação reduz os pontos de conflito potencial de 36 para 12 (eliminando a maior parte dos conflitos de cruzamento e convergência). A semaforização reduziria os pontos de conflito potencial para 12 ou 4, conforme sejam ou não proibidas as conversões à esquerda simultaneamente (a circulação em mão-única reduziria para 14 ou 8, respectivamente). Embora não seja um fato geral, este é um padrão usual: a simplificação da circulação reduz os pontos de conflito potencial e torna os conflitos remanescentes menos graves. Os demais efeitos devem também ser ponderados (alguns potencialmente prejudiciais, como maior circuitação e mesmo velocidade insegura).

Os conflitos podem tornar-se aceitáveis se puder ser provida uma capacidade (e segurança) adequada.

O outro fator é o informado pela análise de capacidade e desempenho na operação com fluxos conflitantes, em particular no caso de interseções com sinalização de prioridade. Neste caso, como discutido anteriormente, o desempenho para as manobras secundárias considera:

- o fluxo oposto de cada manobra secundária, isto é, o fluxo nos movimentos conflitantes e prioritários em relação à manobra secundária em análise;
- o número de faixas (ou posições) paralelas disponíveis para permitir manobras secundárias simultâneas e o seu uso com as diferentes demandas de manobras secundárias que compartilham a operação no mesmo espaço físico;
- o intervalo mínimo requerido para a realização da manobra secundária nas brechas dos veículos do fluxo oposto (a brecha crítica para a manobra secundária); a brecha crítica é função da complexidade da decisão envolvida na avaliação da oportunidade de realização da manobra secundária e do tempo necessário para sua realização (sendo afetada por variáveis diversas como a necessidade de vigiar uma ou mais correntes de tráfego opostas, a extensão da área de conflito a ser vencida na manobra, a velocidade dos veículos nos fluxos opostos e o grau de impaciência dos usuários em espera);
- o intervalo mínimo requerido para a movimentação da fila de veículos da via secundária (o intervalo de seguimento), quando as brechas são suficientemente grandes para permitir a

realização de mais de uma manobra em seqüência (sendo afetada por fatores como a necessidade de vigiar uma ou mais correntes de tráfego opostas, a existência de intervisibilidade para os veículos em fila, as condições de escoamento de tráfego na via secundária, além do tempo para realização da manobra).

Os princípios e técnicas de canalização de tráfego são orientadas para obter as condições de admissibilidade da operação com fluxos conflitantes, com ou sem o apoio de semáforos.

Embora não exista um conjunto de princípios uniformemente recomendados (diversas fontes mencionam diversos aspectos similares mas acrescentam alguns outros aspectos peculiares), uma síntese dos pontos principais pode ser resumida em:

- definir claramente as trajetórias corretas e/ou mais adequadas: este é um princípio básico voltado à segurança viária, especialmente importante onde as interseções tem área ampla ou configuração não usual que possa trazer indecisão para os usuários da via e imprevisibilidade do seu curso na via para os demais usuários; a provisão de um número de faixas compatível com a demanda e a capacidade para as manobras acomodadas e o uso de uma disciplina adequada de compartilhamento das faixas, quando recomendável, é também um aspecto fundamental a ser observado;
- desencorajar fisicamente movimentos proibidos ou errôneos: este é um princípio básico voltado à segurança viária, especialmente importante onde existem mudanças no esquema de circulação ou são utilizados esquemas não usuais; manobras erráticas e inesperadas são especialmente preocupantes onde a velocidade é maior; intervenções deste tipo podem também ser importantes onde é necessário desencorajar usuários que não podem (como pedestres em locais perigosos) ou devem (como veículos pesados em vias locais) ser admitidos nos trechos considerados;
- garantir a simplicidade, conforto e segurança das manobras possíveis: delinear trajetórias simples, sem curvas obtusas (com ângulos maiores que 120°) ou reversas (em direções alternadas e pouco espaçadas), mantendo condições de visibilidade adequada para todas as aproximações e todos os movimentos existentes (incluindo as origens de potenciais manobras irregulares, intencionais ou não); em locais com maior demanda, deve-se cuidar de prover um número de faixas e uma configuração adequada para a operação adequada;
- buscar consistência entre geometria, prioridade e velocidade reais: este é um princípio básico voltado à segurança viária, que visa evitar uma comunicação dúbia com os usuários da via e, em decorrência disso, busca tornar mais clara e consistente a regulamentação do uso da via e menos provável a sua violação (intencional ou não); erros de percepção são especialmente preocupantes onde a velocidade é maior;
- dar visibilidade para a sinalização e as manobras conflitantes: este é um princípio básico voltado à segurança viária, que torna importante utilizar ilhas ou avanços de calçada para posicionar adequadamente os elementos de sinalização e/ou os veículos em espera, além de adotar configurações geométricas com cruzamentos retos e incorporações paralelas, fora de elementos curvos que dificultam a visibilidade;
- separar correntes de tráfego com velocidades diferentes: este é um princípio básico voltado à segurança viária, especialmente importante onde uma das correntes de tráfego que sai da via

Síntese dos princípios práticos de canalização de tráfego:

- definir claramente as trajetórias corretas e/ou mais adequadas;
- desencorajar fisicamente movimentos proibidos ou errôneos;
- garantir simplicidade, conforto e segurança das manobras possíveis;
- buscar consistência entre geometria, prioridade e velocidades reais;
- dar visibilidade para a sinalização e para as manobras conflitantes;
- separar correntes de tráfego com velocidades diferentes;
- eliminar pontos de conflito simultâneos e importantes;
- prover áreas de refúgio para manobras que tem ocorrer em etapas.

- tem de parar ou reduzir a velocidade significativamente ou uma das correntes de tráfego que entra na via tem velocidade significativamente mais alta ou mais baixa que o tráfego geral, recomendando o uso de faixas de transição;
- eliminar pontos com conflitos simultâneos e importantes: este é um princípio básico voltado à segurança viária, que visa simplificar a operação das interseções e facilitar o entendimento e a resolução dos conflitos pelos usuários, especialmente importante quando devem ser observados fluxos de vias e sentidos distintos (incluindo pedestres) e/ou em ângulos de aproximação desfavoráveis;
 - prover áreas de refúgio para manobras que precisam ocorrer em etapas: este é um princípio básico voltado à segurança viária, que deve permitir a simplificação das manobras abrigando convenientemente os usuários da via nas posições intermediárias, sem expô-los a perigos inesperados de colisão com usuários de etapas vencidas, cuidando especialmente de prover número e dimensões adequadas para as posições.

Embora essencialmente voltados à segurança viária, todos estes princípios tem importância para a capacidade e desempenho do tráfego. Usualmente, manobras mais simples exigem tempos de decisão e execução menores, o que torna relevante todos os princípios discutidos acima. No entanto, os dois últimos princípios são especialmente importantes para a operação de tráfego na operação sem semáforos (apontam, portanto, para as formas mais efetivas de intervenção para preservar a eficiência da sinalização de prioridade e adiar a semaforização).

As estratégias usualmente disponíveis para melhorar a capacidade da operação em interseções com sinalização de prioridade podem ser resumidas em:

- melhorar as condições da manobra secundária, aumentando raios de giro, removendo obstáculos à visibilidade ou reduzindo distâncias de percurso exposto a conflitos;
- prover 2 ou 3 faixas ou posições paralelas adicionais para permitir movimentos secundários simultâneos, determinando uma disciplina adequada no uso das faixas;
- restringir características dos movimentos prioritários que dificultam a realização da manobra secundária, como velocidade excessiva ou imprevisibilidade do uso de faixas;
- para as manobras de conversão à direita, considerar a possibilidade de prover faixas de entrada livre, canalizando o fluxo oposto para as faixas adjacentes, ou de aumentar o número de faixas na via principal (o mesmo tratamento pode ser considerado para as conversões à esquerda junto ao canteiro central ou em vias de sentido único);
- para as saídas à esquerda das vias principais, considerar a possibilidade de prover faixas de desaceleração e baías de acomodação para os veículos em espera para segregação das manobras secundárias do fluxo na via principal;
- para as manobras de cruzamento e conversão à esquerda da via secundária, considerar a possibilidade de decompor a realização da manobra em duas etapas, provendo uma posição intermediária de acomodação de filas temporárias no canteiro separador central ou um entrelaçamento à direita com incorporação em um retorno no canteiro central (gota) adiante;
- utilizar ilhas canalizadoras para organizar movimentos que compartilham a operação no canteiro central e dimensionar o número de vagas em cada posição para evitar o bloqueio ou interferência mútua; considerar a possibilidade de usar

Superposição com estratégias para melhorar operação com prioridade:

- melhorar condições para manobra secundária;
- prover 2 ou 3 faixas para permitir manobras secundárias simultâneas;
- restringir características (dos movimentos prioritários) que dificultam manobra secundária;
- para conversões à direita, prover faixas de entrada livre ou aumentar número de faixas na via principal (também para conversões à esquerda junto ao canteiro central ou em vias de mão única);
- para conversões à esquerda das vias principais, prover faixas de desaceleração e baías de conversão);
- para cruzamento e conversão à esquerda da via secundária, decompor em etapas provendo posição intermediária ou usando entrelaçamento e deslocamento;
- usar ilhas canalizadoras e dimensionar vagas no canteiro central (considerar uso de rotatórias);
- proibir manobras localmente (ou atrair demanda local), favorecendo rotas alternativas.

- rotatórias (ou rótulas com vias em mão-única);
- proibir localmente os movimentos secundários interferentes ou conflitantes (normalmente transferindo seu atendimento para interseções adjacentes) ou atração de parcela significativa dos fluxos principais ou secundários para rotas alternativas.

Como pode ser visto, boa parte destas estratégias superpõe-se com os princípios de canalização de tráfego e devem observá-los simultaneamente.

Deve-se observar que o projeto de interseções canalizadas é, ao mesmo tempo, uma arte e uma técnica exigentes. A necessidade de satisfazer diversos requisitos operacionais e de segurança pode, com facilidade, conduzir a configurações excessivamente complexas e de difícil entendimento pelos usuários da via. Por este motivo, a simplicidade deve sempre ser na seleção da configuração final a ser realmente implantada. Esta observação não deve, no entanto, fazer com que alternativas menos imediatas sejam consideradas e avaliadas de forma livre nas etapas de concepção inicial. A análise de capacidade e desempenho é, neste aspecto, um auxílio importante ao estabelecer os requisitos funcionais a serem atingidos pelo projeto.

Os requisitos do projeto geométrico adequado (especialmente larguras de pista e raios de curva ou, os gabaritos de curva, para trajetórias de baixa velocidade) são, em geral, bastante exigentes e, normalmente, as condições físicas existentes parecem limitar de forma importante as possibilidades reais de intervenção (o que efetivamente ocorre em muitos casos).

Entretanto, outras tantas vezes, concepções aparentemente inviáveis fisicamente podem ser implantadas com pequenas alterações físicas ou com a utilização de vias de apoio adjacentes e tratamentos de circulação adequados. Os requisitos funcionais (necessidade de número de faixas, conversões protegidas, decomposição das manobras), neste caso, permitem estabelecer o que se está buscando, enquanto as exigências geométricas e as restrições físicas locais permitem determinar onde os requisitos poderão ser satisfeitos.

O exercício proposto a seguir discute a aplicação prática destas estratégias de acomodação de movimentos conflitantes em interseções com sinalização de prioridade.

A semaforização é, naturalmente, a estratégia adicional a ser empregada quando outros fatores determinarem sua adoção ou todas as demais estratégias forem inadequadas. E o recurso à semaforização em geral inverte a lógica da intervenção nas interseções não semaforizadas: os movimentos mais complexos passam a ser proibidos nas interseções secundárias e são direcionados às interseções semaforizadas (onde seu atendimento pode ser diretamente acomodado no plano semafórico adotado ou combinado com a proibição local de movimentos conflituosos, particularmente das conversões à esquerda difíceis de acomodar, e de tratamentos de circulação que transferem estas demandas a outras vias em que é mais fácil atendê-las).

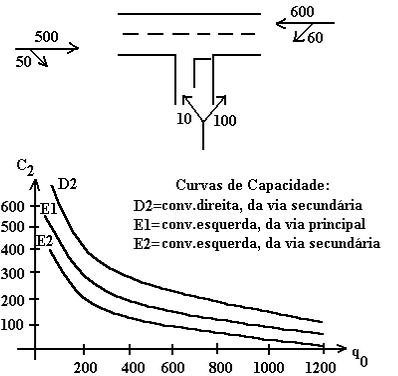
O ponto importante é determinar os requisitos funcionais para acomodar adequadamente a demanda existente e somente depois buscar alternativas físicas capaz de satisfazê-los (tendo uma visão bastante ampla das opções). Qualquer intervenção adequada, antes de ser viável, tem de ser efetiva.

EXERCÍCIO PROPOSTO: Interseção com Sinalização de Prioridade (R1 ou R2)

Considere a interseção esquematizada ao lado e as curvas de capacidade correspondentes às manobras secundárias existentes com sinalização de prioridade (R1-PARE ou R2-DÊ PREFERÊNCIA).

a) Avalie o impacto do aumento das conversões à esquerda da via secundária para 50v/h ou 150v/h e as alternativas possíveis para acomodar este aumento sem recurso à semaforização.

b) Qual seria o critério para selecionar a sinalização de prioridade (R1 ou R2)?

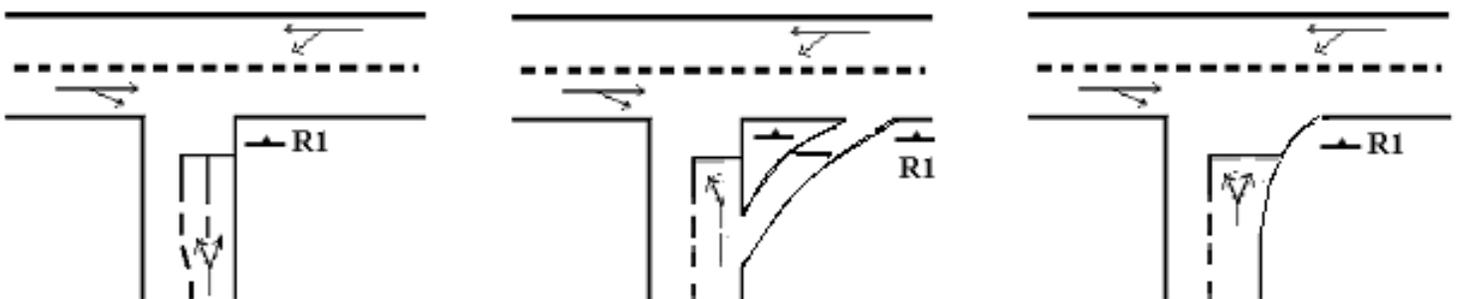


SOLUÇÃO DO EXERCÍCIO: Interseção com Sinalização de Prioridade (R1 ou R2)

a) No exemplo considerado, tanto o alinhamento da via quanto a magnitude dos fluxos, torna natural a definição de prioridade estabelecida na sinalização viária esquematizada apresentada acima. Portanto, o controle de tráfego adequado depende basicamente de obter condições adequadas de capacidade para as manobras secundárias.

Para a manobra secundária de conversão à esquerda da via principal (E1), o fluxo oposto foi avaliado em 550v/h (uma conversão à esquerda com fluxo oposto, do sentido oposto na via principal) e, na curva de capacidade E1, a capacidade para a manobra secundária de conversão à esquerda na via principal foi estimada em cerca de 180v/h, satisfatória para atender à demanda de 60v/h ($X=33\%$). No entanto, deve-se prever atrasos médios na espera para fazer a manobra e um conflito frequente com o fluxo em frente no seu sentido de tráfego (600v/h), que podem ser estimados com os modelos de análise anteriormente formulados para fluxo descontínuo com sinalização de prioridade (mesmo ponderando o alinhamento reto que favorece a intervisibilidade, seria conveniente pelo menos ter uma baia de conversão à esquerda com transição adequada para acomodar a fila de espera na conversão à esquerda). A interferência da manobra secundária de conversão à esquerda da via principal (E1) no fluxo direto principal da mesma aproximação é um aspecto complementar a avaliar. Na ausência de velocidades excessivas e restrições de visibilidade que comprometeriam a segurança viária, a interferência seria o atraso gerado no fluxo principal.

Na via secundária há duas manobras secundárias (a conversão à direita e a conversão à esquerda) compartilhando uma única faixa. Para a conversão à direita (D2), o fluxo oposto foi avaliado em 500v/h e a capacidade na curva D2 foi estimada em cerca de 300v/h (também $X=33\%$). Para a conversão à esquerda (E2), o fluxo oposto foi avaliado em cerca de 1160v/h e a capacidade na curva E2 foi estimada como muito baixa (cerca de 20v/h e X maior que 50%). Com uma única faixa na via secundária, haveria uma situação inadequada ($X=83\%$ e capacidade de 132v/h). Com duas faixas na via secundária, a demanda poderia ser atendida mas as filas e atrasos seriam provavelmente significativos, exceto se a duração do período de pico considerado fosse muito pequena. Mesmo que existam boas condições de intervisibilidade (ausência de obstruções à visibilidade da via secundária), os problemas de segurança na manobra de conversão à esquerda são previsíveis. A estratégia emergencial seria implantar redutores de velocidade na via principal (que favorece a capacidade na via secundária e torna os problemas de segurança previstos menos graves). A implantação de 2 faixas na aproximação secundária exige espaço (cerca de 10m, mantendo a faixa no sentido oposto, sem estacionamento; cerca de 15m com estacionamento em ambos os lados). A proibição de estacionamento existente na aproximação secundária numa extensão relevante é a opção mais simples para obter a largura suficiente para acomodar a faixa adicional (em geral, quando factível, adota-se a proibição numa extensão da ordem de 2 vezes a extensão ocupada pela fila média prevista na aproximação). Outra opção de baixo custo, eventualmente menos eficaz em termos de fluidez mas melhor para a segurança viária, é a implantação da faixa adicional apenas para a conversão à direita, também de extensão adequada (eventualmente o alargamento local da aproximação pode ser suficiente quando a deficiência de capacidade é pequena, embora pior para a segurança viária).



Se as restrições locais excluïrem o aumento do número de faixas na via secundária e o uso de redutores de velocidade na via principal das estratégias potencialmente efetivas, pode-se considerar a transformação da via secundária, no trecho considerado, com ambas as faixas em mão única (com outra via secundária em binário). Em geral, as restrições de circulação decorrem de deficiências desta natureza (de capacidade ou de espaço viário).

Embora possam ser adotadas localmente apenas, estratégias de intervenção baseadas em alterações de circulação (implantação de vias de mão-única e/ou proibição de conversões em interseções) em geral devem ser concebidas e implantadas com uma análise e uma escala mais ampla, envolvendo diversas quadras ou toda uma área (como nas áreas centrais de cidades menores ou de núcleos principais de cidades maiores) porque normalmente afetam mais interseções e tem grande impacto sobre as atividades locais. Estes aspectos são discutidos mais adiante.

Com o crescimento da demanda de conversões à esquerda para 50v/h ou 150v/h, o problema seria ainda maior e este é o contexto a ser examinado. A avaliação de alternativas teria de utilizar os métodos de análise de capacidade para reavaliar as curvas de capacidade correspondentes à cada manobra. A avaliação qualitativa feita a seguir visa somente verificar se estas estratégias atendem aos requisitos funcionais e discutir a viabilidade das intervenções.

Com demandas maiores deve-se considerar a decomposição da conversão à esquerda em etapas. Essa intervenção novamente exige espaço (agora na via principal) para acomodar um canteiro central capaz de armazenar veículos e/ou a transformação da via principal, no trecho considerado, em mão única (com outra via principal em binário). O espaço existente na via principal (largura de pelo menos 10m) é uma restrição física para implantar um refúgio adequado, acomodar a fila intermediária da conversão à esquerda da via secundária e reduzir a interferência potencial com a conversão à esquerda da via principal. Senão as opções de mudança de circulação seriam as únicas intervenções viáveis e efetivas (naturalmente, exigiriam vias adequadas para transição e para o sentido oposto).



As posições intermediárias na via principal podem ser sinalizadas como faixa auxiliar (especialmente quando combinadas com faixas anteriores de desaceleração e/ou baias de conversão à esquerda) ou como interseções intermediárias no canteiro central (neste caso podem ter ilhas separadoras dos fluxos opostos no canteiro). Se há espaço suficiente, a segunda opção pode ser transformada em uma rotatória de pequeno diâmetro, mantendo a sinalização de prioridade para a via principal (como uma rotatória não convencional). Eventualmente, a opção pode ser implantada adotando a regra geral de prioridade para o fluxo circulante (como uma rotatória convencional).

Como o espaço disponível para intervenções pode ser difícil de obter com pequenas desapropriações, agora os tratamentos de circulação são provavelmente mais justificáveis (dada a deficiência maior de capacidade que se traduz em níveis de congestionamento muito maiores). A avaliação global, além de ponderar a redução de congestionamento contra os trajetos adicionais de circuitação introduzidos, devem ponderar aspectos mais amplos em termos urbanísticos (impacto ambiental e suporte às atividades locais) e de segurança viária (em especial para pedestres). Não se deve deixar de considerar opções alternativas capazes de atrair a demanda que utiliza um local crítico e, desta forma, reduzir seus problemas. Nas áreas centrais ou adensadas, deve-se avaliar opções que desviam o tráfego de passagem por vias alternativas ou anéis de circulação (rótulas/contra-rótulas ou anéis perimetrais).

Em ambos os casos, são opções estruturais que devem ser avaliados diante de visões claras de futuro para a área.

b) A seleção do tipo de controle de tráfego para a via secundária não utiliza nenhum dos critérios discutidos no item anterior (na verdade, alguns métodos de análise de capacidade admitem a influencia do tipo de sinalização utilizado na via secundária mas esta suposição é discutível e o efeito admitido é, em geral, reduzido). Esta definição deve considerar estritamente aspectos de segurança (decorrente da intervisibilidade e da velocidade na incorporação) que devem ser satisfeitos mesmo em períodos de tráfego reduzido para justificar o tratamento mais permissivo (R2) ou será necessário aplicar a forma mais restritiva (R1, ampliando a intervisibilidade e/ou limitando a velocidade local).

4.6. PRINCÍPIOS DE SEMAFORIZAÇÃO EM INTERSEÇÕES.

Para implantar a semaforização deve-se definir o plano semafórico, o tipo de controle e a programação semafórica. Como já discutido, a semaforização implementa a estratégia de separação dos conflitos no tempo, através da definição de períodos sucessivos em que o direito de uso da via é alternadamente cedidos a grupos de movimentos distintos, em cada período compatíveis entre si ou com conflitos admissíveis (os demais movimentos são, então, temporariamente bloqueados).

Semáforo é a denominação genérica para o conjunto de equipamentos e dispositivos utilizados (necessários) para operar uma interseção semaforizada, controlando sua área de conflito. Este conjunto é constituído, pelo menos, de grupos focais (conjuntos de luzes que exibem a sequência completa de indicações luminosas a serem exibidas para um determinado grupo de movimentos) e de um controlador semafórico (um equipamento eletrônico ou eletromecânico, alimentado pela rede elétrica geral ou por baterias próprias, que supervisiona as indicações luminosas exibidas simultaneamente a todos os grupos focais controlados).

Cada movimento controlado pelo semáforo recebe uma sequência de indicações luminosas, através do grupo focal que o controla, para veículos correspondente aos tempos de:

- vermelho, durante o qual a sua operação está momentaneamente bloqueada;
- verde, durante o qual a sua operação pode ocorrer normalmente;
- amarelo, para veículos, que anuncia o término próximo do verde e deve permitir a conclusão da passagem pela linha de retenção dos veículos que não teriam condição de parar;
- piscante, para pedestres, que inicia o período em que não se deve iniciar a travessia mas deve permitir sua conclusão.

Esta sequência exibida para um dado grupo de movimentos não revela, no entanto, a natureza da operação semafórica. Particularmente, os tempos de vermelho exibidos a um dado grupo de movimentos são determinados pelos tempos de verde dos demais grupos de movimentos e há intervalos importantes na transição entre verdes.

Cada período de tempo em que o conjunto de movimentos autorizados não se altera é um Estágio Semafórico. Normalmente, estes períodos sucessivos são programados para repetirem-se ordenadamente (embora alguns períodos possam ser opcionais). Cada repetição completa da sequência programada constitui um ciclo semafórico. Todos os movimentos não proibidos devem operar em pelo menos um estágio dentro do ciclo semafórico. Alguns movimentos podem operar em mais de um estágio semafórico.

Entre os tempos de verde de estágios semafóricos sucessivos existem períodos de transição englobados nos Tempos de Entreverdes, que devem permitir o término seguro dos movimentos que deixam de operar no estágio anterior e o início seguro dos movimentos que passam a operar no estágio seguinte. Cada tempo de entreverde é composto de intervalos de amarelo e vermelho de segurança, destinados a proporcionar a transição segura.

A sequência de estágios semafóricos na interseção (verdes e entreverdes) é que revela a alternância no direito de uso da via para os

Semáforo é o conjunto de equipamentos e dispositivos utilizados para controlar a área de conflito de uma interseção, constituindo-se de:

- grupos focais (conjunto de luzes que exibem a sequência completa de indicações luminosas: vermelho, verde, amarelo para veículos; vermelho, verde, piscante para pedestres);
- controlador semafórico (equipamento que controla a exibição dos tempos semafóricos e sua variação durante a operação, entre outras funções gerais);
- outros dispositivos (como anteparos, sonorizadores, detectores/contadores de tráfego, dispositivos de fiscalização eletrônica, ...).

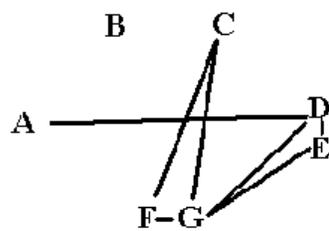
A unidade de operação semafórica é o Estágio Semafórico (cada período de tempo em que o conjunto de movimentos autorizados não se altera). Cada estágio tem a duração constituída pelo seu tempo de verde e pelos intervalos de Entreverdes na transição para o estágio seguinte. Normalmente os estágios repetem-se de forma ordenada (mesmo que alguns sejam opcionais). A sequência completa de estágios constitui um ciclo semafórico. Todos os movimentos existentes (não proibidos) devem operar em pelo menos um estágio. A unidade de controle semafórico é o Grupo Semafórico (conjunto de movimentos que recebe a mesma sequência de indicações luminosas). A unidade de análise semafórica é o Grupo de Tráfego (conjunto de movimentos de uma mesma aproximação que recebe a mesma sequência de indicações luminosas) ou o Grupo de Faixas de Tráfego (se há grupos de tráfego que compartilham as mesmas faixas e interagem entre si).

diferentes grupos de movimentos que implementa a separação de conflitos no tempo. Entre diferentes estágios semaforicos, pelo menos um movimento deve ter sua condição alterada de bloqueado ou autorizado. Cada conjunto de movimentos que recebe no semáforo a mesma sequência de indicações luminosas é um Grupo Semaforico. A unidade de controle semaforico é o grupo semaforico (movimentos que pertencem a um mesmo grupo semaforico não precisam ser distinguidos pelo equipamento de controle, o controlador semaforico).

Cada conjunto de movimentos de uma dada aproximação que recebe a mesma sequência de indicações luminosas é considerado um Grupo de Tráfego. Uma aproximação pode ter mais de um grupo de tráfego, se for necessário diferenciar o tratamento dado a algum dos seus movimentos (em particular, as conversões). Em geral, a unidade de análise da interseção semaforizada é o grupo de tráfego. Em alguns casos, a interação entre os grupos de tráfego que operam paralelamente numa aproximação é muito grande, sendo artificial distinguir cada grupo de tráfego individual. Neste caso, a unidade de análise pode passar a ser um Grupo de Faixas de Tráfego que são compartilhadas pelos grupos de tráfego que interagem na aproximação. Em geral, a análise pode optar por utilizar grupos de tráfego ou grupos de faixas de tráfego mas sempre considerando a operação e a interação entre eles.

4.6.1. Definição dos Planos Semaforicos

O problema básico inicial da semaforização é o de definir um plano semaforico (o melhor agrupamento de movimentos em estágios e a melhor sequência de cessão do direito de uso da via ao longo do ciclo semaforico), representado no diagrama de estágios do semáforo. Todo movimento não proibido na interseção semaforizada deve ser autorizado em algum período do plano de operação semaforico definido. Cada grupo de movimentos que opera simultaneamente deve ser concordante (ou, pelo menos, ter um grau de conflito admissível). Nenhum movimento concordante com os movimentos autorizados deve ser bloqueado (a única razão para bloquear a operação de um movimento em um estágio deve ser a incompatibilidade, ou inadmissibilidade do conflito, com algum movimento autorizado).



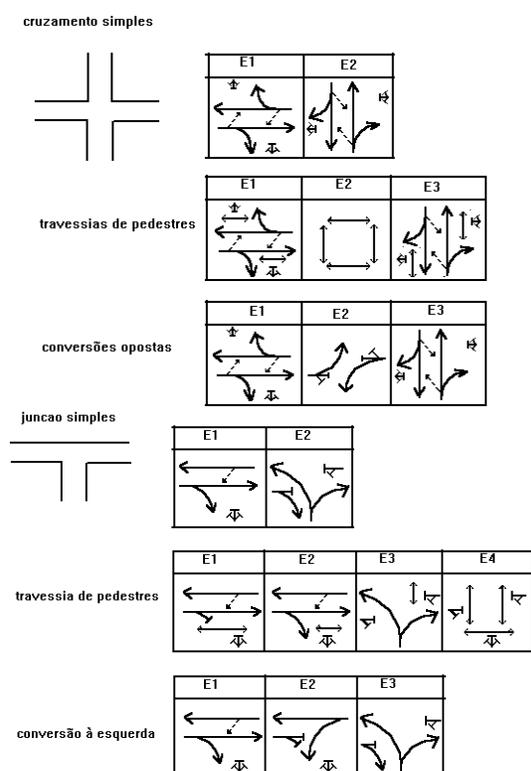
A análise para seleção de um plano semaforico, pelo menos para os casos menos usuais, é baseada na construção de um diagrama de movimentos concordantes. A concordância entre cada par de movimentos é representada e os grupos de movimentos mutuamente compatíveis podem ser claramente identificados.

Identificados os movimentos compatíveis (e incompatíveis), o plano de operação semaforico pode normalmente ser determinado a partir de alguns princípios simples:

- o número de estágios deve ser o menor possível para atender todos os movimentos relevantes da interseção semaforizada;
- em cada período, o número de movimentos compatíveis ou admissíveis autorizados simultaneamente deve ser o maior possível; nenhum movimento deve ser bloqueado se não for incompatível com pelo menos um movimento autorizado;
- utilizando-se mais de 2 estágios, os movimentos mais importantes devem ser autorizados no maior número de períodos possível;

Problema básico inicial da semaforização: definir um plano semaforico (o melhor agrupamento de movimentos em estágios e a melhor sequência de estágios no ciclo semaforico), representado no diagrama de estágios, através da análise do diagrama de movimentos concordantes (ou admissíveis). Para casos comuns, existem planos usuais conhecidos e as questões principais são o tratamento das conversões à esquerda e das travessias de pedestres..

- deve-se introduzir estágios específicos para as conversões à esquerda apenas quando o fluxo de conversões ou seu fluxo oposto tornarem sua operação permitida inadequada;
- deve-se introduzir estágios específicos para as travessias de pedestres apenas quando o fluxo de pedestres ou seu fluxo oposto tornarem sua operação permitida inadequada;
- a ordem dos estágios deve ser a que proporciona maior segurança e rendimento para a interseção como um todo; grupos de movimentos que podem operar produtivamente em estágios sucessivos, seqüências de grupos de movimentos que permitem adotar tempos de entreverdes reduzidos, seqüências de períodos que permitem dar maior produtividade à operação, todas são circunstâncias favoráveis que devem ser buscadas;
- as proibições locais de movimentos (em especial das conversões à esquerda) devem ser decididas quando for impossível acomodá-las adequadamente na interseção e for possível proporcionar outros locais apropriados para os movimentos ou trajetos alternativos satisfatórios para os deslocamentos locais do corredor ou área considerada (rotas paralelas podem ser adequadas para os demais deslocamentos);
- o deslocamento da demanda para outras interseções, oferecendo opções mais atrativas, deve também ser considerada como alternativa às restrições locais.

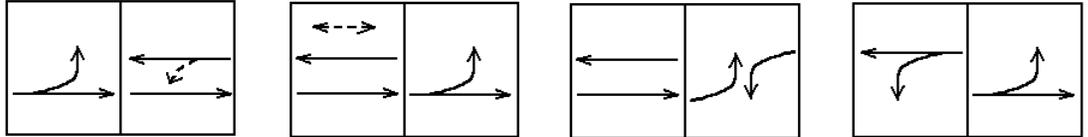


O plano semaforico é representado pelos Diagramas de Estágios, em que são representadas a sequência de estágios e os movimentos autorizados (ou não) em cada estágio, eventualmente distinguindo os movimentos protegidos (traço normal) e permitidos (tracejado). Os movimentos veiculares são representados com setas unidirecionais e os movimentos de pedestres são representados com setas bidirecionais. Apenas os movimentos controlados pelo semáforo são representados no diagrama de estágio (embora a análise e o dimensionamento devam considerar todos os movimentos existentes na interseção). Por exemplo, se o diagrama de estágios não representa os movimentos de pedestres, deve-se entender que o equipamento semaforico não controla especificamente os movimentos de pedestres (isto é, não utiliza e não controla grupos focais específicos de pedestres).

Normalmente, pelo menos em interseções usuais, as principais questões a discutir são as referentes ao tratamento a ser oferecido para as conversões à esquerda. O tratamento das travessias de pedestres é uma questão similar, ainda mais importante em países como o Brasil (onde o respeito às normas legais que protegem os pedestres não é regra geral).

Quando as demandas correspondentes às conversões à esquerda são reduzidas e seus respectivos fluxos opostos oferecem brechas adequadas, elas podem ser tratadas como movimentos permitidos (autorizados nas brechas dos fluxos preferenciais diretos, no sentido oposto simultâneo, aos quais devem ceder preferência). A discussão feita no item seguinte, sobre dimensionamento de semáforos, permitirá determinar quando esta condição ocorre.

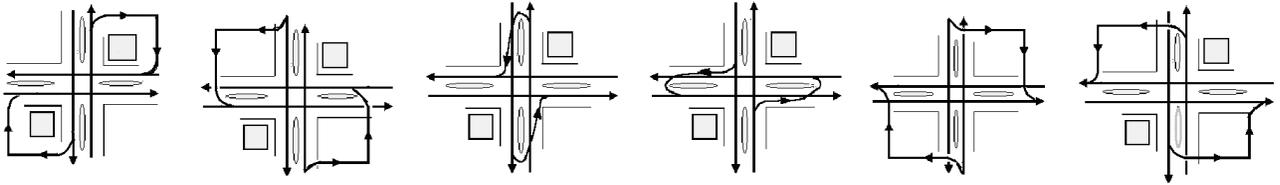
Nas demais situações deve-se decidir entre prover estágios com conversões à esquerda protegidas ou proibir localmente as conversões à esquerda (e oferecer uma rota alternativa para seu movimento).



As formas alternativas usuais para prover estágios com conversões à esquerda protegidas são:

- a proteção das conversões à esquerda dominantes com conversões antecipadas ou postergadas em relação ao fluxo oposto direto, superpostas cada um com o fluxo direto dominante (que opera em ambos os estágios); este é o esquema mais usual quando as vias interceptantes tem sentido único de circulação; as vantagens e desvantagens usualmente mencionadas de cada uma destas opções são as seguintes:
 - as conversões antecipadas permitem limpar a fila de veículos em espera para conversões no início do movimento na aproximação, evitando o bloqueio do fluxo direto e aproveitando a reação normalmente mais rápida dos condutores em conversão; opera adequadamente com a conversão à esquerda permitida no fluxo oposto, que pode passar pela interseção no entreverde do seu estágio; pode gerar problemas de segurança com as travessias de pedestres paralelas; a parada do fluxo direto e das conversões em estágios distintos também pode gerar problemas de segurança nos locais onde as baías de conversão tem capacidade insuficiente e/ou as velocidades dos fluxos diretos são elevadas;
 - as conversões postergadas são compatíveis com a experiência usual dos condutores no início do estágio por iniciar ambos os fluxos diretos simultaneamente e evita conflitos das conversões protegidas com as travessias de pedestres paralelas (que ocorrem com os fluxos diretos); pode gerar armadilhas para as conversões permitidas do fluxo oposto que tentam usar o entreverde para passar, dado que o fluxo oposto continua operando;
- a proteção das conversões à esquerda em ambos os sentidos da via principal pode combinar ambos os esquemas (antecipando as conversões em um sentido e postergando as conversões do outro sentido); existem, no entanto, duas opções:
 - estágios com conversões à esquerda opostas simultâneas, em ambos os sentidos, separadas do estágio em que operam os fluxos diretos, também simultaneamente (o que exige baías para as conversões à esquerda, visto que os fluxos diretos e as conversões de cada aproximação operam em momentos diferentes); o uso de ilhas separadoras das faixas diretas e de conversão é também recomendada por prover um espaço de armazenamento para as travessias de pedestres; esta é uma alternativa vantajosa quando os fluxos diretos e as conversões são, cada par, equilibrados entre os sentidos opostos;
 - estágios segregados para as aproximações opostas, com movimentos simultâneos dos fluxos diretos e conversões à esquerda de cada aproximação em estágios distintos; esta é uma alternativa vantajosa quando as demandas nas aproximações opostas são desequilibradas ou a falta de baías de conversão

prejudicam de forma significativa o rendimento em cada aproximação.



As opções usuais para prover rotas alternativas locais para conversões proibidas são:

- uso de contornos de quadra por vias paralelas à que conduz os veículos que demandam as conversões à esquerda são os tratamentos mais usuais (embora não sejam em geral os melhores) onde existe um reticulado de vias paralelas em ambos os sentidos, podendo ser:
 - após o cruzamento, utilizando somente conversões à direita mas gerando maior circuitação e fazendo com que os veículos que demandam as conversões à esquerda passem pela interseção duas vezes;
 - antes do cruzamento, utilizando uma conversão à direita e uma conversão à esquerda no retorno ao corredor na via transversal por uma via paralela (favorecida, portanto, quando esta via tem sentido único e sua interseção já é semaforizada); nas vias paralelas, também tem de ser realizada uma conversão à esquerda;
- uso de retornos localizados nos canteiros centrais das vias que se cruzam, trazendo opções interessantes quando o sistema viário adjacente é inadequado mas exigindo que os canteiros centrais sejam bastante largos ou possa-se proibir o estacionamento a partir dos pontos de retorno, além de forçar que os veículos que demandam as conversões à esquerda passem duas vezes pela interseção, podendo-se utilizar:
 - retorno na própria via, seguindo adiante e convergindo à direita após o retorno, gerando a necessidade de cruzar o fluxo direto oposto após o retorno;
 - na via transversal, convergindo à direita e seguindo adiante após o retorno, gerando a necessidade de cruzar a via transversal em condições favoráveis (visto que o seu fluxo está bloqueado durante a conversão à direita); o movimento de retorno pode também receber uma faixa de entrada livre (que o fluxo seguirá em frente);
- uso de saídas antecipadas, com conversões à esquerda na saída da via original e no retorno à via transversal, trazendo a vantagem de eliminar a passagem dos veículos que demandam as conversões à esquerda pela interseção original e de não produzir trajetos adicionais de circuitação (as distâncias percorridas nas vias paralelas correspondem às que seriam percorridas nas vias originais); é uma alternativa vantajosa quando as interseções de saída da via original e de retorno à via transversal possuem capacidade adequada para acomodar as conversões à esquerda com segurança; as saídas à esquerda, em particular, podem ocorrer operando paralelamente ao estágio da operação da via transversal;
- uso do contorno paralelo, com a saída à esquerda após passar adiante no cruzamento original e retorno à direita para a via transversal; apesar de não forçar que os veículos que demandam as conversões à esquerda passem duas vezes pelo cruzamento, esta é uma das opções que geram maior circuitação e que estão entre as menos favoráveis se não existirem condições especiais para as saídas à esquerda após o

cruzamento; nas vias paralelas, também tem de ser realizada uma conversão à esquerda.

Naturalmente, cada uma das conversões à esquerda pode receber um tratamento específico. Esta opção é especialmente adequada quando são usadas vias adjacentes, visto que as intervenções podem estar gerando tráfego de passagem em vias originalmente locais. É fácil ver, por exemplo, que a opção de retorno pela via transversal para uma dada via pode ser também utilizada como retorno na própria via para as conversões à esquerda originadas das suas vias transversais.

A avaliação destas opções de tratamentos normalmente tem de considerar o impacto nas vias adjacentes e na operação dos cruzamentos crítico e adjacentes afetados pelas intervenções, seguindo os esquemas usuais de comparação de alternativas.

O tratamento das conversões à direita é bastante mais simples e resume-se à discussão da possibilidade e conveniência de canalizar estes movimentos. Neste caso, na ausência de movimentos de pedestres importantes, pode-se normalmente retirar as conversões do controle semafórico quando for seguro substituí-lo por uma simples sinalização de prioridade. A proibição das conversões à direita, por sua vez, é bastante mais difícil e tem de ser transformada em opções de atração dos movimentos correspondentes para rotas alternativas antes do semáforo, em contornos de quadra por vias paralelas (o que corresponde, funcionalmente, à opção de canalizar o movimento à direita e retirá-lo do semáforo).

Com referência ao tratamento das travessias de pedestres, as circunstâncias são bastante mais delicadas e as práticas existentes são menos claras e consolidadas. Por este motivo, parece oportuno advertir o Engenheiro de Tráfego para examinar cuidadosamente as práticas locais e buscar aprimorá-las de forma prudente e consistente com a segurança dos pedestres, considerando o comportamento efetivo de condutores e pedestres nas situações reais de conflito.

Quando as demandas correspondentes às travessias de pedestres são reduzidas e os as conversões (à direita e à esquerda) dos respectivos fluxos diretos oferecem brechas adequadas, os pedestres podem normalmente ser autorizados junto com os fluxos diretos e de conversões e controlados pelo semáforo veicular (pelo menos quando a intervisibilidade for adequada e as velocidades nas conversões não forem excessivas). Na ausência de grupos focais específicos para pedestres, entende-se que as travessias de pedestres são autorizadas junto com os fluxos diretos correspondentes e, legalmente, tem faixas de pedestres). Infelizmente, a fragilidade do pedestre como usuário vulnerável da via e o grau inadequado de respeito à preferência dos pedestres torna importante verificar sua operação como se as travessias de pedestres fossem movimentos permitidos (que ocorreriam nas brechas dos fluxos de conversão paralelos, em relação aos quais deveriam ter preferência). A preferência dos pedestres somente pode ser considerada suficiente para sua segurança em circunstâncias específicas (onde as conversões tem velocidade reduzida e o pedestre tem vantagem relevante na travessia diante da conversão, por exemplo, pela existência de faixa de travessia elevada e raio de curva restrito).

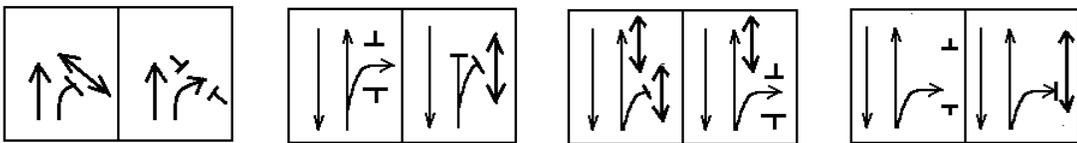
Este tipo de tratamento corresponde aos estágios com travessias de pedestres concorrentes (com fluxos veiculares de conversão) e é a regra implícita sempre que não são usados estágios específicos para proteção dos pedestres (e grupos focais específicos para pedestres).

Sempre que esta situação for insegura para os pedestres, é necessário adotar algum tratamento que segregue os tempos de pedestres (em que efetivamente as travessias de pedestres são protegidas). A dificuldade básica de adotar este tipo de tratamento de proteção ao pedestre decorre do impacto significativo na capacidade para o tráfego veicular (por este motivo, em geral, busca-se a alternativa que atende aos pedestres com o menor impacto na fluidez do tráfego veicular).

Em princípio, grupos focais específicos para pedestres são necessários sempre que deve ser comunicada aos pedestres uma regra distinta da travessia paralela concorrente (embora possam ser usados também quando vale a regra implícita), como na existência de um estágio específico de travessia. No entanto, existem variações no critério de utilização de grupos focais (podem ser recomendados apenas quando o fluxo de pedestres justifica e/ou quando há estágio para travessia de pedestres sem conflito veicular).

Na ausência de preocupações relevantes sobre o impacto no tráfego veicular, todas as travessias de pedestres podem ser atendidas utilizando estágios gerais de travessia de pedestres com duração adequada. No Brasil, em geral, os estágios gerais de travessias são dimensionadas pelas travessias paralelas críticas (o que quer dizer que travessias entre esquinas opostas deverão ocorrer em dois ciclos semaforicos distintos). Não é habitual autorizar travessias diagonais embora tal alternativa possa ser sinalizada (usando faixas de pedestres entre esquinas opostas) e praticada pelos pedestres (como pode ocorrer). E, em geral, varia a regra de posicionamento do estágio geral de travessia de pedestres no ciclo (há cidades que preferem o estágio geral de pedestres após o estágio da via principal, mais longo, e outras que preferem após o estágio da via secundária, mais lento).

Embora os estágios gerais de travessia de pedestres possam gerar atraso significativo para alguns movimentos de pedestres, em geral todos os outros tratamentos são introduzidos para reduzir o impacto na capacidade para o tráfego veicular.



A situação mais favorável ocorre quando há ilhas de canalização para conversão à direita e estas manobras não são dominantes nas aproximações. Neste caso, estágios (parciais) para travessia de pedestres podem ser introduzidos durante os estágios veiculares paralelos (em geral no início e/ou no final do estágio veicular) e são normalmente controlados por grupos focais de pedestres, quando for efetivamente necessário (isto é, não é segura a operação concorrente).

Na ausência de ilhas de canalização, os estágios de pedestres antecipados ou postergados também podem ser utilizados, especialmente quando as conversões tem velocidades reduzidas ou vantagens na travessia mas o tratamento é menos eficaz em termos de segurança dos pedestres, especialmente quando a visibilidade dos grupos focais específicos para as conversões é difícil. Neste caso, o tratamento usualmente mais eficaz é a introdução de um estágio de pedestres antecipando o final do estágio veicular com a conversão (tanto os movimentos diretos quanto os de conversão). Esta opção é melhor do que retardar o início do estágio veicular mencionado quando o sentido oposto da via seria também iniciado (eventualmente os motoristas movem-se em função do movimento oposto simultâneo).

Quando as conversões são manobras dominantes ou fortes (ou eventualmente o único fluxo veicular controlado), os tratamentos seguros normalmente tem de optar também pelo deslocamento do local na interseção das travessias de pedestres. O melhor tratamento em geral depende da existência de canteiro central e da existência de sentido único ou duplo na via a ser atravessada pelos pedestres. Se predominam desejos de travessia de pedestres de meio de quadra, a melhor opção é o deslocamento total da travessia de pedestres semaforizada para um local deslocado (idealmente pelo menos 50m) do início e/ou término de cada trecho viário com conversões fortes, permitindo um estágio de pedestres paralelo ao da via transversal. Se as predominam desejos de travessia de pedestres ao longo da via transversal e há um canteiro central com largura suficiente, pode-se usar uma travessia desalinhada (Z ou baioneta) sem mover a travessia na linha de retenção (apenas a travessia de saída é deslocada). Embora aumente o atraso dos pedestres pelo deslocamento e pela necessidade de atravessar cada lado em um ciclo distinto, os tempos de pedestres são reduzidos à meia travessia e os ciclos são também reduzidos.

Estes esquemas aplicam-se claramente quando o conflito ocorre com a conversão à direita forte mas também aplicam-se, na maior parte, quando há uma conversão à esquerda forte em via de mão única. No entanto, quando o conflito refere-se a uma travessia de pedestres e uma conversão à esquerda que opera em um estágio protegido ou permitido (em uma via de mão dupla), a situação é mais complexa (e inusitada) tanto para o condutor quanto para o pedestre. Embora normalmente possa-se evitar um estágio de pedestres concorrente com as conversões à esquerda, este caso está entre os que podem gerar situações inseguras mesmo quando há focos específicos para pedestres (gera uma situação em que, sem observar a conversão à esquerda, supostamente há brechas para o pedestre mas há um veículo chegando em velocidade).

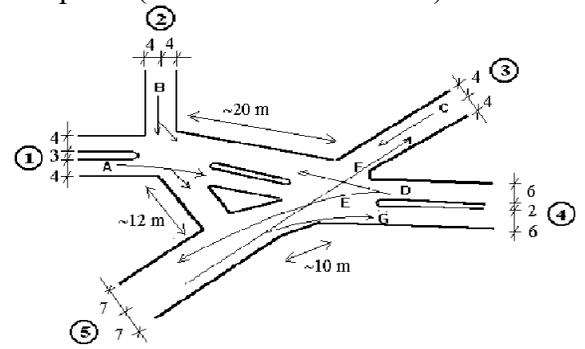
Ainda mais complexas para os pedestres são as situações em vias de mão dupla, ou mesmo aproximações de mão única, quando há grupos de tráfego veiculares que operam em períodos distintos. Como regra geral, deve-se preferir situações em que cada etapa de travessia de pedestre deve ter fluxos veiculares com um controle simples e em que cada fluxo veicular com tratamento distinto tenha um refúgio (canteiro ou ilha) que provoca descontinuidade da travessia. A mesma preocupação aplica-se ao caso em que a travessia de pedestres tem um tratamento específico em cada etapa da travessia. Como regra geral, etapas de travessias que não são contínuas no tempo (isto é, no mesmo período) não devem ser contínuas no espaço (isto é, alinhadas).

Por outro lado, deve-se também observar a baixa obediência dos pedestres aos focos específicos de pedestres (e mesmo ao uso dos estágios veiculares paralelos quando não há focos de pedestres). Em geral, deve-se sempre supor e avaliar a segurança de situações em que os pedestres tenham brechas eventuais para travessia (mesmo irregulares pela falta de faixa de pedestres ou pela indicação vermelha do foco específico de pedestre) e usar dispositivos de obstrução e canalização dos fluxos de pedestres (grades, com obstrução visual, ou gradis, com intervisibilidade) se ocorrerem em situações inseguras.

EXERCÍCIO PROPOSTO: Plano Semafórico em Interseção Complexa (Webster&Cobbe/1966)

Definir o plano semafórico adequado para operar a interseção esquematizada ao lado, de forma a acomodar os movimentos identificados por A a G.

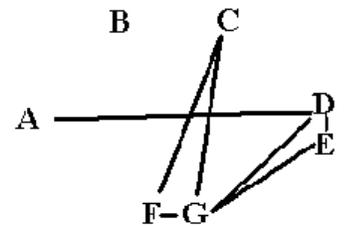
Discuta a alteração no plano semafórico decorrente do crescimento da demanda na interseção, considerando a opção de decomposição da interseção, pela introdução de linhas de retenção intermediárias, internas ao trecho da via principal e os aspectos críticos gerados.



SOLUÇÃO DO EXERCÍCIO: Plano Semafórico em Interseção Complexa

A primeira observação importante é que, na ausência de linhas de retenção intermediárias, cada movimento que entra na interseção deve ter possibilidade de completar seu deslocamento sem parar na interseção. Neste caso, a interseção é considerada simples ao invés de composta (em que a interseção é decomposta em sub-interseções). A segunda observação importante é que a denominação dos movimentos A a G já incorpora dois tipos de julgamentos relevantes sobre os movimentos que devem ser atendidos na interseção semaforizada (por sua magnitude e por não haver opções interessantes para sua proibição local e desvio para rotas alternativas) e sobre os movimentos que devem ser atendidos conjuntamente (por operarem na mesma interseção sem poderem ser distinguidos, usualmente por haver uma única faixa de tráfego para ambos os movimentos e haver uma probabilidade razoável de bloqueio entre eles).

Considerando estas definições, o diagrama de movimentos concordantes é construído examinando a compatibilidade (ausência de conflitos de cruzamento ou convergência) entre cada par de movimentos. É sempre conveniente representar os movimentos na disposição aproximada da geometria da interseção, aproximando os movimentos da mesma aproximação (que é conveniente operar simultaneamente). Para este exercício, o resultado é o diagrama usado anteriormente como exemplo e repetido ao lado.



Pode-se ver que os agrupamentos possíveis de movimento são: A-D, B, C-F-G, D-E-G. Para atender todos os movimentos em pelo menos um estágio ao longo do ciclo, todos os 4 agrupamentos identificados são necessários (haverá 4 estágios) e apenas a ordem pode ser decidida (num caso normal, é possível selecionar agrupamentos de forma a operar os movimentos fortes da interseção em mais de um estágio). Em geral, seleciona a sequência mais natural (consistente com a expectativa dos usuários) e segura (incluindo a menor necessidade de entreverdes) mas o caso em análise tem uma peculiaridade: dois movimentos (D e G) operam em mais de um estágio. Deve-se decidir entre dar continuidade (ou não) a estes movimentos. Exceto quando os movimentos operam em faixas curtas (como baias de conversão), é normalmente interessante dar continuidade fazendo com que os estágios em que os movimentos operam sejam contíguos (com estágios sucessivos, os movimentos terão apenas um tempo perdido). Se há faixas curtas (que contribuem apenas no início do verde), entretanto, a descontinuidade é melhor quando a contribuição da faixa curta é maior que o tempo perdido adicional. No caso, a continuidade é melhor e há apenas duas sequências possíveis que se distinguem pela ordem inicial ou inversa (A-D, D-E-G, C-F-G, B). Pode-se ver que todas as demais sequências com continuidade são rotações das duas opções (a descontinuidade, quando desejada, pode ser obtida invertendo a posição de cada par adjacente na sequência com continuidade, como A-D e B).

Um ciclo semafórico com 4 estágios pode levar a um tempo perdido total e a uma taxa de solicitação de verde efetivo total altos (especialmente se os movimentos fortes operam em apenas um estágio). Com o aumento da demanda, torna-se então importante aumentar o número de movimentos compatíveis ou proibir movimentos conflitantes para permitir operação sobreposta ou reduzir o número de estágios necessários. Por exemplo, no caso em análise, é fácil eliminar os conflitos de G com os demais movimentos que convergem para a mesma via (introduzindo uma ilha de canalização para a entrada de G). Neste caso, G pode ser um movimento livre no semáforo (opera ao longo do ciclo). Se G é um dos movimentos críticos, reduz-se a taxa de solicitação de verde total. Para reduzir o número de estágios, as opções usuais são as proibições de conversões à esquerda conflitantes (que exigem um estágio protegido) ou as junções (antes da interseção semaforizada) de aproximações adjacentes que operam em estágios distintos. No caso em análise, E poderia ser proibido localmente (por exemplo, se há uma rota que permite seu deslocamento com C) ou a via B poderia ser incorporada à via A ou CA ou C. Então o semáforo passaria a ter 3 ou 2 estágios. Por fim, na opção de decomposição da interseção, as linhas de retenção intermediárias ao longo de A-D (ou após C) permite dividir a interseção em 2 (ou 3) sub-interseções e operar cada uma com 2 (ou no máximo 3) estágios. No entanto, a extensão reduzida para acomodar filas intermediárias exige que os movimentos fortes tenham verdes sincronizados (com defasagem adequada) e balanceados (com duração similar) e as programações não são independentes.

4.7. MÉTODOS DE DIMENSIONAMENTO DE SEMÁFOROS ISOLADOS.

Definido um plano de operação semafórico, restam dois problemas adicionais: a seleção do tipo de controle (com tempos fixos ou responsivo, em alguma das suas formas) e a programação dos tempos ou parâmetros (no caso responsivo) de operação. A programação deve determinar os tempos de entreverdes, responsáveis principais pela segurança de trânsito nos semáforos, e os tempos de verde, responsáveis pelo desempenho em termos de fluidez (atrasos).

A seleção do tipo de controle semafórico decorre do entendimento do desempenho relativo obtível de cada opção, que decorre quase diretamente da forma de funcionamento e de programação de cada tipo de controle. Por sua vez, o dimensionamento de semáforos (a determinação dos tempos de entreverde, de ciclo e de verde) é uma das técnicas mais tradicionais e conhecidas da Engenharia de Tráfego.

O dimensionamento do semáforo é precedido pela seleção do tipo de controle semafórico (cada tipo tem uma forma de programação específica) e pela tradução do plano semafórico (diagrama de estágios) na identificação dos estágios semafóricos, grupos semafóricos e grupos de tráfego a serem usados na programação. As condições de operação do período correspondente ao dimensionamento devem também ser obtidas, visto que a programação pode ser específica para cada período do dia e tipo de dia (seja em tempos fixos ou parametrização) mas há limites decorrentes do controlador semafórico existente ou a ser adquirido (função do fabricante).

A unidade de comunicação com o usuário é o grupo focal, formado por um conjunto de focos que exibem todas as cores necessárias. Os grupos focais veiculares usam focos circulares e exibem as cores vermelho, amarelo e verde (o amarelo corresponde à transição), enquanto os grupos focais de pedestres usam focos quadrados e exibem as cores vermelho e verde (havendo a indicação piscante que corresponde à transição, neste aspecto similar ao amarelo veicular).

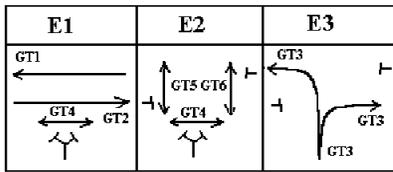
A unidade de análise para o dimensionamento dos semáforos é o Grupo de Tráfego (GT), que é o conjunto de movimentos de uma mesma aproximação que tem o mesmo tratamento semafórico, recebendo a mesma seqüência de indicações luminosas (verde, amarelo e vermelho). Se houver segregação do tráfego nas faixas de uma aproximação, pode-se distinguir grupos de faixas. Os semáforos devem utilizar pelo menos um grupo focal para cada grupo de tráfego.

A unidade de controle para o equipamento semafórico, no entanto, é o Grupo Semafórico (G), que é o conjunto de movimentos que tem o mesmo tratamento semafórico, recebendo a mesma seqüência de indicações luminosas, independentemente da aproximação (que o controlador semafórico não precisa distinguir). Cada grupo semafórico pode ter um ou mais grupos de tráfego. As funções de controle e monitoração do equipamento distinguem grupos semafóricos (o que pode tornar conveniente definir grupos semafóricos distintos para cada grupo de tráfego que deve ter controle distinto).

Como já discutido, o semáforo divide a operação em uma interseção em Estágios Semafóricos (E) (cada período de tempo em que o conjunto de movimentos autorizados não se altera). De forma geral, a duração de um estágio inclui seu verde e seu entreverde (executado na transição ao final do estágio). Os controladores semafóricos também distinguem (explícita ou implicitamente) os estágios semafóricos e seus diferentes intervalos de tempo. Em cada mudança de estágio, normalmente pelo menos um movimento termina e outro movimento inicia a operação, ou seja, tem seu controle semafórico alterado. Por este motivo, o número de grupos semafóricos é normalmente superior ao número de estágios semafóricos em cada semáforo.

Cada grupo semafórico exige um circuito elétrico de comando e supervisão distinto. Esta característica é que faz com que possa ser preferido (embora leve a utilizar equipamentos mais caros), a associação de cada grupo de tráfego a um grupo semafórico também

distinto (mesmo que alguns grupos de tráfego tenham o mesmo controle). Esta prática permite que recursos de monitoração do equipamento elétrico, feitas por grupo semafórico (como a detecção de lâmpadas queimadas), possam ser feitas para cada grupo de tráfego.



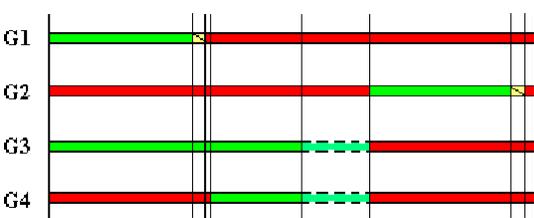
Portanto, como no exemplo ao lado, um semáforo de três estágios (E1, E2, E3) pode ter 6 grupos de tráfego (GT1, GT2, GT3, GT4, GT5, GT6) e 4 grupos semafóricos (dado que GT1 e GT2 tem o mesmo controle, assim como ocorre para GT5 e GT6). Todos os grupos de tráfego operam em pelo menos um estágio e podem operar em mais de um estágio se for possível (como ocorre para GT4).

Todas estas características podem ser obtidas diretamente do exame dos diagramas de estágio, que é a forma usual de representação dos planos de operação semafórica.

Normalmente, a capacidade de controle dos equipamentos semafóricos é estabelecida pelo número de grupos semafóricos e de estágios semafóricos que podem ser comandados. Equipamentos de maior capacidade de controle serão, naturalmente, mais caros. No entanto, usualmente, a capacidade de controle de um equipamento pode ser aumentada de forma modular (em geral adicionando módulos que ampliam o total de grupos semafóricos controlados) até atingir a capacidade máxima do controlador semafórico.¹

Além disso, um mesmo controlador semafórico pode armazenar diversos Planos Semafóricos, que podem ser utilizados uma ou mais vezes ao longo do dia, com programações específicas (chamadas de Programas Semafóricos). A capacidade de controle dos equipamentos semafóricos também é definida pelo número de planos e de programas armazenáveis, assim como pelo número de trocas de planos/programas admitidas.² Atualmente, esta capacidade pode ser amplamente estendida pela comunicação com uma central de controle de tráfego que permite armazenar/alterar os planos/programas locais (o que historicamente foi a origem dos sistemas de controle de tráfego atuais, nas suas diversas formas e graus de automatismo).

A forma como os equipamentos de controle semafórico reconhecem o conceito de estágio semafórico pode ocorrer de diferentes maneiras.



Os programas de controle transformam o diagrama de estágios em um diagrama de alocação de tempos, onde a duração de cada intervalo de verde e de entreverde recebe uma duração específica. Note que os grupos de tráfego veiculares e de pedestres normalmente tem entreverdes distintos (embora possam ter a mesma duração, por programação ou por simplificação).

Os tempos de entreverdes são normalmente fixados, em função dos critérios de segurança, em todos os tipos de controle de tráfego. Nos semáforos a tempos fixos, todos os demais tempos (verdes e vermelhos) também são programados diretamente para cada plano de tráfego, enquanto nos semáforos responsivos são programados

¹ O conceito de Fase Semafórica é também normalmente utilizado mas deve ser evitado, em função das suas diversas acepções. No Brasil, tecnicamente, fase semafórica é sinônimo de grupo semafórico (como ocorre na terminologia inglesa), mas o sentido popular toma fase semafórica como sinônimo de estágio semafórico (significado que, aliás, aproxima-se da terminologia empregada nos Estados Unidos). Para eliminar dubiedades, é melhor evitar o termo (use estágio ou grupo semafórico).

² Outro conceito tradicional, a ser evitado, é o de Plano de Tráfego, eventualmente associado a Plano Semafórico ou Programa Semafórico. A terminologia usual também refere-se a Trocas de Planos (não Trocas de Programas).

Os diagramas de estágios em geral resumem o plano do controle semafórico. Em algumas estratégias ou métodos de controle, a execução efetiva pode variar ao longo de um período de operação (por exemplo, com base em informações obtidas de detectores de tráfego, clima, ...).

Os diagramas de tempos em geral resumem o programa do controle semafórico. Em algumas estratégias ou métodos de controle, os tempos efetivos podem variar ao longo de um período de operação (por exemplo, com base em informações obtidas de detectores de tráfego, clima, ...).

parâmetros de operação que são utilizados para determinar os tempos de programação (verde e vermelho) em função da demanda medida.

A seguir, será discutido o dimensionamento dos intervalos de entreverdes e dos tempos de verdes a tempos fixos (que determinam também os tempos de vermelho), antes para grupos de tráfego veiculares e depois para grupos de tráfego de pedestres. Serão discutidos também, brevemente, alguns critérios usuais para dimensionamento dos parâmetros de controle atuado e as condições em que normalmente seu uso é melhor que o controle a tempos fixos.

4.7.1. Dimensionamento dos Entreverdes

Em relação ao dimensionamento dos entreverdes, deve-se determinar a duração do intervalo de amarelo (ou piscante, no caso de pedestres) e do intervalo de vermelho de segurança.

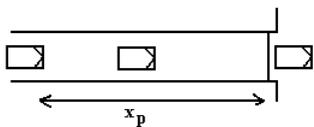
O intervalo de amarelo (I_a) tem como função de informar os condutores do grupo de tráfego que pára no estágio considerado sobre a mudança para a indicação vermelho. Embora seja legal cruzar a linha de retenção durante o intervalo de amarelo, a decisão de deter o veículo deve ser tomada a uma dada distância da linha de retenção para os que não terão condição de cruzar a linha de retenção legalmente (isto é, até o fim do amarelo).

Portanto, o princípio básico de dimensionamento do intervalo de amarelo considera a distância de parada até a linha de retenção para uma aproximação e adota para o correspondente intervalo de amarelo, o tempo necessário para percorrer esta distância para o veículo que segue sem parar. Os veículos localizados a uma distância maior da linha de retenção deverão, por suposição, parar.

O tempo de parada é $t_p = t_r + \frac{V}{b}$ e a distância de parada

correspondente é $x_p = V.t_r + \frac{V^2}{2.b}$, onde t_r é o tempo de reação

(usualmente 1,0 segundo, no caso de semáforos), b é taxa de desaceleração durante a frenagem (usualmente 10,0 km/h/seg para frenagem em semáforos) e V é a velocidade do tráfego (a velocidade regulamentada ou do percentil 85%).



O intervalo de amarelo estimado como o tempo necessário para

percorrer a distância de parada para seguir à diante é $\frac{x_p}{V}$ e, portanto, em geral adota-se

$$I_a = t_r + \frac{V}{2.b} \quad (4.3).$$

Este intervalo deve ser padronizado entre valores esperados pelos usuários para que seja possível avaliar no início do amarelo se será possível passar pela linha de retenção até o final do amarelo ou se é necessário deter o veículo. Em geral, os valores recomendados (para aproximações em nível) seguem os seguintes padrões:

V (km/h)	40ou <	> 40a60	> 60
I_a (seg)	3	4	5

Intervalo de amarelo: função da velocidade dos veículos que param no final do estágio (deve também considerar a existente de aclave/declive na aproximação), calculado por:

$$I_a = t_r + \frac{V}{2.b}$$

usualmente assumindo $t_r = 1\text{seg}$,

$b = 10\text{km/h/s}$ (deve ser menor que $(f \pm i)g$ onde f é a aderência pneu-pavimento em pista molhada, i é o

aclive ou declive e $g \cong 9,78\text{m/s}^2$) e V

é a velocidade de tráfego regulamentada ou correspondente ao percentil 85% da distribuição de velocidades no local.

A taxa de frenagem assumida é um valor comportamental que, em geral, corresponde a uma condição adequada. Deve-se, no entanto, verificar se b é menor que $(f \pm i)g$ onde f é a aderência pneu-pavimento em pista molhada, i é o aclive ou declive e $g \cong 9,78 \frac{m}{s^2}$, especialmente em declives acentuados ou onde o pavimento é desgastado e/ou coberto por detritos (folhas, areia, etc ...).

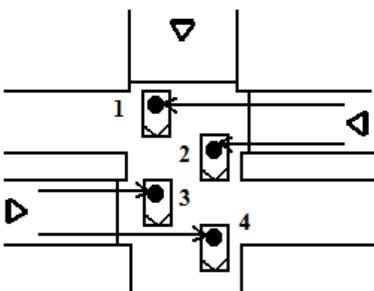
Intervalos de amarelo inadequados trazem normalmente situações indesejáveis. Um intervalo de amarelo insuficiente coloca o usuário em uma situação em que nem é possível cruzar a linha de retenção até o final do intervalo de amarelo, nem é possível parar o veículo até a linha de retenção, com frenagens normais. Um intervalo de amarelo excessivo pode gerar um condicionamento inadequado em não parar para os usuários (além de trazer desperdício do tempo semafórico).

Com um intervalo de amarelo bem dimensionado, a regra de comportamento para os usuários deve ser: parar se, ao receber a indicação de amarelo, for possível deter o veículo com segurança até a linha de retenção (caso contrário, a duração do amarelo deve garantir que é possível seguir). Esta regra vale para usuários que praticam as velocidades usuais. Mesmo para estes casos, com velocidades elevadas há um risco relevante e o máximo de 5seg para o amarelo pode também gerar uma necessidade residual ($I_{res} = t_r + \frac{V}{2.b} - I_a$).

O intervalo de vermelho de segurança (I_v) tem como função apoiar a existência de uma transição segura entre estágios sucessivos, dado que os movimentos que encerram e iniciam a operação são usualmente incompatíveis e terão algum conflito se ocuparem a interseção simultaneamente. Embora, legalmente, os movimentos que iniciam a operação devam observar se existem veículos concluindo seus movimentos antes de entrar na interseção, a abordagem usual da Engenharia de Tráfego é a de incorporar este período de conflito na programação semafórica como vermelho para ambos. Desta forma, apenas os veículos que já cruzaram a linha de retenção do movimento que encerra a operação, até o final do seu intervalo de amarelo, estarão normalmente na interseção. Esta condição deve ser verificada para todos os potenciais conflitos (ou para o mais crítico).

Portanto, o princípio básico de dimensionamento do intervalo de vermelho de segurança considera a distância do veículo que encerra e que inicia a operação até cada ponto de conflito potencial e adota para o correspondente intervalo de vermelho de segurança, o tempo necessário para o veículo que encerra a operação sem parar livre o ponto de conflito antes da chegada do veículo que inicia a operação no estágio seguinte, partindo da posição parada ou chegando em movimento, do conflito mais crítico.

Se as distâncias dos veículos que encerram e iniciam a operação na mudança de estágio até o ponto de conflito potencial são x_s e x_e , respectivamente, o tempo necessário para livrar o ponto de conflito potencial deve incluir o comprimento do veículo ℓ_v e depende das velocidades nos fluxos de saída e entrada V_s e V_e . A situação crítica para o tempo de liberar e atingir o ponto de conflito potencial normalmente é o que corresponde ao maior x_s e ao menor x_e .



Intervalo de amarelo: verificações
 - verificar aderência: $b \leq (f \pm i)g$
 (exemplo: $f=0,20$ em declive de 5%,
 $(f - i)g = (0,20 - 0,05) \cdot 9,78 = 1,467 \text{m/s}^2$
 e $b = 10 \text{km/h/s} = 2,778 \text{m/s}^2$; deve-se
 usar $b = 1,467 \text{m/s}^2 = 5,28 \text{km/h/s}$ e
 $I_a = 4 \text{s}$ ou melhorar a aderência);
 - verificar resíduo: $I_{res} = t_r + \frac{V}{2.b} - I_a$
 (exemplo: $V=80 \text{km/h}$ e $I_a=5 \text{seg}$,
 $I_{res} = 1,0 + \frac{80}{2 \cdot 10} - 5 = 0$; não há
 necessidade residual no amarelo de
 5seg para V até 80km/h).

Intervalo de vermelho de segurança veicular: função das velocidades dos veículos que param (s) ou inicial (e) movimento no final do estágio e das distâncias ao ponto de conflito crítico (maior x_s e menor x_e), calculado por:

$$I_v = \frac{x_s + \ell_v}{V_s} - \frac{x_e}{V_e} + \delta_{seg}$$

usualmente assumindo $\ell_v \cong 6a8m$,

$\delta_{seg} = I_{res}$ ou 0s (exceto quando há

chance relevante de entrada em chegadas sem fila ou risco grave na transgressão no amarelo, como antes de estágios exclusivos de pedestres, onde $\delta_{seg} = I_{res} + 1$ ou 1s) e adotando

velocidades médias (exceto onde houver velocidades não usuais que também devam ser protegidas).

Havendo mais de um conflito, em geral assume-se $I_v = \max_k \{I_{vk}\}$ (no

exemplo do esquema anterior, o caso crítico seria o ponto de conflito 1:

admitindo $x_s = 15m$, $x_e = 7m$,

$\delta_{seg} = 0s$ e $V_s = V_e = 60km/h$, tem-

se $I_v = \frac{15+8}{60/3,6} - \frac{7}{60/3,6} = 0,96$ ou 1s).

O intervalo de vermelho de segurança, identificados os dados relacionados ao ponto de conflito crítico, pode ser determinado por

$$I_v = \frac{x_s + \ell_v}{V_s} - \frac{x_e}{V_e} + \delta_{seg} \quad (4.4),$$

onde δ_{seg} é uma margem de segurança adicional (normalmente usado apenas há uma probabilidade relevante de que os veículos dos movimentos que iniciam cheguem sem fila ou quando os movimentos que entram, e eventualmente também os que saem, de operação no novo estágio são referentes a fluxos de pedestres). A margem de segurança deve também considerar a necessidade residual não atendida no amarelo dimensionado (I_{res}), se houver (positiva).

As distâncias em geral devem ser medidas em planta, seguindo o curso das manobras a partir das linhas de retenção respectivas, embora eventualmente sejam adotadas as larguras das vias correspondentes (como na Res.483/2014 do CONTRAN, que adota também $x_e = 0$) e os raios de curva das conversões em casos de interseções menos críticas. É normalmente suficiente considerar a manobra pelo eixo dos veículos (x_e poderia ser reduzido em 1m pela largura do veículo s ou aumentado em 1m pela distância até a linha de retenção mas ambos os ajustes produzem efeito usualmente irrelevante nos valores obtidos).

Note que para o caso de movimentos veiculares, a estimativa do vermelho de segurança ignora a possibilidade de iniciar o movimento que entra de uma posição parada, que inclui um tempo de reação e o tempo de movimento até o ponto de conflito acelerando (que seria

$t_{re} + \sqrt{\frac{x_e}{2.a}}$, onde a taxa de aceleração a estaria entre 2,5 e 5,0

km/h/seg em condições usuais). Portanto, uma margem de segurança já está implícita nas fórmulas de cálculo usual. Os critérios correspondentes a pedestres serão discutidos adiante.

Deve-se notar que, neste caso, nenhum processo de decisão complexo é considerado nas hipóteses de cálculo adotadas para estimar o intervalo de vermelho de segurança necessário, admitindo-se a suposição de que o último veículo que encerra a operação passa no final do intervalo de amarelo (isto é, de que não há transgressão) e que o primeiro veículo que inicia a operação passa pela linha de retenção correspondente no início do verde (novamente, sem transgressão). Os valores de velocidade assumidos podem, entretanto, ser questionados. Ao contrário das situações usuais do tráfego, para a estimativa do intervalo de vermelho de segurança não é sempre mais crítico para as velocidades maiores (pelo contrário). Por este motivo é usual, realizar o cálculo para as velocidades médias de veículos leves e pesados (ou a velocidade de saída do percentil 15%).

Embora não seja usual, deve-se avaliar se é importante diferenciar o entreverdes (intervalo de amarelo ou vermelho de segurança) em uma dada mudança de estágio. Se for preciso, em geral será necessário alocar movimentos com entreverdes distintos a grupos semaforicos também distintos. Deve-se também avaliar se eventuais transgressões justificam ajustar, excepcionalmente, os entreverdes calculados (ou adotar formas permanentes de fiscalização).

No Brasil, não é usual variar os entreverdes na mudança de estágios e os valores adotados são os valores críticos correspondentes (o maior dos valores necessários). Entretanto, esta regra usual deve ser avaliada cuidadosamente pelo Engenheiro de Tráfego e valores distintos podem ser adotados (por exemplo, no aclave e no declive de aproximações opostas) sempre que importante para segurança viária. Neste caso, em geral os movimentos com entreverdes distintos terão de ser alocados a grupos semaforicos também distintos (para diferenciar os entreverdes).

A possibilidade de transgressão no término ou início dos estágios sucessivos é, de resto, o único aspecto ignorado pela fórmula usual de cálculo do intervalo de vermelho de segurança. No entanto, normalmente considera-se inadequado incorporar estas características

de comportamento (por mais usuais que sejam) pelo perigoso efeito de condicionamento que a acomodação desta prática pode trazer aos usuários da via, além do desperdício de tempo semafórico (salvo em casos excepcionais). Deve-se observar que, infelizmente, é em geral impossível evitar que os movimentos envolvidos em pontos de conflito menos críticos tenham a percepção de transgressão segura no final do estágio (pelo com os controladores semafóricos e as técnicas de controle usualmente empregados). Nestes casos, deve-se avaliar a conveniência de ajustar os entreverdes calculados (a menos de ser possível adotar formas eficazes e permanentes de fiscalização).

4.7.2. Dimensionamento do Ciclo (e dos Verdes)

Em relação ao dimensionamento dos verdes, deve-se determinar a duração necessária para atender a necessidade de cada grupo de tráfego (determinando os vermelhos dos movimentos bloqueados).

Embora o caso básico de dimensionamento dos tempos de verde seja bastante simples, deve-se advertir que existem diversos casos especiais que exigem métodos iterativos de cálculo (normalmente decorrente do fato de que os parâmetros básicos utilizados no dimensionamento são afetados pelos próprios tempos semafóricos). Na exposição a seguir, o caso básico é inicialmente apresentado, discutindo-se a seguir alguns casos especiais mais importantes.

As condições de dimensionamento no caso básico são diretamente derivadas do estabelecimento da relação entre a visão da operação semafórica vista por cada grupo de tráfego e a visão global que considera todos os grupos de tráfego (seus verdes e entreverdes) que operam ao longo dos estágios do ciclo semafórico.

A visão de cada grupo de tráfego pode ser sintetizada na fórmula de

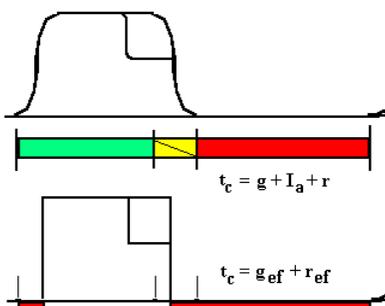
capacidade em fluxo descontínuo $C = \varphi.S$, onde $\varphi = \frac{g_{ef}}{t_c}$ é a taxa de

verde efetivo e S é o fluxo de saturação para o grupo de tráfego. O verde efetivo g_{ef} é o tempo disponível para o movimento descontado do efeito da perda de eficiência no início e término de uma fila parada, correspondente ao tempo morto ℓ , tendo-se $g_{ef} = g + I_a - \ell$ (e

$r_{ef} = r + \ell$ para o vermelho efetivo). O tempo de ciclo é

$t_c = g + I_a + r$, em tempos de foco, ou simplificada

$t_c = g_{ef} + r_{ef}$, em tempos efetivos.



Para um grupo de tráfego veicular i , a condição de atendimento à demanda $Q_i \leq C_i$ pode ser traduzida em

$$y_i \leq u_{k[i]}$$

onde $y_i = \frac{Q_i}{S_i}$ é a taxa de solicitação

de verde efetivo (taxa de solicitação ou de ocupação) do grupo de tráfego i e

$u_{k[i]} = \frac{g_{efk}}{t_c}$ é taxa de verde efetivo

(proporcionada) do estágio $k[i]$ (o estágio k , ou conjunto de estágios k , em que i opera no ciclo).

Para um grupo de tráfego, o tempo de ciclo é visto como um tempo em movimento e um tempo bloqueado. Considerando-se que o fluxo de saturação e o tempo morto são normalmente constantes, a capacidade pode ser variada alterando o tempo de ciclo e o tempo de verde para o grupo de tráfego (dado que o intervalo de amarelo é normalmente constante). Conhecida a fluxo de demanda do grupo de tráfego i em um dado período de dimensionamento, a sua necessidade de escoamento é satisfeita se $Q_i \leq C_i$. Utilizando as relações anteriores, esta condição pode ser expressa por $y_i \leq u_{k[i]}$, onde

$$y_i = \frac{Q_i}{S_i} \tag{4.5}$$

é a taxa de solicitação de verde efetivo do grupo de tráfego i , dada pela razão entre o fluxo de demanda e o fluxo de saturação (no escoamento das filas), e

$$u_i = u_{k[i]} = \frac{g_{efk}}{t_c} \quad (4.6)$$

é a taxa de verde efetivo recebida pelo estágio $k[i]$ em que o grupo de tráfego i opera no semáforo (que corresponde a φ). Se o grupo de tráfego opera em mais de um estágio ao longo do ciclo, a condição aplica-se à taxa de verde efetiva total (somando seus estágios).

Portanto, cada grupo de tráfego veicular tem uma necessidade de verde veicular expressa em termos relativos ao tempo de ciclo pela sua taxa de solicitação de verde efetivo y_i (muitas vezes chamadas de taxa de ocupação ou taxa de saturação). Se admite-se que o intervalo mínimo na dissipação da fila é o tempo que cada veículo ocupa a via, então obteve-se que a taxa de solicitação de verde efetivo (como fração do tempo requerido para escoar a demanda) é a taxa de ocupação da via y_i (medida como fração do tempo em que a via seria ocupada pela fila escoando a demanda correspondente com eficiência máxima).

O dimensionamento semaforico, por sua vez, proporciona uma taxa de verde efetivo $u_{k[i]}$ que representa a proporção do ciclo ofertada para o estágio em que o movimento opera (aliás, eventualmente, mais de um estágio se for esta sua condição de operação). Pode-se notar que, neste caso, o grau de solicitação da capacidade X_i , dado pela relação entre

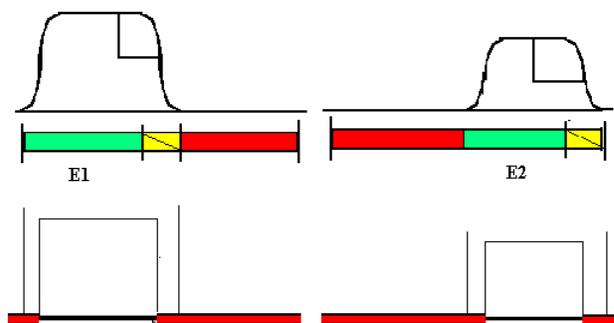
demanda e capacidade $(\frac{Q_i}{C_i})$, também pode ser expresso pela relação

entre demanda e oferta de verde efetivo $(\frac{y_i}{u_i})$. Deve-se também notar

que o dimensionamento estrito com $C_i = Q_i$ corresponde a $u_{k[i]} = y_i$ e a $X_i = 100\%$. Esta condição pode trazer atrasos excessivos e não é usualmente utilizada.

Para passar ao dimensionamento do semáforo como um todo deve-se também passar da visão de um grupo de tráfego para a visão do conjunto de grupos de tráfego que o semáforo controla.

Em cada período de tempo (normalmente associado a cada estágio semaforico), podem existir diversos grupos de tráfego operando simultaneamente, caso sejam compatíveis. O tempo de verde efetivo oferecido ao estágio semaforico atende, neste caso, a todos os grupos de tráfego que operam simultaneamente (ao mesmo tempo, ao longo do mesmo estágio ou sequência de estágios). A necessidade de verde do estágio (a sua taxa de solicitação de verde) deve naturalmente considerar os grupos de tráfego mais exigentes para atender a todos (o verde oferecido a cada estágio atende simultaneamente a todos os grupos de tráfego que operam nesse período de tempo).



Por outro lado, examinando a operação do semáforo como um todo, os tempos de vermelho para um grupo de tráfego devem ser naturalmente relacionados com as necessidades dos demais grupos de tráfego (isto é, dos grupos de tráfego que são incompatíveis com os movimentos autorizados em cada verde e tem de operar em estágios distintos).

Visto globalmente, o tempo de ciclo é uma sucessão de verdes e entreverdes para os grupos de tráfego que recebem, sucessivamente, o direito de uso da via na interseção. O tempo de ciclo pode, então, ser escrito como $t_c = \sum_k (g_k + I_k)$,

somando os tempos de verde e entreverde de cada estágio k . Notando que $I = I_a + I_v$ e que $g + I_a = g_{ef} + \ell$, pode-se escrever também $t_c = \sum_k (g_{efk} + I_{\ell k})$, onde $I_{\ell} = \ell + I_v$ é o tempo perdido em cada mudança de estágio (associada ao final do estágio, embora ocorra parcialmente também no início do estágio).

Exprimindo o tempo de verde efetivo em função do tempo de ciclo por $g_{efk} = u_k \cdot t_c$, tem-se a expressão geral:

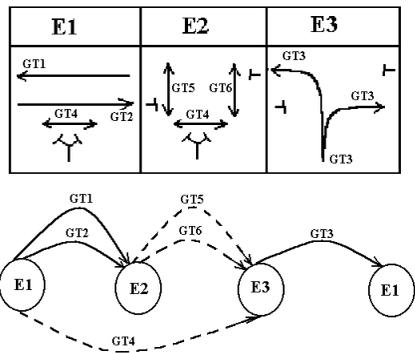
$$t_c = \frac{t_p}{1 - U} \quad (4.7)$$

onde $t_p = \sum_k I_{\ell k}$ é o tempo perdido total ao longo das mudanças de estágio e $U = \sum_k u_k$ é a taxa de verde efetivo global no semáforo.

Esta mesma expressão pode ser reescrita como $U = 1 - \frac{t_p}{t_c}$, mostrando

que existirá sempre uma perda de eficiência nas mudanças de estágio (esta é uma das razões para tentar operar as interseções semaforizadas com o menor número de estágios possível), deixando menos de 100% do tempo disponível como verde efetivo global. Pode-se também ver que, como os componentes dos tempos perdidos nas mudanças de estágio são normalmente constantes, o aumento do tempo de ciclo permite aumentar a taxa de verde efetivo global disponível no semáforo, mas isto ocorre com rendimentos decrescentes. Por exemplo, um semáforo com 10 segundos de tempo perdido total, teria 15 segundos de verde efetivo em um tempo de ciclo de 25 segundos (60%), 40 em 50 (80%), 90 em 100 (90%), 190 em 200 (95%).

As relações obtidas acima valem em qualquer situação de dimensionamento. Note, entretanto, que os tempos estão referidos aos estágios semaforicos e não aos grupos de tráfego.



A composição das necessidades de verde dos diferentes grupos de tráfego ao longo do ciclo semaforico deve ser buscada no diagrama de estágios ou no diagrama de movimento. O tempo de verde dado a um estágio semaforico atende a todos os seus grupos de tráfego simultaneamente. As necessidades destes grupos de tráfegos não se somam e basta atender ao grupo de tráfego mais crítico para satisfazer este e todos os demais. Somar os tempos de verde de diferentes estágios corresponde, portanto, a somar as necessidades de verde dos grupos de tráfego críticos de cada estágio. Como alguns grupos de tráfego podem operar em mais de um estágio, a análise pertinente deve comparar um ciclo completo.

Determinando-se os grupos de tráfego críticos y_k , pode-se reexaminar a condição inicial de dimensionamento $y_k \leq u_k$, tendo-se:

$$t_c \geq \frac{t_p}{1 - Y} = t_c^{\min} \quad (4.8)$$

onde $Y = \sum_k y_k$ é a soma das taxas de solicitação de verde para os grupos de tráfego críticos de uma seqüência que cobre um ciclo completo, determinando a operação dos estágios sucessivos, e t_c^{\min} é o valor do tempo de ciclo mínimo que permite satisfazer a demanda na interseção. Em termos globais, a condição inicial de dimensionamento pode ser escrita como $Y \leq U$ e o grau de solicitação da capacidade global no semáforo pode ser associada a $X = \frac{Y}{U}$.

Para o semáforo, visto globalmente, a condição de atendimento à demanda é

$$t_c = \frac{t_p}{1 - U} \geq \frac{t_p}{1 - Y} = t_c^{\min}$$

onde $U = \sum_k u_k$, $Y = \sum_k y_k$ e

$t_p = \sum_k I_{\ell k}$ são as variáveis globais (somando todos os estágios ao longo do ciclo). As taxa de solicitação de verde efetivo y_k de cada estágio e os tempos perdidos $I_{\ell k} = \ell_k + I_v$ em cada mudança de estágio (associados ao final do estágio), correspondem a uma seqüência completa no ciclo (crítica é a que solicita maior ciclo). O diagrama de movimento é uma forma clara de representar as seqüências alternativas que podem definir o dimensionamento.

Da discussão anterior, pode-se apreender que o aumento do tempo de ciclo permite reduzir o grau de solicitação global de capacidade no semáforo (por aumentar o verde efetivo global) mas isto ocorre com rendimentos decrescentes.

Existe, no entanto, uma outra questão relevante: qual o efeito dos tempos semaforicos no desempenho experimentado no semáforo pelos usuários da via?

Este desempenho para os usuários do semáforo é usualmente associado ao atraso experimentado em cada aproximação semaforica, que pode ser estimado considerando dois termos:

- o atraso regular devido às interrupções causadas pelos tempos de vermelho que é avaliado com base na Teoria do Fluxo de

$$\text{Tráfego por } d_{ri} = \frac{(1 - u_i)^2}{(1 - y_i)} \cdot \frac{t_c}{2}, \text{ com } y_i = \frac{q_i}{S_i} \text{ e } u_i = \frac{g_{efk_i}}{t_c}$$

($u_i = u_{k[i]}$, onde $k[i]$ é o estágio em que opera o grupo de

tráfego i , e o fluxo de tráfego $q_i \leq C_i$ deve excluir qualquer efeito decorrente da existência de sobre-demanda);

- o sobre-atraso devido ao efeito adicional de sobre-demanda e aleatoriedade eventuais que é avaliado com base na Teoria do

$$\text{Fluxo de Tráfego por } d_{si} = \frac{T_p}{4} \cdot (A + \sqrt{A^2 + B}), \text{ com}$$

$$A \cong (X_i - 1) \text{ e } B \cong \frac{8 \cdot X_i}{C_i \cdot T_p} \text{ (onde } T_p \text{ é a duração do pico de}$$

$$\text{demanda no período, tendo-se } X_i = \frac{Q_i}{C_i} = \frac{y_i}{u_i} \text{ e } C_i = u_i \cdot S_i,$$

ou outra expressão similar (como o atraso de Webster).

Em geral, o primeiro termo é dominado pelo crescimento do tempo de ciclo e o segundo termo é dominado pelo crescimento do grau de solicitação da capacidade. Como o aumento do tempo de ciclo utilizado no dimensionamento faz com o tempo de verde efetivo global aumente (e, portanto, a capacidade no semáforo possa aumentar e seu grau de saturação possa diminuir), o efeito sobre cada grupo de tráfego seria normalmente associado a que o termo referente ao atraso regular cresça e o termo referente ao sobre-atraso decresça. Este comportamento pode fazer com que exista um tempo de ciclo em que o atraso experimentado seja mínimo (chamado de tempo de ciclo ótimo).

Embora não seja imediato determinar o dimensionamento que corresponde às condições ótimas, existe um critério heurístico amplamente utilizado que corresponde à fórmula de Webster:

$$t_c^{\text{ót}} = \frac{1,5 \cdot t_p + 5 \text{seg}}{1 - Y} \quad (4.9),$$

com

$$g_{efk} = \frac{y_k}{Y} \cdot G_{ef} \quad (4.10)$$

onde $G_{ef} = t_c - t_p$ é o tempo de verde efetivo global. Os tempos de foco correspondentes aos tempos de verde efetivos dimensionados podem ser obtidos de $g_k = g_{efk} + \ell_k - I_{ak}$, com os tempos de entreverdes do final do estágio k e o tempo morto do grupo de tráfego crítico correspondentes.

Ciclo ótimo veicular (mínimo atraso) com a fórmula de Webster:

$$t_{cot} = \frac{1,5 \cdot t_p + 5s}{1 - Y} \leq t_{cmáx}$$

com repartição (proporcional) do verde efetivo total $G_{ef} = t_c - t_p$ dada por

$$g_{efk} = \frac{y_k}{Y} \cdot G_{ef}$$

e $g_k = g_{efk} + \ell_k - I_{ak} \geq g_{\text{mín}}$ (verde de foco). O dimensionamento é viável apenas se $Y < 1$ e $t_{cot} \leq t_{cmáx}$ (onde o tempo de ciclo máximo $t_{cmáx}$ é um parâmetro de política local, usualmente entre 100 e 180s, definido para evitar impaciência dos condutores e filas muito extensas; o verde mínimo $g_{\text{mín}}$ é também um parâmetro de política local, usualmente entre 6 e 10s, também definido para evitar a impaciência dos condutores).

O exame da fórmula de Webster permite ver que $t_c^{\text{ót}} > t_c^{\text{mín}}$ (notando-se que ambos os casos somente fornecem valores positivos se $Y < 1$), introduzindo-se uma folga necessária para acomodar flutuações aleatórias. O grau de solicitação da capacidade (se $Y < 1$) será, portanto, menor que 100%. Além disso, o critério de alocação proporcional do verde efetivo global aos estágios faz com que todos os grupos de tráfego críticos tenham o mesmo grau de solicitação da capacidade ($X_{\text{crit}} = \frac{Y}{G_{\text{ef}}} \cdot t_c^{\text{ót}}$). O único cuidado relevante na aplicação

da fórmula de Webster é a utilização de fluxos de demanda médios para evitar tempos de ciclos com muita ociosidade.

Como observado por Webster, a eficiência do dimensionamento não é sensível de forma crítica ao valor do tempo de ciclo adotado e qualquer valor entre 75% e 150% do tempo de ciclo ótimo sugerido pela fórmula de Webster permite obter condições de desempenho (atraso) similares.

Em termos práticos, a fórmula de Webster é amplamente utilizada sempre que sua aplicação é possível. Além da condição de ter um grau de solicitação de verde global menor que 100% ($Y < 1$), a aplicação é restrita por critérios práticos diversos como:

- a adoção de um tempo de ciclo máximo para evitar a impaciência dos condutores (os valores usuais para o tempo de ciclo máximo variam entre 100 e 180 segundos);
- a adoção de tempos de verde mínimos para a duração dos estágios para evitar a frustração dos condutores (valores usuais de tempos de verde mínimo variam entre 6 e 10 segundos).

Estas restrições práticas são importantes porque as expectativas dos condutores sobre os tempos semaforicos podem fazer com que os usuários conjecturem que o equipamento não esteja funcionando adequadamente e decidam pela desobediência ao semáforo (especialmente prejudicial nos períodos de maior demanda de tráfego). A limitação do ciclo máximo também busca evitar que as filas normalmente formadas nos picos sejam excessivas e provoquem o bloqueio de interseções adjacentes, uma condição que dificilmente pode ser evitada no casos de sistemas viários mais solicitados.

Quando as restrições práticas são violadas, o dimensionamento pode (e tem de) ser adaptado seguindo recomendações diversas.

Se $Y > 1$ ou o tempo de ciclo ótimo recomendado é maior que o tempo de ciclo máximo aceito, normalmente recomenda-se optar pelo dimensionamento do semáforo com o tempo de ciclo máximo $t_c = t_c^{\text{máx}}$. Este será o caso sempre que a taxa de solicitação de verde

global satisfizer $Y \geq 1 - \frac{t_p}{t_c^{\text{máx}}}$ (menor que 100%).

O critério alternativo mais usual ao dimensionamento proposto por Webster é a aplicação da fórmula do tempo de ciclo prático:

$$t_c^{\text{prát}} = \frac{t_p}{1 - \tilde{Y}} \quad (4.11)$$

e

$$g_{\text{efk}} = \tilde{y}_k \cdot t_c \quad (4.12)$$

onde $\tilde{Y} = \sum_k \tilde{y}_k$ é a soma das taxas de solicitação de verde revisada, sendo a taxa de solicitação de verde de cada estágio recalculada como

Ciclo prático veicular (quando o ciclo ótimo é inviável):

$$t_{\text{cprát}} = \frac{t_p}{1 - \tilde{Y}} \cong t_{\text{cmáx}}$$

com $\tilde{Y} = \sum_k \tilde{y}_k$, onde \tilde{y}_k é obtido da taxa de solicitação de verde aparente

$\tilde{y}_i = \frac{y_i}{X_i^{\text{prát}}}$ que é fixada definindo um

grau de saturação prático X_{prati} para cada grupo de tráfego i que é aceitável na condição que $t_{\text{cprát}} \cong t_{\text{cmáx}}$ e que

determina $u_k = \tilde{y}_k$ e

$$g_{\text{efk}} = \tilde{y}_k \cdot t_c$$

e $g_k = g_{\text{efk}} + l_k - I_{\text{ak}} \geq g_{\text{mín}}$ (verde de foco). O dimensionamento é iterativo, até obter $t_{\text{cprát}} \cong t_{\text{cmáx}}$ (alternativamente

pode-se adotar $t_{\text{cprát}} = t_{\text{cmáx}}$ e obter um dos estágios como residual). Os demais critérios são similares.

$$\tilde{y}_i = \frac{y_i}{X_i^{\text{prát}}} \quad (4.13)$$

obtida definindo o grau de solicitação de capacidade projetado (desejado ou admitido) para o grupo de tráfego i ($X_i^{\text{prát}}$) ou para cada estágio (ou grupo de tráfego crítico do estágio) k ($X_k^{\text{prát}}$). O tempo de ciclo prático resulta, então, no menor tempo de ciclo que satisfaz estes critérios de projeto e deve ser próximo ao tempo de ciclo máximo (ou seja, ao tempo de ciclo que maximiza a capacidade potencial).

Esta fórmula é especialmente interessante quando as vias que se interceptam no semáforo devem ser tratadas de forma distinta (diferenciando $X_i^{\text{prát}}$), sendo uma alternativa ao critério de alocação proporcional do verde recomendado originalmente por Webster.

Valores desejados para o grau de solicitação de capacidade projetado variam de 90% para vias estruturais a 95% para as demais vias, com base nos picos de fluxo de 15 minutos. Estes valores, no entanto, podem ter de ser adaptados para permitir chegar a dimensionamentos praticáveis. Em princípio, quando há saturação nos semáforos deve-se preservar as vias estruturais mantendo valores até 95% (ou 100% nos

piores casos) e alocar a capacidade remanescente até ter $\tilde{Y} \leq 1 - \frac{t_p}{t_c^{\text{máx}}}$,

ajustando convenientemente os valores dos graus de solicitação de capacidade admitidos. Neste caso, nas vias secundárias deve-se normalmente aceitar graus de solicitação de capacidade maiores que 100% (como normalmente será obtido quando seus estágios forem calculados como residuais). No entanto, é preciso verificar se as filas e atrasos resultados não trazem situações inaceitáveis, bloqueios ou transgressões indesejáveis.

Embora estes dimensionamentos determinem tempos de ciclo similares, a repartição de verde efetivo é distinta e os graus de solicitação de capacidade são considerados de forma explícita.

Em ambos os casos, a viabilidade do dimensionamento obtido deve também satisfazer restrições de verde mínimo dos estágios.

Se um estágio k tem tempo de verde dimensionado menor que o mínimo, o dimensionamento deve ser revisado para garantir este tempo mínimo adotando um novo tempo de ciclo que o acomode.

Diversas fórmulas distintas são recomendadas para esta revisão.

Por exemplo, para garantir um tempo de verde mínimo $g_{\text{mínk}}$ para o estágio k , pode-se adotar:

$$t_{\text{cót}}^{\text{rev}} = \frac{1,5.t_p^{\text{rev}} + t_f^{\text{rev}} + 5s}{1 - Y^{\text{rev}}} \leq t_{\text{cmáx}} \quad t_{\text{cót}}^{\text{rev}} = \frac{1,5.t_p^{\text{rev}} + t_{E_k} + 5\text{seg}}{1 - Y^{\text{rev}}} \quad (4.14)$$

$$\text{ou } t_{\text{cprát}}^{\text{rev}} = \frac{t_p^{\text{rev}} + t_f^{\text{rev}}}{1 - \tilde{Y}^{\text{rev}}} \cong t_{\text{cmáx}}$$

ou

$$t_{\text{cprát}}^{\text{rev}} = \frac{t_p^{\text{rev}} + t_{E_k}}{1 - \tilde{Y}^{\text{rev}}} \quad (4.15)$$

com $t_p^{\text{rev}} = t_p - I_{/k}$, $t_{E_k} = g_{\text{mínk}} + I_k$, $Y^{\text{rev}} = Y - y_k$ ou $\tilde{Y}^{\text{rev}} = \tilde{Y} - \tilde{y}_k$, que fixa a duração (violada) do estágio k em t_{E_k} , onde I_k é o entreverde do estágio k (seu amarelo mais seu vermelho de segurança), $I_{/k}$ é o tempo perdido na mudança de estágio k (anteriormente incluído em t_p) e y_k é a taxa de solicitação de verde crítica no estágio

Revisão (do ciclo ótimo):

com um novo tempo fixado pela

condição violada $t_{E_k} = g_{\text{mínk}} + I_k$ (ou $t_{E_k} = g_{\text{mínk}} + I_{ak} + I_{vk}$) em um dado

estágio E_k e variáveis revisadas são $t_p^{\text{rev}} = t_p^{\text{ant}} - I_{/k}$, $t_f^{\text{rev}} = t_f^{\text{ant}} + t_{E_k}$ e

$Y^{\text{rev}} = Y^{\text{ant}} - y_k$ ou $\tilde{Y}^{\text{rev}} = (\tilde{Y}^{\text{ant}} - \tilde{y}_k)$

(inicialmente $t_p^{\text{antes}} = t_p$, $t_f^{\text{antes}} = 0$ e

$Y^{\text{ant}} = Y$ ou $\tilde{Y}^{\text{ant}} = \tilde{Y}$).

k (anteriormente incluída em Y). Se mais de uma condição é violada, a revisão deve ser feita iterativamente (como o ciclo revisado deve crescer, pode-se iniciar da menor violação).

Estas adaptações são utilizáveis e permitem aplicar os critérios originalmente propostos por Webster para complementar o dimensionamento (como a alocação proporcional do verde efetivo).

Pode-se fazer um comentário adicional sobre os casos em que os entreverdes são diferenciados (ou os tempos mortos são distintos) para os grupos de tráfego de uma mudança de estágio. É fácil perceber que os procedimentos apresentados anteriormente não precisam ser alterados, reconhecendo-se apenas que os tempos perdidos não são mais atributos comuns da mudança de estágio mas dependem da sequência alternativa que está sendo avaliada (contribuindo de forma distinta para definir a sequência crítica).

Por fim, um comentário prático pode ser feito sobre a estimativa dos tempos mortos (e dos tempos perdidos) para os casos em que não foi possível medir em campo. Ao contrário da estimativa dos fluxos de saturação (para os quais existem diversos métodos analíticos propostos) e da demanda de tráfego (normalmente obtidas de contagens ou projeções antes do dimensionamento), não existem métodos validados para estimar os tempos mortos. Em geral, existem regras práticas que os diferentes analistas utilizam com base na experiência e permitem obter estimativas preliminares (por exemplo, estima-se o tempo morto como sendo igual ao amarelo, ao amarelo menos 1 segundo, ou igual a 3 segundos), eventualmente ponderando características locais consideradas relevantes (a existência de aclive ou declive, a presença de transgressões na via ou na transversal).

Embora normalmente admita-se que estas regras práticas permitam ter precisão suficiente, sempre é necessário ponderar cada situação. Nos casos de interseções mais críticas, em geral justifica-se utilizar métodos de medição de campo e obter dados mais confiáveis tanto para os tempos mortos quanto para os fluxos de saturação importantes.

4.7.3. Dimensionamento dos Semáforos com Pedestres

Todos os conceitos discutidos até aqui aplicam-se para casos em que os grupos de tráfego de pedestres são importantes no dimensionamento semafórico, como uma diferença essencial: nas condições usuais, admite-se que a necessidade de verde determinada pelos pedestres é definida de forma absoluta, em função do tempo de travessia, em vista da habilidade dos pedestres atravessarem em filas paralelas (com ou sem a demarcação de faixas de travessia largas).

Em geral, as condições específicas de cada travessia são consideradas apenas para determinar margens mínimas a serem adotadas na determinação do tempo de verde mínimos nos estágios, para os pedestres, em função do seu tempo mínimo requerido para travessia paralela, estimado como:

$$t_{pedi} = \frac{L_{pedi}}{V_{pedi}} + \delta_{pedi} \quad (4.16)$$

onde L_{pedi} é a distância na travessia de pedestres (considerando a eventual possibilidade de travessia integral ou em etapas, quando houver canteiro ou ilha para espera dos pedestres, como definido no plano semafórico adotado), V_{pedi} é a velocidade normal dos pedestres nas travessias (de 0,9 a 1,2m/s, dependendo do tipo de pedestre que é

Para um grupo de tráfego de pedestres i, a condição de atendimento à demanda pode ser traduzida em

$$t_{pedk[i]} \geq t_{pedi} = \frac{L_{pedi}}{V_{pedi}} + \delta_{pedi}$$

onde t_{pedi} é o tempo necessário para a travessia de pedestres i, considerando sua distância integral de travessia L_{pedi} e velocidade normal de travessia

$V_{pedi} \cong 0,9a1,4 \frac{m}{s^2}$ (função do tipo de pedestres), com $\delta_{pedi} \cong 3a7s$ para o

tempo de reação e escoamento de pelotões de pedestres (função do tamanho do pelotão na travessia), e

$t_{pedk[i]} = g_k + I_{ak}$. O tempo disponível para travessia no estágio k[i] (o estágio k, ou conjunto de estágios k, em que i atravessa no ciclo) é dividido entre o verde e o piscante para pedestre, obtidos como:

$$I_{pisci} = \frac{L'_{pedi}}{V'_{pedi}}, g_{pedi} = t_{pedi} - I_{pisci}$$

onde L'_{pedi} é a distância mínima de travessia e $V'_{pedi} \cong 1,2a2,0 \frac{m}{s^2}$ é a velocidade de travessia no piscante.

(Opção: $g_{pedi} = t_{pedi} - I_{pisci} - I_{vi}$ se

usuário habitual do local) e δ_{pedi} é a margem de tempo na travessia (correspondente ao tempo de reação dos pedestres e à acomodação de pelotões de pedestres na travessia em grupo). Em alguns casos, a distância de travessia pode ser calculada como distância de conflito (inferior à distância física entre calçadas e refúgios) quando for possível deduzir faixas de estacionamento sempre ocupadas por veículos (embora suponha a espera de pedestres nas faixas de tráfego).

Os critérios de temporização decorrentes dependem da forma como os pedestres são incluídos no dimensionamento semaforico.

Os pedestres podem estar operando em estágios exclusivos de pedestres ou em estágios concorrentes (em estágios em que os grupos de tráfego veiculares são simultâneos). O plano semaforico pode definir o atendimento da travessia integral num ciclo semaforico (desejável) ou da travessia em etapas (quando houver canteiro ou ilha para espera dos pedestres) em ciclos sucessivos (indesejável). Além disso, os grupos de tráfego de pedestres são críticos ou não. Em geral estas condições podem depender do semáforo e do período do dia.

Os grupos focais de pedestres são temporizados dividindo o tempo mínimo requerido para travessia em verde e piscante por:

$$I_{pisci} = \frac{L'_{pedi}}{V'_{pedi}} \quad (4.17)$$

e

$$g_{pedi} = t_{pedi} - I_{pisci} \quad (4.18)$$

onde V'_{ped} é a velocidade dos pedestres durante o piscante (de 1,2 a 1,4m/s) e L'_{ped} é a distância da etapa mínima de travessia

(considerando a eventual possibilidade de travessia em etapas, quando houver canteiro ou ilha para espera dos pedestres, mesmo quando for menor que a travessia integral). Adotar uma velocidade maior para o pedestre durante o piscante corresponde a assumir que ele normalmente conclui a travessia em passo apressado (critérios antigos de adotar uma velocidade maior para induzir este comportamento não são hoje aceitos). Particularmente em São Paulo, dimensionava-se o piscante com 2,0m/s, ou duas vezes a velocidade normal, para concluir a travessia, adotando a suposição de que o pedestre que recebe o piscante no início da travessia retorna à calçada de origem.

Quando os grupos de tráfego para pedestres em estágios concorrentes determinam o dimensionamento, esta condição pode ser verificada alterando os tempos de verde mínimo para os estágios com travessia de pedestres (se o tempo de verde mínimo com pedestres for maior) para

$$g_{minv}^{ped} = t_{ped} - I_a \quad (4.19)$$

e, caso esta condição seja crítica, adotando os tempos mínimos de pedestres. Caso a condição de verde mínimo de pedestres não seja crítica, adota-se o verde para os pedestres como

$$g_{ped} = g + I_a - I_{pisc} \quad (4.20)$$

onde g e I_a são os tempos normais dimensionados para os grupos de tráfego veiculares paralelos.

Estas são as condições usuais de dimensionamento para pedestres em estágios concorrentes. Quando são adotados intervalos de vermelho de segurança após os tempos de pedestres, estes critérios podem ser mantidos mas pode-se eventualmente avaliar a permissão da conclusão da travessia durante o intervalo de vermelho de segurança, tendo-se

$$g_{minv}^{ped} = t_{ped} - I_a - I_v \quad (4.21)$$

e, caso esta condição seja crítica, adotando os tempos mínimos de pedestres. Caso a condição de verde mínimo de pedestres não seja crítica, adota-se o verde para os pedestres como

$$g_{ped} = g + I_a + I_v - I_{pisc} \quad (4.22)$$

onde g , I_a e I_v são os tempos de entreverdes dimensionados para os grupos de tráfego veiculares paralelos. Até recentemente, não existiam critérios específicos para determinar o vermelho de segurança para pedestres (visto que o piscante cumpre a mesma função, ao menos para o término das travessias, e que a aplicação das fórmulas usuais normalmente sugerem valores negativos, se o piscante é considerado) e seu uso era pouco frequente. A aplicação das fórmulas usuais é recomendada também para pedestres, apenas adicionando um critério adicional de considerar uma distância de 1m ao ponto de conflito avaliado pelo eixo da trajetória dos veículos (na direção mais desfavorável) na avaliação de x_s ou x_e (ou de prolongá-las até ter o pedestre em uma posição na calçada) e notando que a Res.483/2014 do CONTRAN introduziu a exigência de um vermelho de segurança mínimo de 1seg para estágios com pedestres, alterando a prática usual.

Para semáforos com estágios exclusivos para pedestres, sua necessidade de verde deve ser considerada como o tempo de verde mínimo dos pedestres, fazendo

$$t_{côt} = \frac{1,5.t_p + t_{Eped} + 5seg}{1 - Y} \quad (4.23)$$

ou

$$t_{cprát} = \frac{t_p^{rev} + t_{Eped}}{1 - \tilde{Y}} \quad (4.24)$$

com $t_{Eped} = g_{ped} + I_{ped} = g_{ped} + I_{pisc} + I_v$, que fixa a duração do estágio k em t_{Eped} (solicitado pelos pedestres).

Para semáforos com estágios concorrentes para pedestres, sempre que os grupos de tráfego envolvendo pedestres forem críticos (pelo verde mínimo de pedestres), sua necessidade de verde deve ser considerada como o tempo de verde mínimo dos pedestres, como

$$t_{côt}^{rev} = \frac{1,5.t_p^{rev} + t_{Ek} + 5seg}{1 - Y^{rev}} \quad (4.25)$$

ou

$$t_{cprát}^{rev} = \frac{t_p^{rev} + t_{Ek}}{1 - \tilde{Y}^{rev}} \quad (4.26)$$

com $t_p^{rev} = t_p - I_{lk}$, $t_{Ek} = g_{pedk} + I_{pedk}$, $Y^{rev} = Y - y_k$ ou

$\tilde{Y}^{rev} = \tilde{Y} - \tilde{y}_k$, que fixa a duração (violada para pedestres) do estágio k

em t_{Ek} , onde $I_{pedk} = I_{pisc} + I_v$ é o entreverdes para pedestres no estágio

k (anteriormente incluído em t_p), I_{lk} é o tempo perdido na mudança

de estágio k (anteriormente incluído em t_p) e y_k é a taxa de

solicitação de verde crítica no estágio k (anteriormente incluída em

Y). Novamente, se mais de uma condição é violada, a revisão deve

ser feita iterativamente (como o ciclo revisado deve crescer, pode-se

iniciar da menor violação). Portanto, trata-se do procedimento usual

de verificação da condição de verde mínimo (motivada por pedestres).

Dimensionamento com pedestres:

$$t_{côt} = \frac{1,5.t_p + t_{Eped} + 5seg}{1 - Y}$$

$$\text{ou } t_{cprát} = \frac{t_p^{rev} + t_{Eped}}{1 - \tilde{Y}}$$

com $t_{Eped} = g_{ped} + I_{pisc} + I_v$, que fixa a duração do estágio k em t_{Eped}

(solicitado pelos pedestres).

Com estágios exclusivos de pedestres, o dimensionamento com pedestres é utilizado diretamente.

Com estágios de pedestres concorrentes, inicialmente é feito o dimensionamento veicular e, posteriormente, é verificado o verde mínimo determinado pela necessidade de pedestres (da forma usual).

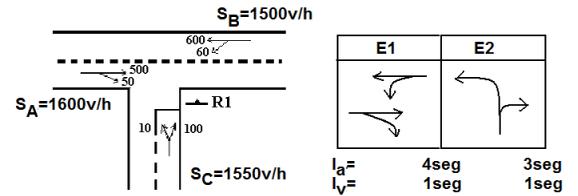
EXERCÍCIO PROPOSTO: Dimensionamento de Semáforo Simples

Considere o plano semafórico apresentado ao lado para operar a interseção discutida anteriormente com um semáforo simples com 2 estágios com aumento da demanda de conversão à esquerda a 150v/h.

Verifique os entreverdes admitindo 7m como largura das vias, que as linhas de retenção estão recuadas de 1,5 e que as velocidades do tráfego são de 50km/h na via principal e 30km/h na via secundária.

Obtenha o dimensionamento do semáforo e verifique o atendimento à demanda majorada e às travessias de pedestres. Qual aumento de demanda (em todos os fluxos) que pode ser acomodado?

Qual o impacto de acomodar um estágio exclusivo de pedestres ($L_{ped}=7m$)? Antes de dimensionar, considere o impacto de introduzir faixas de pedestres alinhadas, demarcadas com largura de 4m.



SOLUÇÃO DO EXERCÍCIO: Dimensionamento de Semáforo Simples

Considerando as velocidades nas vias, os intervalos de amarelo devem ser 4seg e 3seg. (portanto, os valores atualmente adotados estão adequados).

Na mudança de estágio E1/E2, o conflito crítico é entre a saída de A e a entrada de C.

Neste caso, $x_s=1,5+7=8,5m$ e $x_e=1,5m$, tendo-se $I_{vr} = \frac{8,5+6}{50/3,6} - \frac{1,5}{30/3,6} = 0,86seg$ (1seg adequado).

Na mudança de estágio E2/E1, o conflito crítico seria de C à esquerda ($R=6,5m$) com a entrada de B.

Neste caso, $x_s=3,14/2*6,5=10m$ e $x_e=1,5+6,5=8m$, tendo-se $I_{vr} = \frac{10+6}{30/3,6} - \frac{8}{50/3,6} = 1,34seg$ (1seg aceitável).

Estes valores são ilustrativos. Diversas exigências legais aplicam-se aos entreverdes e devem ser observadas.

Com os fluxos de saturação fornecidos, tem-se:

$$y_A = \frac{550}{1600} = 0,3438, \quad y_B = \frac{660}{1500} = 0,4400, \quad y_C = \frac{250}{1550} = 0,1613$$

e, admitindo tempo morto igual ao amarelo menos 1seg, tem-se

$$Y = 44,0 + 16,1 = 60,1\%, \quad t_p = 4 + 3 = 7seg, \quad t_c = \frac{1,5 \cdot 7 + 5}{1 - 0,601} = 39seg \text{ e}$$

$$G_{ef} = 39 - 7 = 32seg, \quad g_{ef}^{E1} = \frac{0,440}{0,601} \cdot 32 = 23seg \Rightarrow g_{E1} = 32 + 3 - 4 = 22seg$$

$$g_{ef}^{E2} = \frac{0,161}{0,601} \cdot 32 = 9seg \Rightarrow g_{E1} = 9 + 2 - 3 = 8seg$$

(ver diagrama de movimento ao lado). Admitindo todas as travessias de pedestres com $L_{ped}=7m$,

$t_{ped} = \frac{7}{1,2} + 3 = 9seg$, . Portanto, para $g_{min,ped} = t_{ped} - I_a$, tem-se:

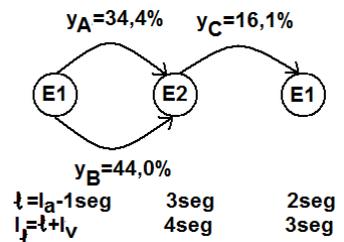
$$g_{min,ped}^{E1} = 9 - 4 = 5seg < 22seg; \quad g_{min,ped}^{E2} = 9 - 3 = 6seg < 8seg \text{ ambas satisfeitas}$$

(de forma geral, impõe-se também $g_{min} = 6a8seg$ para evitar frustração aos condutores).

Voltando ao caso inicial, as capacidades e graus de saturação são:

$$C_A = \frac{23}{39} \cdot 1600 = 943,6v/h, \quad X_A = \frac{550}{943,6} = 0,5829(58,3\%)$$

$$C_B = \frac{23}{39} \cdot 1500 = 884,6v/h, \quad X_B = \frac{660}{884,6} = 0,7461(74,6\%)$$



$$C_c = \frac{9}{39} \cdot 1550 = 357,7 \text{v/h}, X_c = \frac{250}{357,7} = 0,6989(69,9\%)$$

A reserva de capacidade global com semáforo (com ciclo máximo de 120seg) é:

$$X_g = \frac{Y}{U} = Y \frac{t_c}{G_{ef}} = Y \cdot \frac{t_c}{t_c - t_p} \Rightarrow Y_{\text{máx}} = X_{\text{máx}} \cdot \frac{t_{\text{cmáx}} - t_p}{t_{\text{cmáx}}} = 1 \cdot \frac{120 - 7}{120} = 0,94(94\%)$$

$$R_Y = Y_{\text{máx}} - Y = 0,94 - 0,601 = 0,34(34\%) \text{ e } R_Q = \frac{R_Y}{Y} = \frac{0,34}{0,601} = 0,566(56,6\%).$$

Com crescimento maior, usar ciclo prático. Exemplo: demanda 60% maior, $X_{\text{máx}} = 0,95(95\%)$ na via principal:

$$y_A = \frac{1,6 \cdot 550}{1600} = 0,5500, y_B = \frac{1,6 \cdot 660}{1500} = 0,7040, y_C = \frac{1,6 \cdot 250}{1550} = 0,2581$$

$$Y = 70,4 + 25,8 = 96,2\%, t_c = \frac{1,5 \cdot 7 + 5}{1 - 0,962} = 408 \text{seg} > t_{\text{cmáx}} = 120 \text{seg} \text{ (mesmo } t_{\text{cmin}} = \frac{7}{1 - 0,962} = 184 \text{seg} > t_{\text{cmáx}} \text{)}:$$

$$\tilde{y}_{E1} = \frac{y_{E1}}{X_{\text{máx}}} = \frac{0,704}{0,95} = 0,741; u_{E1} = \tilde{y}_{E1} \Rightarrow g_{ef}^{E1} = 0,741 \cdot 120 = 89 \text{seg}; g_{E1} = 89 + 3 - 4 = 88 \text{seg},$$

$$\text{e, como resíduo, } g_{ef}^{E2} = 120 - 7 - 89 = 24 \text{seg}; g_{E2} = 24 + 2 - 3 = 23 \text{seg} \text{ (} u_{E2}^E = \frac{24}{120} = 0,20 \text{)}.$$

Com a introdução do estágio exclusivo de pedestres, os entreverdes devem ser revisados.

As velocidades nas vias são as mesmas e os intervalos de amarelo devem permanecer 4seg e 3seg.

Os vermelhos de segurança devem considerar a sequência de estágios e a introdução das faixas de pedestres.

O estágio de pedestres pode vir após E1 ou após E2 e os entreverdes são diferentes.

Não há um critério uniforme para esta decisão e será admitido o estágio após E2 (como E3), com $\delta_{\text{seg}} = 1 \text{seg}$.

Na mudança de estágio E1/E2, o conflito crítico continua entre a saída de A e a entrada de C.

$$\text{Agora, } x_s = 1,5 + 4 + 7 = 12,5 \text{m e } x_e = 4 + 1,5 = 5,5 \text{m, tendo-se } I_{vr} = \frac{12,5 + 6}{50/3,6} - \frac{5,5}{30/3,6} = 0,67 \text{seg} \text{ (1seg adequado)}.$$

Na mudança de estágio E2/E3, o conflito crítico seria de C à esquerda ($R=6,5 \text{m}$) com a entrada de E3.

$$\text{Neste caso, } x_s = 1,5 + 2 + 3,14/2 \cdot 6,5 + 2 = 15,5 \text{m e } x_e \sim 1 \text{m, tendo-se } I_{vr} = \frac{15,5 + 6}{30/3,6} - \frac{1}{1,2} + 1 = 2,75 \text{seg} \text{ (3seg aceitável)}.$$

$$\text{Na mudança de estágio E3/E1, o piscante é } I_{pr} = \frac{7}{1,2} = 5,83 \text{seg} \text{ (5 ou 6seg aceitável) e normalmente } I_{vr} = 0 \text{ ou } 1 \text{seg}$$

Estes valores são novamente ilustrativos (há exigências legais para os entreverdes que devem ser observadas).

Com um estágio exclusivo de pedestres, adotando um estágio E3 com $I_{ve3} = 1 \text{seg}$, $I_{ve1} = 1 \text{seg}$ e $I_{ve2} = 3 \text{seg}$, tem-se:

$$\delta_{\text{ped}} = 3 \text{seg}, t_{\text{ped}} = \frac{7}{1,2} + 3 = 9 \text{seg}, t_{\text{Eped}} = t_{\text{ped}} + I_v = 9 + 1 = 10 \text{seg}, t_p \cong 3 + 1 + 2 + 3 = 9 \text{seg}, t_c = \frac{1,5 \cdot 9 + 10 + 5}{1 - 0,601} = 72 \text{seg}$$

$$G_{ef} = 72 - 9 - 10 = 53 \text{seg}, g_{ef}^{E1} = \frac{0,440}{0,601} \cdot 53 = 38 \text{seg} \Rightarrow g_{E1} = 38 + 3 - 4 = 37 \text{seg}$$

$$g_{ef}^{E2} = \frac{0,161}{0,601} \cdot 53 = 15 \text{seg} \Rightarrow g_{E2} = 15 + 2 - 3 = 14 \text{seg}$$

$$\text{adotando } I_{\text{pisc}} = 5 \text{seg} \Rightarrow g_{\text{ped}} = t_{\text{ped}} - I_{\text{pisc}} = 9 - 5 = 4 \text{seg} \text{ em E3}$$

(a recomendação geral, é $g_{\text{ped,min}} = 4 \text{ a } 7 \text{seg}$ para evitar frustração aos pedestres).

Em geral, os estágios de pedestres tem duração fixa embora sejam eventualmente opcionais

(atuados por botoeiras). O dimensionamento do estágio de pedestres exclusivo não depende de ser atuado.

No entanto, seu impacto no dimensionamento do ciclo pode ponderar este aspecto

(neste caso t_{ped} é ponderado pela probabilidade de haver acionamento pelos pedestres em cada ciclo).

4.7.4. Interseções Complexas e Interseções Compostas

A discussão anterior deve permitir analisar a operação de grande parte das interseções semaforizadas. No entanto, existem também várias configurações de interseções que exigem técnicas especiais de análise ou de intervenção. Este item discute alguns casos de interseções que exigem intervenções especiais, enquanto o item seguinte trata de casos de interseções em que alguns movimentos ou aproximações exigem técnicas especiais de análise (usualmente adicionadas aos esquemas tradicionais discutidos nos itens precedentes). Ambas as discussões são feitas no contexto dos semáforos isolados e programados em tempos fixos (adiante são adicionados recursos como atuação e coordenação semaforica ou controle em tempo real).

Interseções complexas ocorrem frequentemente em área que possuem sistemas viários irregulares ou quando o crescimento da demanda de tráfego faz com que movimentos conflitantes (tipicamente as conversões à esquerda em interseções) não possam ser tratadas de forma simples (nem proibidas localmente, pela ausência de vias alternativas para atender seus deslocamentos).

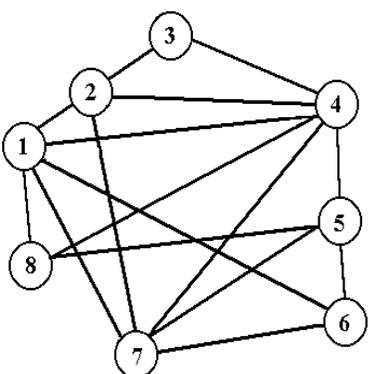
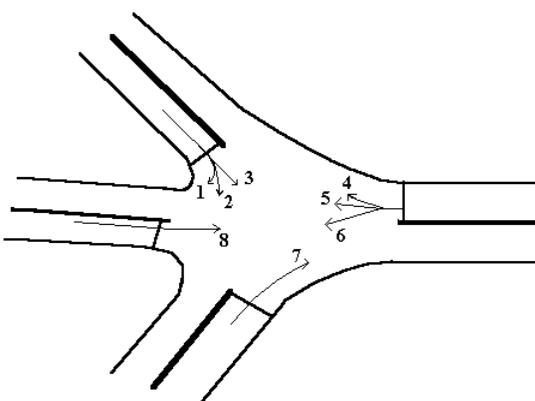
Neste caso, as técnicas de análise previamente discutidas (como o diagrama de movimentos concordantes ou compatíveis) podem ser facilmente utilizadas para demonstrar que a operação semaforica exige muitos estágios, o que normalmente significa que cada movimento tem de esperar diversos estágios para autorização para passar pela interseção (com capacidade reduzida ao verde dos estágios em que opera).

Ainda mais preocupante é o fato de que muitas vezes estes esquemas com muitos estágios tem de buscar a operação dos movimentos críticos em mais de um estágio (para aumentar sua capacidade), o que gera conflitos em cada uma das aproximações e eventualmente gera configurações de estágios que são incomuns e/ou violam a expectativa dos usuários da via (o que pode acarretar problemas de segurança com acidentes de tráfego e grande risco ou desconforto aos usuários).

Um exemplo clássico é a interseção analisada no estudo pioneiro de Webster&Cobbe (1966), previamente discutida, onde a confluência de 5 aproximações gera a necessidade de 4 estágios (mesmo ignorando as necessidades dos pedestres).

Outro exemplo, no esquema ao lado, mostra uma interseção onde 2 movimentos de conversão à esquerda (2 e 6) de vias são significativos e, em conjunto com os fluxos diretos principais (2, 5 e 7), são fluxos fortes que tem de ser atendidos localmente. Gera-se um plano semaforico com pelo menos 3 estágios (ignorando novamente as necessidades dos pedestres) em que diversas conversões operam em mais de um estágio e, pelo menos em parte do ciclo, separados dos demais movimentos da sua aproximação, e alguns fluxos fortes operam somente em um dos estágios (o que denuncia problemas de capacidade ou necessidade de ciclos semaforicos maiores, ambos acarretando filas/atrasos relevantes para os usuários).

Estes planos semaforicos complexos podem, eventualmente com algum cuidado adicional, ser adotados. O dimensionamento dos tempos semaforicos é um pouco mais trabalhoso (tanto os entreverdes, que tem de examinar configurações de conflito menos usuais, quanto os verdes e o ciclo, que podem ter de tratar a operação sobre-posta entre os grupos de tráfego e alocar os tempos em níveis sucessivos, até

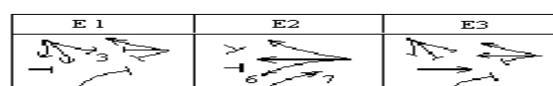


Estágios

1-2-3-4

4-5-6-7

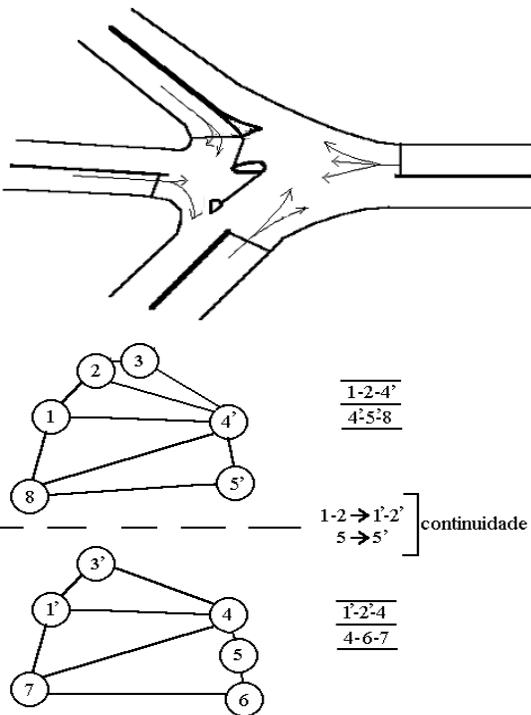
4-5-8



completar o dimensionamento de todos os componentes do ciclo). No entanto, a complexidade adicional normalmente acarreta a saturação precoce da interseção semaforizada e, diante da impossibilidade de simplificar a operação com a proibição local de movimentos conflitantes, exige estratégias de intervenção adicionais.

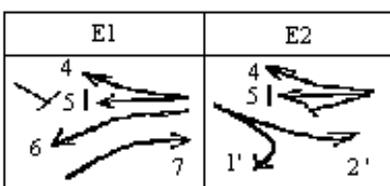
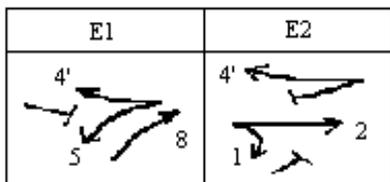
Estas intervenções adicionais normalmente correspondem à combinação das estratégias de separação de conflitos no tempo e no espaço (semaforização e canalização), anteriormente discutidas, e sua implementação utilizar a decomposição da interseção original em interseções parciais, através da introdução de ilhas e linhas de retenção intermediárias. Esta estratégia gera as interseções compostas.

No exemplo discutido acima, a aplicação desta estratégia está ilustrada ao lado. Pode-se notar que basicamente a intervenção transformou a interseção original em 2 interseções menores e mais simples.



A análise de cada interseção parcial pode ser feita da mesma forma e permite concluir, neste exemplo, que cada interseção parcial pode ser operada com 2 estágios. No entanto, pelo fato de fazer alguns movimentos terem de cruzar mais de uma linha de retenção (o efeito básico da decomposição da interseção original) e de ter um espaço para acomodação de filas intermediárias reduzido (pelo menos quando se aceita a condição de manter a área ocupada pela interseção original, com poucas adaptações), surgem restrições de acoplamento entre os semáforos adjacentes.

Além de ter de manter um ciclo semaforico comum em ambos os semáforos (uma restrição usualmente admitida nas estratégias de coordenação semaforica, em geral, como discutido adiante), estas restrições de acoplamento normalmente exigem o início simultâneo (a menos de pequenas defasagens) e a duração balanceada (em termos de demanda e capacidade) dos estágios que servem linhas de retenção sucessivas de fluxos fortes.

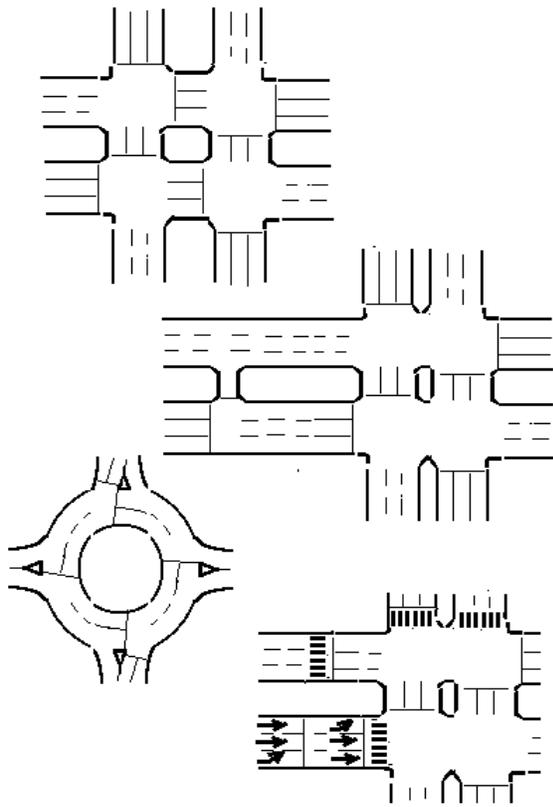


Entretanto, é em geral possível operar movimentos secundários simultaneamente com fluxos principais conflitantes (retendo seus os veículos dos movimentos secundários nas filas acomodadas pelas retenções intermediárias) e ampliar o tempo que permite a operação dos fluxos fortes (aumentando o número de estágios em que opera ou reduzindo o número de estágios em que não opera). Ambos os efeitos permitem aumentar a capacidade na interseção semaforizada e/ou reduzir seu tempo de ciclo adotado (o que reduz os atrasos/filas para os usuários da via).

Para interseções com configurações atípicas, a análise e a intervenção necessária é naturalmente específica de cada local (devendo ponderar tanto as características da interseção quanto das vias adjacentes que podem prover rotas alternativas para os movimentos locais).

No entanto, a mesma estratégia é também comumente utilizada em uma série de contextos bastante típicos, com a mesma eficiência e adequação. Alguns destes contextos típicos são usuais de interseções originalmente complexas ou em um conjunto de interseções próximas (que são similares a interseções compostas), entre estes:

- semáforos de vias com canteiros centrais amplos com fluxos de conversão relevante (ou semáforos de vias de mão única paralelas, usualmente implantadas para simplificar a circulação em áreas centrais);
- semáforos que incorporam retornos no canteiro central instalados próximos à interseção principal (servindo movimentos desviados de conversão à esquerda que se transformam em retornos adiante ou conversões à direita) e que exigem a semaforização dos retornos para evitar bloqueios gerados pela fila formada no semáforo principal;
- semáforos implantados em rotatórias (uma intervenção eventualmente inevitável, pelo menos em áreas urbanas mais adensadas, em que rotatórias, convencionais ou não, seriam saturadas por um nível de demanda superior à sua capacidade);
- interseções com pré-semáforos e/ou pós-semáforos destinados a eliminar ou dar mais eficiências a estágios de pedestre ou conversões à esquerda nos semáforos principais da interseções (também para conversões à direita quando há faixas exclusivas de ônibus no canteiro central ou para conversões de ciclistas).



Todos estes casos podem ser tratados como interseções compostas. A configuração destas interseções em geral tem de ser adaptada ao seu plano de operação. Não existe uma técnica simples para dimensionar e acoplar semáforos em interseções compostas. Em princípio, as mesmas técnicas discutidas adiante para obter planos adequados de coordenação semaforica podem ser utilizadas (em geral utilizando *softwares* especializados). No entanto, estes casos são claramente mais simples de analisar (embora possam ser mais difíceis de programar com eficiência, em vista das restrições decorrentes dos espaços reduzidos de acomodação de filas).

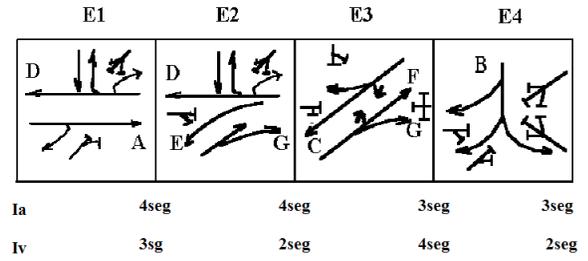
Em geral, o dimensionamento inicial da interseção original é uma diretriz básica eficaz para orientar o dimensionamento da interseção composta. É usualmente fácil adaptar este dimensionamento inicial para eliminar os estágios excluídos (acomodando filas intermediárias de movimentos secundários), ajustar o início de estágios acoplados para reduzir as filas intermediárias geradas por fluxos fortes, impor o balanceamento de capacidade para estes fluxos fortes (balanceando o verde em linhas de retenção sucessivas com a adição do tempo necessário para escoar as filas intermediárias, se necessário), além de controlar o ciclo comum reduzido. Este último aspecto, além de permitir obter o ganho de eficiência potencial, é a estratégia residual para reduzir as filas intermediárias e impedir interações de bloqueio entre os fluxos fortes acoplados (que podem comprometer a operação geral da interseção decomposta).

EXERCÍCIO PROPOSTO: Dimensionamento de Semáforo em Interseção Complexa (Webster&Cobbe/1966).

Considere o plano semafórico apresentado ao lado para operar a interseção complexa discutida anteriormente.

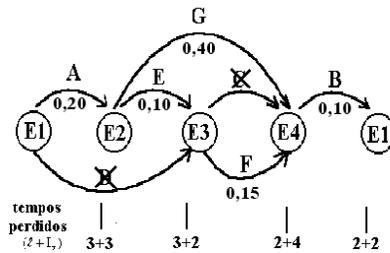
Dimensione o semáforo, com os entresferdes fornecidos, para um período com as seguintes demandas e fluxos de saturação:

GT	A	B	C	D	E	F	G
Q (v/h)	640	160	300	900	150	225	640
S (v/h)	3200	1600	3000	3000	1500	1500	1600



SOLUÇÃO DO EXERCÍCIO: Dimensionamento de Semáforo Complexo

A complexidade da interseção é, em princípio, decorrente da necessidade de 4 estágios, com grupos de tráfego (D e G) com operação sobreposta em 2 estágios. Com os dados fornecidos, o diagrama de movimento seria o seguinte:



Podemos analisar somente as sequências A-G-B e A-E-F-G (as demais são sempre menos críticas). Note que A-E é pior que D (já que $y_{AE} = y_D = 0,30$ e $I_{\ell}^{AE} > I_{\ell}^D$) e que F é pior que C (já que $I_{\ell}^F = I_{\ell}^C$, mas $y_F > y_D$). Portanto:

$$1^{\circ} \text{ caso) } A, G, B \Rightarrow t_c = \frac{1,5 \cdot 16 + 5}{1 - 0,700} \cong 97 \text{seg}$$

$$2^{\circ} \text{ caso) } A, E, F, B \Rightarrow t_c = \frac{1,5 \cdot 21 + 5}{1 - 0,550} \cong 81 \text{seg}$$

assim, o caso mais crítico é o 1º caso, adotando-se $t_c = 97 \text{seg}$. A alocação do tempo de verde efetivo é a seguinte:

$$g_{ef} = (97 - 16) \cong 81 \text{ seg}$$

$$g_{ef}^1 = \frac{0,20}{0,70} \cdot 81 = 23 \text{ seg}$$

$$g_{ef}^{23} = \frac{0,40}{0,70} \cdot 81 = 46 \text{ seg}$$

$$g_{ef}^4 = \frac{0,10}{0,70} \cdot 81 = 12 \text{ seg}$$

e, para os estágios E2/E3 com operação de G superposta, tem-se:

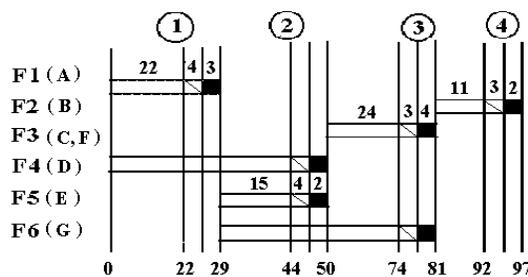
$$g_{ef}^{2,3} = g_{ef}^{23} - I_{\ell}^{23} = 46 - 5 = 41 \text{ seg}$$

$$Y^{23} = y_E + y_F = 0,25$$

$$g_{ef}^2 = \frac{0,10}{0,25} \cdot 41 = 16 \text{ seg}$$

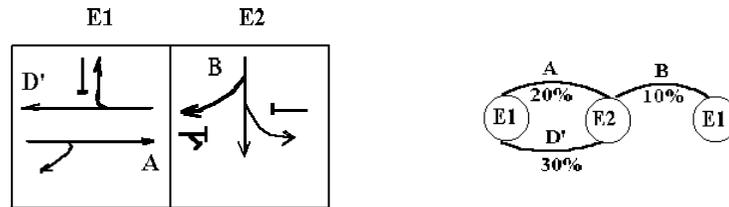
$$g_{ef}^3 = \frac{0,15}{0,25} \cdot 41 = 25 \text{ seg}.$$

Como $g = g_{ef} + \ell_i - I_a = g_{ef} - 1 \text{seg}$, o diagrama de alocação de tempos proposto é o seguinte:



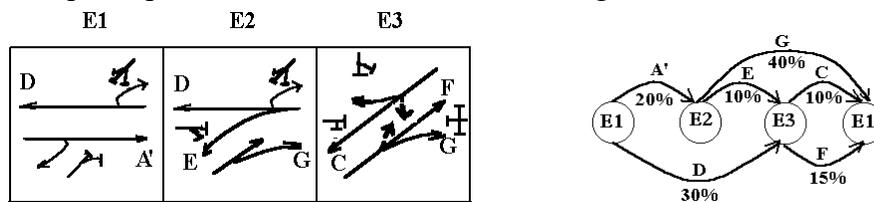
A decomposição da interseção original seria necessária para níveis de demanda maiores. Na verdade, o exemplo de Webster&Cobbe (1966) já era uma interseção decomposta. Em função das grandes distâncias na interseção, a decomposição pode ser vantajosa em geral.

Na interseção em discussão, a alternativa natural de decomposição seria separar a interseção com B. O plano semafórico adotado para operar a entrada de B e o diagrama de movimento correspondente são



(o tempo de ciclo recomendado de $t_c = \frac{1,5 \cdot 10 + 5}{1 - 0,40} = 33\text{seg}$ para operação independente da entrada de B).

O plano semafórico adotado para operar o cruzamento com CF e o diagrama de movimento correspondente são



(o tempo de ciclo recomendado definido pelo maior entre o determinado pela seqüência A'G, que seria $t_c = \frac{1,5 \cdot 10 + 5}{1 - 0,60} = 50\text{seg}$, ou pela seqüência A'EF, que seria $t_c = \frac{1,5 \cdot 15 + 5}{1 - 0,45} = 50\text{seg}$).

Portanto, ambos os semáforos devem operar com o tempo de ciclo de 50 segundos (o segundo cruzamento é mais crítico). A repartição proporcional de verde levaria aos tempos seguintes:

- no primeiro cruzamento:

$$E1: g_{ef1} = \frac{0,30}{0,40} \cdot (50 - 10) = 30\text{seg} \text{ e } g_1 = 29\text{seg} \text{ para A e D'};$$

$$E2: g_{ef2} = \frac{0,10}{0,40} \cdot (50 - 10) = 10\text{seg} \text{ e } g_2 = 9\text{seg} \text{ para B};$$

- no segundo cruzamento:

$$E1: g_{ef1} = \frac{0,20}{0,60} \cdot (50 - 10) = 13\text{seg} \text{ e } g_1 = 12\text{seg} \text{ para A'};$$

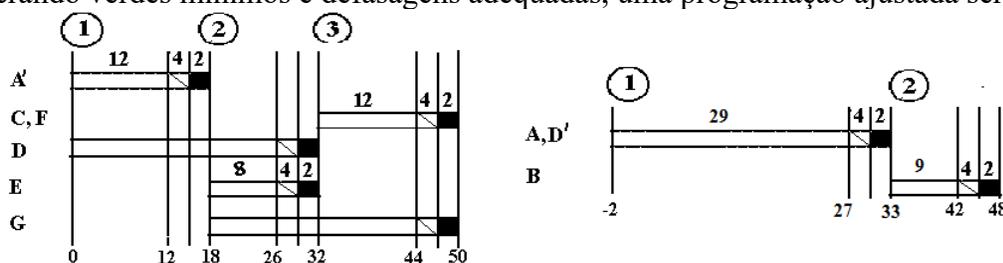
$$E2/E3: g_{ef23} = \frac{0,40}{0,60} \cdot (50 - 10) = 27\text{seg} \text{ e } g_{23} = 26\text{seg} \text{ para G};$$

$$E2: g_{ef2} = \frac{0,10}{0,25} \cdot (27 - 5) = 9\text{seg} \text{ e } g_2 = 8\text{seg} \text{ para E};$$

$$E3: g_{ef3} = \frac{0,15}{0,25} \cdot (27 - 5) = 13\text{seg} \text{ e } g_3 = 12\text{seg} \text{ para C e F};$$

$$E1/E2: g_{ef12} = 14 + 5 + 9 = 28\text{seg} \text{ e } g_{12} = 27\text{seg} \text{ para D}.$$

Considerando verdes mínimos e defasagens adequadas, uma programação ajustada seria a seguinte:



4.7.5. Casos Especiais de Dimensionamento dos Semáforos

Os procedimentos básicos discutidos são parte essencial dos conhecimentos a serem dominados por qualquer profissional da Engenharia de Tráfego envolvido com a operação semafórica.

No entanto, diversos casos especiais podem ser encontrados em que as técnicas de dimensionamento básico não são adequadas. A maior parte destes casos corresponde a situações em que o fluxo de saturação (isto é, a eficiência de escoamento das filas para um dado grupo de tráfego) depende dos tempos semafóricos e um processo iterativo de dimensionamento tem de ser realizado para avaliar esta interdependência e obter resultados consistentes.

O exemplo mais simples, que será inicialmente discutido com brevidade, corresponde à existência de faixas curtas. Com uma faixa adicional de extensão reduzida z que aumenta o fluxo de saturação de um valor S_ℓ em relação à seção anterior (sem a faixa adicional, o fluxo de saturação é S), discutiu-se anteriormente que sua contribuição ocorre durante a dissipação da fila acumulada na extensão reduzida que pode armazenar $n_\ell = z/\ell_v$ veículos, onde ℓ_v é a extensão média ocupada por cada veículo em fila, com duração $g_\ell = \min\left\{\frac{n_\ell}{S_\ell}; g_{ef}\right\}$ em verde efetivo (neste período, o fluxo de saturação será $S + S_\ell$, em $g_{ef} - g_\ell$ o fluxo de saturação será S).

Um dimensionamento deve avaliar o fluxo de saturação médio como $\bar{S} = \frac{g_\ell}{g_{ef}} \cdot (S + S_\ell) + \frac{g_{ef} - g_\ell}{g_{ef}} \cdot S = S + \frac{g_\ell}{g_{ef}} \cdot S_\ell$, $\bar{S} = S + \frac{n_\ell}{g_{ef}}$ (a forma mais simples) ou $\bar{S} = (S + S_\ell) - \frac{g_{ef} - g_\ell}{g_{ef}} \cdot S_\ell$, o que depende dos tempos semafóricos (a duração do verde, no caso). Trivialmente, admite-se um fluxo de saturação médio tentativo (ou uma duração de verde tentativa) e obtém-se o dimensionamento recomendado. O processo pode ser repetido revisando o valor adotado para o fluxo de saturação (e normalmente converge em poucas iterações).

O efeito de bloqueio gerados pelos fluxos de pedestres e ciclistas é também considerado e foi aprimorado no U.S.HCM/2000 (ainda vem sofrendo revisões). O procedimento é uma evolução dos critérios também originais propostos em versões anteriores, que eram empíricos. Por exemplo, o U.S.HCM/1985 incluía o efeito dos

pedestres no fator de correção $f_{ped} = 0,85 - \frac{q_{ped}}{2100}$, combinado com o

fator de correção para as conversões à direita (ponderada pela proporção de conversões no estágio com pedestres, no caso de haver uma faixa de fluxo compartilhado ou de haver também um estágio exclusivo de conversões à direita). Este efeito era ignorado por Webster e Cobbe, em 1966, pela formulação australiana original, do ARR123 de 1981, pela revisão dos critérios britânicos, do RR67 de 1986, sendo que a revisão australiana, do ARR180 de 1993, por generalidade adotava uma formulação similar a do U.S.HCM/1985 (embora recomende considerar o efeito dos pedestres por uma redução do tempo morto inicial como a melhor representação).

Dimensionamento com faixas curtas (extensão z) em alguma aproximação, com um valor inicial para g, g_{ef} :

- dados S (fluxo de saturação sem a faixa curta) e S_ℓ (fluxo de saturação adicional devido à faixa curta), obter o fluxo médio de saturação por

$$\bar{S} = (S + S_\ell) - \frac{g_{ef} - g_\ell}{g_{ef}} \cdot S_\ell$$

$$\text{ou } \bar{S} = S + \frac{n_\ell}{g_{ef}}$$

onde $n_\ell = z/\ell_v$ e $g_\ell = \min\left\{\frac{n_\ell}{S_\ell}; g_{ef}\right\}$ (pode admitir um valor inicial de \bar{S});

- obter o dimensionamento recomendado utilizando \bar{S} , com um novo valor de g, g_{ef} , revisando o valor de \bar{S} e reiterando o dimensionamento até a convergência (g consistente).

A versão do U.S.HCM/2000 foi um aprimoramento baseado em estudos de campo, embora ainda possa ser considerado insatisfatório. O mesmo procedimento deve ser aplicado para analisar o impacto nas conversões à direita e/ou à esquerda, considerando pedestres e ciclistas, podendo ser resumido nas seguintes considerações:

- admite-se que pedestres e ciclistas têm preferências sobre as conversões no estágio concorrente (isto é, exceto em estágios com conversão protegida);
- estimativa da ocupância das faixas de tráfego pelos pedestres em

$$\text{travessia: } O_p = \begin{cases} q_{pg}/2000, & \text{para } q_p \leq 1000 \text{ ped/h} \\ 0,4 + q_{pg}/10000, & \text{para } q_p > 1000 \text{ ped/h} \end{cases},$$

$$q_p \leq 5000 \text{ ped/h} \\ \text{e } O_p \leq 0,9, \text{ onde } q_{pg} = \frac{q_p}{u_{pef}} \text{ é o fluxo de pedestres no verde}$$

$$(u_{pef} = \frac{g_{pef}}{t_c}, g_{pef} = g_{ped} \text{ ou } g_{pef} = g_{ped} + I_{pisc} - \frac{L}{V_p}); \text{ para conversões à}$$

direita: admite-se $O_d = O_p$; para conversões à esquerda, a ocupância relevante é a do verde útil na ocorrência de uma brecha para

$$\text{conversão: é } O_e = \begin{cases} 0, & \text{se } g_{pef} \leq g_{s0} \\ O_u \cdot e^{-5 \cdot q_0 / 3600}, & \text{c.c.} \end{cases} \text{ onde } g_s = G_s - \ell \leq g_{ef},$$

$$G_s = \frac{q_0 \cdot r}{S_0 - q_0}, O_u = O_p \cdot \left(1 - 0,5 \cdot \frac{g_s}{g_p} \right);$$

- efeito de bloqueio no estágio com conversões permitidas (com preferência dos pedestres): se $N_{saída} = N_{entrada}$ (faixas de saída e entrada das conversões): $A_p = 1 - O_c$; se $N_{saída} > N_{entrada}$ (veículos contornam os pedestres): $A_p = 1 - 0,6 \cdot O_c$ (O_c dado por O_d ou O_e);

- fator de correção (conjunto com estágio protegido para as conversões, com duração g_{dA} , se houver): para conversões à direita

$$P_{cdA} = \frac{g_{dA}}{g_d} \text{ e } f_{pd} = 1 - P_{cd} \cdot (1 - A_{pd}) \cdot (1 - P_{cdA}), \text{ onde } P_{cdA} \text{ é a}$$

proporção de pedestres no estágio protegido de conversões à direita;

$$\text{para conversões à esquerda } P_{ceA} = \frac{1 - f_{LTP}}{0,95} \text{ e}$$

$$f_{pe} = 1 - P_{ce} \cdot (1 - A_{pe}) \cdot (1 - P_{ceA}), \text{ onde } P_{ceA} \text{ é a proporção de pedestres}$$

no estágio protegido de conversões à esquerda e f_{LTP} é o fator de

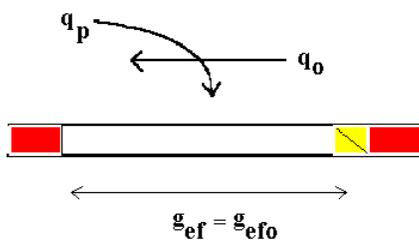
conversões à esquerda no estágio de conversões permitidas;

- critérios similares são utilizados para avaliar o efeito de bloqueio de ciclistas: se os ciclistas estão entrelaçam com as conversões antes da interseção, seu efeito é desprezado; caso contrário, deve-se considerar o efeito combinado de pedestres e bicicletas; para conversões à direita,

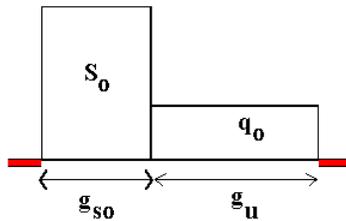
$$q_{bicg} = \frac{q_{bic}}{u_{bef}}, \text{ onde } u_{bef} = \frac{g_{bic}}{t_c}, \text{ e } O_b = 0,02 + \frac{q_{bicg}}{2700} \leq 0,72, \text{ fazendo-se}$$

então $O_d = O_p + O_b - O_p \cdot O_b$; para conversões à esquerda, não há recomendação (embora possa-se supor uma combinação similar).

Os critérios são, no entanto, ainda incipientes. Caberia pelo menos distinguir o bloqueio das conversões (O_c e $t_b = O_c \cdot g$) do bloqueio dos movimentos diretos (em geral há n_a posições abrigadas geradas pelo desalinhamento das travessias e $O'_c \cong (1 - n_a/n_c) \cdot O_c$ com $n_c = S_c \cdot t_b$).



no fluxo oposto:



Outra ilustração, discutida a seguir, é a análise de planos semafóricos com conversões à esquerda permitidas, cuja operação interage com outros grupos de tráfego na sua mesma aproximação e na aproximação correspondente ao sentido oposto. A operação das conversões à esquerda permitidas pode ser dividida em quatro tipos de período:

- o período de vermelho para o estágio considerado (somente a via transversal opera);
- o início da operação do estágio considerado g_{so} , em que são dissipadas as filas do fluxo oposto e não existem brechas para as conversões permitidas;
- a operação normal do estágio considerado g_u , em que as conversões podem utilizar brechas no fluxo oposto q_o para realizar seu movimento; e
- o entreverdes entre o estágio considerado e o seguinte, em que normalmente haverá a oportunidade para que alguns veículos esperando a conversão na interseção executem a manobra ao limpar a área de conflito para a via transversal.

A duração de cada um destes períodos depende dos tempos semafóricos e influencia a capacidade para o grupo de tráfego com conversão permitida. O tempo necessário para escoar as filas no fluxo oposto g_{so} depende da duração do seu vermelho, podendo ser

estimado por $g_{so} = \frac{q_o \cdot r_{efo}}{S_o - q_o}$. Portanto, o tempo de verde no qual as

brechas podem ser usadas, que é $g_u = g_{ef} - g_{so}$, também depende dos tempos semafóricos. A contribuição por ciclo semafórico do fluxo de conversões possível durante o verde útil é S_u (que é função da sua brecha crítica e do fluxo oposto q_o) ou $S_u \cdot g_u$ veículos. A

contribuição dos veículos escoados no entreverdes é n_f (em geral 1 a 2 veículos). Então, a capacidade total de escoamento das conversões

permitidas é $C_p = \frac{g_u}{t_c} \cdot S_u + \frac{n_f}{t_c}$ (função dos tempos semafóricos).

O dimensionamento básico discutido anteriormente pode ser aplicado a este caso se o fluxo de saturação das conversões permitidas for

estimada por $\bar{S}_e = \frac{g_u}{g_{ef}} \cdot S_u + \frac{n_f}{g_{ef}}$ (que, no entanto, deve ser revisado a

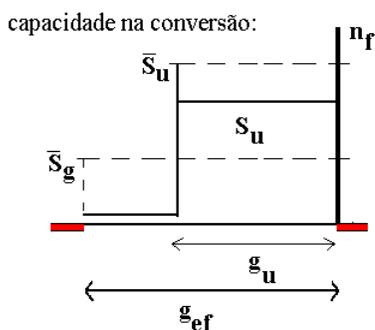
cada novo dimensionamento até atingir valores razoavelmente consistentes), com o mesmo verde efetivo geral. Como discutido anteriormente, este resultado permite determinar um fator equivalente para as conversões à esquerda permitidas no período em que a operação é simultânea com os demais fluxos da aproximação (g_{ef} na

discussão acima) como $e_{ce} = \frac{S_{tf}}{S_{ef}}$, onde S_{tf} , \bar{S}_{ef} são os fluxos de

saturação por faixa dos fluxos normais (diretos e à direita) e das conversões à esquerda permitidas, e também determinar o impacto das conversões permitidas na aproximação toda com $S_T = S_{Tt} \cdot f_{ce}$.

Um procedimento ainda melhor, seria aumentar o tempo morto das conversões permitidas para $\ell_p = \ell + g_{so}$ e fazer o dimensionamento

tomando o verde efetivo específico como g_u com $\bar{S}_u = S_u + \frac{n_f}{g_u}$ (de



Dimensionamento com conversões permitidas em alguma aproximação, com um valor inicial para g, g_{ef} :

- dados Q_{fo}, S_{fo} (demanda e fluxo de saturação no fluxo oposto) tem-se

$$g_{so} = \frac{q_o \cdot r_{efo}}{S_o - q_o}, \quad g_u = g_{ef} - g_{so},$$

$$C_p = \frac{g_u}{t_c} \cdot S_u + \frac{n_f}{t_c} \quad \text{e} \quad e_{ce} = \frac{S_{tf}}{S_{ef}}$$

onde $S_u = \frac{e^{-q_o \cdot \alpha}}{1 - e^{-q_o \cdot \beta}} \cdot q_o$ com $q_o = Q_o$

(exemplo de fórmula poissoniana);

- verificar a capacidade para o

movimento permitido: $Q_{ce} < C_p$, obter

o fluxo de saturação total $S_T = S_{Tt} \cdot f_{ce}$

e o dimensionamento recomendado,

novos valores de $g, g_{ef}, g_{so}, g_u, C_p, e_{ce}$,

e reiterar o procedimento até a

convergência (g consistente).

novo iterativamente) e tratando as conversões à esquerda como um grupo de tráfego distinto dos fluxos direto e à direita (cujo fluxo de saturação seria reduzido para $S_t = S_T - \frac{g_u}{g_{ef}} \cdot \bar{S}_u$). A escolha entre estas formas tem pouca importância para o dimensionamento (visto que os valores devem ser consistentes quando for obtida a convergência). No entanto, a alternativa avalia de forma mais adequada as variáveis de serviço (filas, atrasos).

Como última ilustração, pode-se considerar as aproximações em que há faixas compartilhadas em que as conversões nem sempre operam junto com os demais fluxos e há efeitos especiais de interação. Este também foi um caso discutido anteriormente, distinguindo as aproximações com uma única faixa ou com múltiplas faixas. Este caso não será discutido detalhadamente aqui mas deve-se lembrar que a interação é normalmente avaliada estimando um tempo de operação sem bloqueio (livre) g_f , com $g_f = \frac{a_d}{S_t}$, onde $a_d = \frac{p_d}{1-p_d} \cdot (1-p_d^{m_d})$ é o número médio de veículos escoados antes do bloqueio, S_t é o fluxo de saturação normal dos movimentos autorizados (sem bloqueio), $m_d = S_t \cdot g_d$ é o número máximo de veículos autorizados que poderia ser escoado (se nenhum veículo bloqueasse a operação) e p_d é a proporção de veículos autorizados na faixa compartilhada.

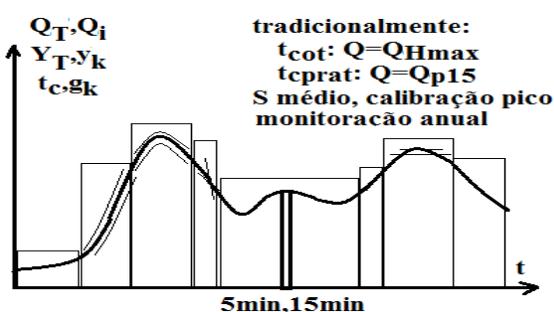
Então, pelo que foi dito anteriormente, o fluxo de saturação médio da faixa compartilhada seria $\bar{S}_m = \frac{S_t \cdot g_t + a_d}{g_t}$ referido a g_t (o período normal de operação de t , sem interação) ou $\bar{S}_d = \frac{S_t \cdot g_t + a_d}{g_t + g_d}$ referido a $g_t + g_d$ (o período total de operação, com ou sem interação). Este é o fluxo de saturação na linha de retenção para todo o grupo de faixas, que depende dos tempos semafóricos.

De forma geral, diversas situações em que uma dada aproximação tem mais de um grupo de tráfego e/ou em que as características físicas da via variam ao longo da aproximação (como o caso de faixas de extensão reduzida, proibição de estacionamento por trechos reduzidos, baias de conversão) exigem tratamentos similares (existem diversos softwares especializados que tornam a tarefa mais fácil).

A discussão destes casos mostra os princípios e procedimentos básicos adotados nos demais casos: utiliza-se um processo iterativo para calcular fluxos de saturação médios e fazer o dimensionamento até atingir valores consistentes entre iterações sucessivas. Relembrando a discussão feita no capítulo anterior sobre os casos em que o fluxo de saturação varia com a operação semafórica, pode-se ver uma relação direta com a análise feita aqui com conversões permitidas. A situação é similar para os demais casos anteriormente discutidos. E o aspecto mais crítico é a revisão dos fluxos de saturação estimados, considerando a interação relevante entre os grupos de tráfego.

4.7.6. Determinação da Variação da Programação

Deve-se notar que, com maior ou menor complexidade, dimensionamentos específicos devem ser calculados para cada período de operação do tráfego com características distintas.



Naturalmente, as condições de tráfego variam continuamente e somente alterações mais significativas precisam ser consideradas (que produzem efeito mais significativo na programação semafórica e/ou operação do tráfego).

Estas diferenças podem ser avaliadas diretamente após definir cada novo dimensionamento (partindo de uma repartição com períodos de duração mínima de 15min) ou podem ser renunciadas examinando variáveis básicas que determinam o dimensionamento, como a taxa de solicitação de verde efetivo global e os valores relativos das taxas de solicitação de verde efetivo dos estágios.

Sempre que for possível adotar o tempo de ciclo ótimo, o dimensionamento tem folga suficiente para acomodar variações significativas na demanda (e também na capacidade). Esta observação reflete-se na prática (nem sempre explicitada) de considerar adequado recomendar que os tempos de ciclo ótimos possam ser determinadas com volumes horários (ou fluxos médios de períodos maiores). Uma exceção a esta recomendação seria o dimensionamento nos períodos de pré-pico (em que a demanda está crescendo e um valor correspondente ao fluxo de 5 ou 15 min do final do pré-pico seria mais adequado).

O refinamento da temporização dos semáforos é tanto mais importante quanto maior o grau de solicitação de capacidade global na interseção, especialmente quando não é possível utilizar a folga correspondente ao tempo de ciclo ótimo. Nestes casos, a recomendação prática é utilizar os fluxos de pico de 15min dentro de cada período de programação.

A necessidade de refinamento com a utilização de tempos de ciclo maiores em geral evita que a estratégia para aumentar a reserva de capacidade nos semáforos crie ociosidade na programação para grande parte dos dias e períodos normais, sem mencionar o potencial aumento desnecessário do atraso imposto aos usuários.

Por este motivo, quando há razoável variação na saturação da interseção (sem longos períodos de saturação), a alternativa natural ao detalhamento da temporização semafórica é o uso de semáforos com programação sob demanda, baseada em dados obtidos de detectores veiculares, que será discutida adiante.

4.7.7. Dimensionamento dos Semáforos Atuados

O uso do controle atuado pelo tráfego é o passo mais simples nessa direção e está normalmente disponível na grande maioria dos controladores existentes (em formas mais ou menos desenvolvidas), exigindo apenas a implantação de detectores e a programação do equipamento.

Uma breve discussão sobre este tipo de controle e sobre os critérios usuais de parametrização do controle atuado é interessante e instrutivo.

A lógica tradicional do controle atuado pelo tráfego é simples e direta: busca-se alocar o tempo necessário para escoar as filas acumuladas a cada estágio semafórico (este é o tempo de verde solicitado para escoar a demanda recebida em cada ciclo). Um procedimento eficiente de controle atuado pelo tráfego permite operar com o tempo de ciclo mínimo efetivamente necessário em cada ciclo semafórico, dispensando as folgas necessárias para acomodar as flutuações aleatórias porque estas variações devem ser medidas ciclo a ciclo e imediatamente atendidas.

Considerando as restrições de precisão do procedimento de controle, esta operação automática é limitada para funcionar em faixas usuais de tempos semafóricos, recurso que deve também permitir lidar com situações de falha no equipamento e/ou nos detectores.

O controle atuado pelo tráfego em interseções isoladas pode, em geral, ser usado em um de dois modos: a atuação total, em que cada grupo de tráfego deve ser monitorado por detectores específicos (a detecção pode ser limitada aos grupos de tráfego críticos, se forem conhecidos de antemão, e eventualmente comunicados ao controlador, se não houver capacidade de avaliação de solicitações concorrentes para um mesmo estágio), e a semi-atuação, em que apenas os grupos de tráfego secundários são monitorados por detectores (para que estes recebam o menor tempo possível e todo o tempo restante seja dado aos grupos de tráfego principais).

Em cada estágio com controle atuado, os seguintes parâmetros são usualmente definidos:

- um tempo de verde inicial a ser executado independentemente da detecção de veículos;
- um intervalo de corte que define o intervalo (ou brecha) sem detecção a ser interpretado pelo controlador como sinal de ter sido escoada toda a fila acumulada anteriormente;
- uma unidade de extensão de verde a ser executada sempre que uma nova detecção veicular ocorrer dentro da monitoração do intervalo de corte, iniciando um novo ciclo de detecção;
- um tempo de verde máximo a ser obedecido independentemente da detecção de veículos.³

Pode-se ver que, com estes parâmetros, o controle atuado permite executar tempos de verde entre o mínimo e máximo definidos, em função da detecção de veículos ocorrida durante a operação de cada estágio semafórico. Este método de controle simples é míope no sentido de observar durante cada estágio apenas os eventos que ocorrem nos seus detectores. Outras lógicas de controle mais sofisticadas podem ser implementadas e transformam o controle atuado em controle adaptativo.

No controle atuado, os estágios podem normalmente ser considerados obrigatórios ou opcionais, extensíveis ou fixos. A descrição feita acima corresponde ao caso de um estágio obrigatório e extensível. Um exemplo de estágio opcional e fixo é normalmente o caso utilizado para controlar a demanda de pedestres acionada por botoeiras (talvez o exemplo mais rústico de controle atuado pelo tráfego). Neste caso, o estágio de pedestres somente ocorre se houve alguma atuação durante o vermelho anterior e a duração do verde oferecida aos pedestres será fixa e não extensível. Os estágios protegidos para conversão à esquerda também são usualmente programados como opcionais (neste caso, são utilizados detectores de presença, e não de passagem, para indicar veículos em espera na posição alocada para a fila dos veículos esperando conversão à esquerda).

No caso da atuação total, todos os estágios são sujeitos ao controle atuado (com estágios opcionais ou não, extensíveis ou não), enquanto

³ Vale observar que a terminologia, e mesmo os recursos oferecidos, para os controladores atuados pelo tráfego não é uniforme. Por exemplo, boa parte dos controladores atuados assume que o intervalo de corte e a unidade de extensão de verde são iguais e utilizam apenas um parâmetro para ambos (outros controladores programam um parâmetro diferencial para distinguir um intervalo do outro, usualmente chamado de retardo de verde). Diversas outras formas existem mas são pouco usuais no Brasil onde os controladores atuados são ainda rústicos.

na semi-atuação apenas os estágios correspondentes aos grupos de tráfego secundários é atuado. No caso da semi-atuação, o estágio principal executa sempre que os estágios atuados são terminados e tem um tempo de verde mínimo programado que é cumprido independentemente da detecção nos grupos de tráfego secundários.

A parametrização do controle atuado pelo tráfego segue princípios bastante simples, usualmente baseados em tempos calculados para uma programação a tempos fixos característica. Os critérios mais simples e usuais são os seguintes:

- os tempos de verde inicial são fixados com base no tempo de verde calculado para a programação a tempos fixos característica, adotando uma fração ao redor de 75% do tempo de verde dimensionado com o tempo de ciclo mínimo ou ótimo característico ($g_{\text{ini},Ek} = 0,75 \cdot g_{\text{fixo},Ek}$);
- os intervalos de corte são calculados admitindo que o escoamento da fila tem uma distribuição de intervalos conhecida (poissoniana, em geral, com $IC_{Ek} = -\ln[p_{c,Ek}] / S_{ck}$), dado o fluxo de saturação da aproximação crítica S_{ck} , e fixando a probabilidade de falha $p_{c,Ek}$ na detecção da fila da ordem de 90% ou 95% (que corresponde a uma falha na detecção do fim da fila da ordem de 10% ou 5%);
- as unidades de extensão de verde, se diferenciadas dos intervalos de corte, são normalmente calculadas como o tempo decorrido entre a passagem pela linha de detecção e o cruzamento da linha de retenção, de forma a permitir que o último veículo detectado entre na interseção legalmente;
- os tempos de verde máximo são fixados com base no tempo de verde calculado para a programação a tempos fixos característica, com uma margem ao redor de 50% ($g_{\text{máx},Ek} = 1,50 \cdot g_{\text{fixo},Ek}$) ou para programações de tempos fixos para demandas majoradas (usualmente em até 50%).

Pode-se verificar que a parametrização do controle atuado é simples. No entanto, em geral é necessário monitorar a operação com controle atuado para avaliar a eventual necessidade de ajuste nos parâmetros calculados. Por exemplo, sabe-se que o cálculo baseado em uma distribuição poissoniana estima valores reduzidos para o intervalo de corte e pode levar à observar cortes prematuros de verde (quando ainda pode-se ver o escoamento da fila na aproximação). Neste caso, o intervalo de corte deve ser progressivamente aumentado, ponderando-se o risco oposto de gerar verde ocioso (após a dissipação da fila).

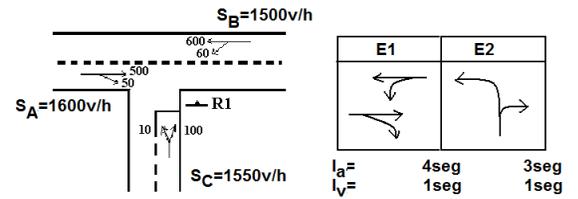
Em geral, a atuação total permite obter desempenho vantajoso ou equivalente em relação à programação de tempos fixos para todos os casos. Seu uso seria, portanto, apenas limitado pela consideração do custo de implantação e manutenção dos detectores (ponderando-se que o controle atuado permitirá reagir automaticamente a incidentes de tráfego e exigirá revisões menos frequentes das programações semaforicas ao longo do tempo). O controle semi-atuado é bastante mais restrito sendo normalmente recomendado apenas onde a implantação do semáforo justifica-se apenas em parte do dia (de forma a evitar interferência com o fluxo principal nos demais períodos).

Apesar das limitações existentes, em particular no Brasil, o controle atuado é um recurso útil.

EXERCÍCIO PROPOSTO: Dimensionamento de Semáforo Atuado

Considere o plano semafórico apresentado ao lado para operar a interseção discutida anteriormente com um semáforo simples com 2 estágios com aumento da demanda de conversão à esquerda a 150v/h.

Obtenha a parametrização do semáforo para atendimento à demanda majorada, com atuação total e com semi-atuação. E na opção de adicionar um estágio de pedestres comandado por botoeira?



SOLUÇÃO DO EXERCÍCIO: Dimensionamento de Semáforo Atuado

Como discutido no dimensionamento com tempos fixos, tem-se:

$$y_A = \frac{550}{1600} = 0,3438, \quad y_B = \frac{660}{1500} = 0,4400, \quad y_C = \frac{250}{1550} = 0,1613$$

(obtendo-se, neste caso, $t_c = 39\text{seg}$, $g_{E1} = 22\text{seg}$, $g_{E2} = 8\text{seg}$).

Com atuação total, ambos os estágios serão parametrizados com:

- intervalos de corte dimensionados para $p=5\%$ de falha por corte prematuro;
- verde mínimo para atendimento aos pedestres ($L=10\text{m}$);
- verde máximo com majoração de 50% do verde de tempos fixos

(seria melhor majorar a demanda em 50% e redimensionar para os verdes máximos).

Para E1: B é crítico, portanto:

$$\text{- intervalo de corte (} S_B = 1500\text{v/h): } IC_{E1} = -\ln[p_{cB}] \bar{h}_B = 3 \cdot \bar{h}_B = 3 \cdot \frac{3600}{1500} = 7,2\text{seg};$$

$$\text{- verde mínimo (} L_{ped} = 12\text{m): } g_{minE1} = \delta_{ped} + \frac{L_{ped}}{V_{ped}} - I_a = 3 + \frac{10}{1,2} - 4 = 7\text{seg};$$

$$\text{- verde máximo (} g_{E1}^{Tfixo} = 22\text{seg): } g_{maxE1} = 1,5 \cdot g_{E1}^{Tfixo} = 1,5 \cdot 22 = 33\text{seg}.$$

Para E2: C é crítico ($S_C = 1550\text{v/h}$), portanto:

$$\text{- intervalo de corte (} S_C = 1550\text{v/h): } IC_{E2} = -\ln[p_{cC}] \bar{h}_C = 3 \cdot \bar{h}_C = 3 \cdot \frac{3600}{1550} = 7,0\text{seg};$$

$$\text{- verde mínimo (} L_{ped} = 12\text{m): } g_{minE2} = \delta_{ped} + \frac{L_{ped}}{V_{ped}} - I_a = 3 + \frac{10}{1,2} - 3 = 8\text{seg};$$

$$\text{- verde máximo (} g_{E2}^{Tfixo} = 22\text{seg): } g_{maxE2} = 1,5 \cdot g_{E2}^{Tfixo} = 1,5 \cdot 8 = 12\text{seg};$$

Portanto, os ciclos vão variar de 24seg (com tempos mínimos) a 54 seg (com tempos máximos), em função da demanda manifesta e de incidentes operacionais (não somente o ciclo é automaticamente ajustado mas também a repartição nos estágios).

Note-se que os intervalos de corte normalmente são considerados como brechas de corte (apesar de manterem a denominação tradicional de intervalo de corte). Neste caso, assumindo detectores usuais com $\ell_d = 1,8\text{m}$, comprimento efetivo dos veículos $\ell_c = 4,0\text{m}$ (para autos) e dissipação de filas com $V_s = 40\text{km/h}$ (11,11m/s), deve-se parametrizar

$$BC_{E1} = 7,2 - \frac{1,8 + 4,0}{11,11} = 6,7\text{seg} \quad \text{e} \quad BC_{E2} = 7,0 - \frac{1,8 + 4,0}{11,11} = 6,5\text{seg} \quad (\text{como intervalo de corte}),$$

reduzida do tempo de ocupância dos detectores. Além disso, para o posicionamento usual dos detectores (em geral junto à linha de retenção, a cerca de 6m), não é necessário verificar a extensão de verde (o intervalo de corte será mais que suficiente para escoar o último veículo; pelo contrário, gera uma eventual ociosidade ao final de cada estágio). Em alguns casos, a operação pode ser melhorada (menor ociosidade) com um detector (adicional) afastado ($d < V_s \cdot IC$ ou mesmo $d < V_s \cdot (IC + I_a)$) para aproveitar o intervalo de corte na linha de retenção, dentro da extensão ocupada pelas

filas ($d < q_r \cdot r \cdot \ell_v$ ou $d < 0,9 \cdot \frac{q_r \cdot r \cdot \ell_v}{1 - \frac{q_r \cdot \ell_v}{m \cdot V}}$). Note-se também que, em alguns controladores, o verde mínimo é

parametrizado como verde inicial $g_{ini} = g_{min} - IC$ porque os intervalos de corte são monitorados após seu início.

Com semi-atuação, somente C no estágio secundário (E2) terá detectores e pode ter a mesma parametrização anterior (usada para E2 na atuação total: $BC_{E2} = 6,5\text{seg}$, $g_{minE2} = 8\text{seg}$, $g_{maxE1} = 12\text{seg}$). O estágio E1 será protegido pelo verde mínimo de E1.

Para E1 com controle semi-atuado (isolado): B é crítico ($y_{E1} = 0,44$), portanto:

$$g_{minE1} = \frac{y_{prin}}{1 - y_{prin}} \cdot \left(\sum g_{max}^{sec} + \sum I \right) = \frac{0,44}{1 - 0,44} \cdot (12 + 5 + 4) = 17\text{seg} \text{ (maior que na atuação total).}$$

Portanto, os ciclos vão variar de 34seg (com tempos mínimos) a 38seg (com tempo mínimo em E1 e tempo máximo em E2) quando a via secundária tem demanda significativa. No entanto, quando a via secundária tem demanda reduzida, o ciclo semaforico pode ser superior a esse valor máximo pela ausência do estágio E2 (todo o tempo adicional é dado ao estágio E1, enquanto não há atuação em E2). Este cenário com demanda reduzida na via secundária torna o controle semi-atuado interessante.

Outro cenário em que o controle semi-atuado pode ser preferido ocorre quando é necessário garantir coordenação semaforica adequada (uma restrição mais difícil de garantir com atuação total). Por exemplo, considere a necessidade de manter um ciclo semaforico de 100seg (em função de outros cruzamentos críticos) e uma defasagem de 15seg em relação ao semaforo mestre do sistema coordenado. A coordenação semaforica com controle semi-atuado irá automaticamente impedir a execução do estágio E2 a partir do instante 3, visto que não seria possível cumprir o verde mínimo de 8seg e o entreverdes de 4seg antes de voltar ao estágio E1 no instante 15. Após o instante 15, o controle semi-atuado vai executar o verde mínimo do estágio E1 e então poderá executar o estágio E2 se tiver sido atuado durante o período iniciado em 3 (ou adiante, até retornar novamente ao instante 3).

O critério de determinação do verde mínimo em E1 é distinto, entretanto, no caso com coordenação (e ciclo fixo). Em geral, impõe-se uma condição de grau de saturação X_{prat} para os grupos de tráfego em E1 (preferencialmente, algo entre 0,80 a 0,95). Por exemplo, com o ciclo semaforico de 100seg e um grau de saturação de 0,90, o verde mínimo de E1 seria $g_{minE1} = \frac{y_{prin}}{X_{prat}} \cdot t_c = \frac{0,44}{0,90} \cdot 100 = 49\text{seg}$ (a semi-atuação passa a ser efetiva somente entre os instantes 64 e 3 de cada ciclo semaforico coordenado).

Note que a necessidade de coordenação introduz um instante forçado e um instante liberado para E1 que limitam a semi-atuação (solicitada por E2). Em estratégias de atuação mais flexíveis, a coordenação pode ser utilizada com atuação total pela definição de parâmetros correspondentes para todos os estágios (no padrão NEMA, considerado no HCM, correspondem ao *force-off point* e *yield point* dos estágios).

No caso de estágio de pedestres atuado por botoeira, trata-se de outro caso de semi-atuação que é normalmente tratado com critérios similares (embora normalmente mais simples). Como os tempos de pedestres tem duração fixa, a atuação determina somente a execução ou não do estágio de pedestre (que passa a ser opcional) e o instante específico da sua ativação. No caso de ser parte de um sistema coordenado, as exigências de defasagem novamente restringirão os períodos em que a ativação é permitida. Aplica-se, ainda, a restrição de verde mínimo veicular.

Num caso geral, podem existir diversos estágios veiculares e um ou mais estágios de pedestres acionados por botoeiras (opcionais). Este caso é o tratado (raramente discutido) e pode-se aplicar um critério básico simplificado de dimensionamento com base na hipótese de ativação de todos os estágios de pedestres com probabilidade $p_{pb} = 1 - e^{-q_{pb} \cdot t_c}$ (ou $p_{pb} = 1 - e^{-q_{pb} \cdot t_{ped}}$) e duração $\bar{t}_{Eped} = p_{pb} \cdot t_{Eped}$ para dimensionar os demais estágios. No caso analisado, com tempos fixos, obteve-se $t_{Eped} = 10\text{seg}$, $t_p = 8\text{seg}$ e $t_c = 68\text{seg}$, $g_{E1} = 36\text{seg}$, $g_{E2} = 12\text{seg}$. Admitindo 120ped/h e $p_{pb} = 1 - e^{-\frac{120}{3600} \cdot 68} = 90\%$, tem-se $\bar{t}_{Eped} = 0,90 \cdot 10 = 9\text{seg}$, $t_c = 65\text{seg}$, $g_{E1} = 34\text{seg}$, $g_{E1} = 12\text{seg}$ (iterativo).

4.8. MÉTODOS DE SINCRONIZAÇÃO E COORDENAÇÃO EM REDES SEMAFÓRICAS.

A necessidade de coordenação da operação dos semáforos em redes urbanas é claramente sentida na administração do tráfego. Inicialmente, o aumento da densidade de semáforos e, mais recentemente, o crescimento da saturação viária são aspectos que tornaram esta necessidade cada vez maior e cada vez mais crítica para o tráfego urbano (em especial em redes de maior porte).

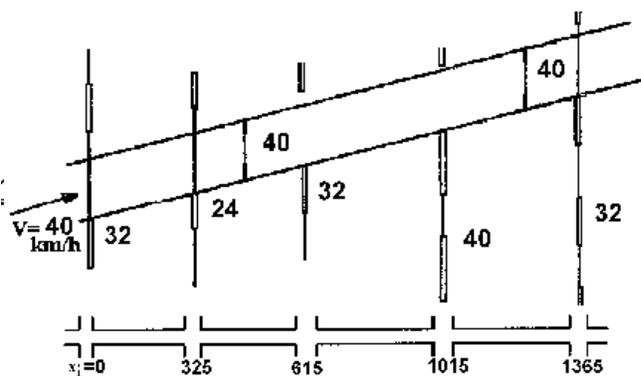
O entendimento da forma pela qual a interação entre semáforos adjacentes modificavam o modelo básico de análise de uma interseção semaforizada isolada afirmou-se ao longo dos anos, guiado pela observação básica de que os semáforos eram responsáveis pela formação de pelotões de tráfego. Em cruzamentos com fluxos diretos claramente predominantes, os períodos de operação das vias transversais eram também períodos de fluxos reduzidos (quase nulos). A exposição a seguir repete estas etapas sucessivas de compreensão.

4.8.1. Sincronização baseada em Onda de Verde

A existência de pelotões evidenciava que, além do dimensionamento dos semáforos individuais, devia ser determinada uma outra variável essencial: a defasagem de tempo entre o início do verde nos estágios diretos sucessivos, para garantir a abertura de verde no instante mais favorável para a operação: o instante de chegada dos pelotões formados à montante. O tempo de viagem entre as interseções sucessivas foi, portanto, a primeira variável básica da coordenação.

Os primeiros estudos sistemáticos a respeito foram guiados pela idéia de garantir uma onda (ou banda) verde para os fluxos diretos, que permitisse o movimento sem interrupções do pelotão formado no início do corredor, ao longo de todas as suas interseções.

Em qualquer rota aberta (isto é, que não utiliza as interseções mais de uma vez como em uma via de mão única), o problema inicial é simples: pode-se adotar a defasagem ideal entre cada par de



interseções adjacentes, calculada como $\theta_{ij} = t_{ij} = \frac{L_{ij}}{V_{ij}}$, para

condições de baixa demanda, ou $\theta_{ij} = t_{ij} - t_{sj} = \frac{L_{ij}}{V_{ij}} - \frac{n_j}{S_j}$,

para condições de maior demanda, onde t_{ij} é o tempo de viagem entre as interseções adjacentes (L_{ij} é a distância e V_{ij} é a velocidade entre as interseções adjacentes), e t_{sj} é o

tempo de dissipação da fila em j (n_j é a fila no vermelho da

interseção posterior (à jusante) e S_j é o fluxo de saturação correspondente, que é a taxa de dissipação das filas).

A primeira expressão, $\theta_{ij} = t_{ij}$, expressa o princípio básico da sincronização progressiva e indica que as aberturas de verde nas interseções sucessivas ao longo da rota aberta devem ocorrer com uma defasagem que garante o início dos estágios da interseção posterior (à jusante) em um instante posterior (defasagem positiva) ao da interseção anterior, deslocado de um período igual ao tempo de viagem

entre os cruzamentos. Este deslocamento determina uma velocidade de progressão que deve representar as condições médias do pelotão (ou do líder do pelotão), a menos de ser necessário regular a operação no início do verde do corredor, em geral por motivos de segurança.

Naturalmente, esta expressão somente pode ser utilizada em corredores pouco saturados (ou nos períodos menos saturados da sua operação), quando os tempos de dissipação das filas existentes no início do verde são pequenos. Em sistemas não saturados e bem coordenados, estas filas correspondem ao fluxo das vias transversais (do vermelho).

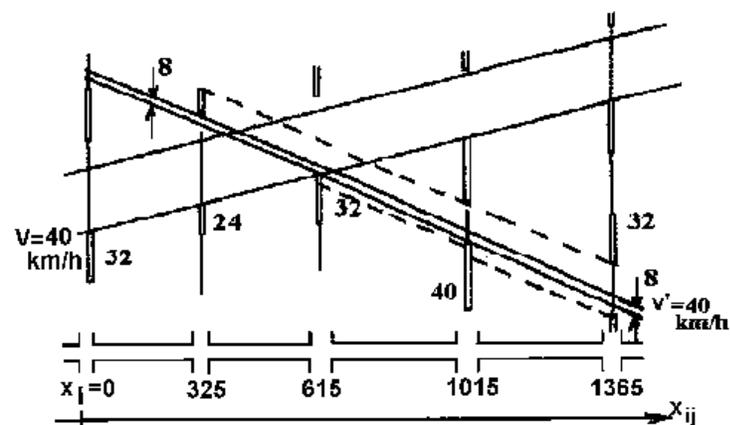
A segunda expressão, $\theta_{ij} = t_{ij} - t_{sj}$, introduz um princípio alternativo, chamado de sincronização regressiva, por recomendar que as aberturas de verde nas interseções sucessivas ao longo da rota aberta possam ocorrer com uma defasagem que garante o início dos estágios da interseção posterior (à jusante) em um instante anterior (defasagem negativa) ao da interseção anterior, quando as filas no início do verde são significativas e a segunda parcela (o tempo de dissipação das filas) supera a primeira parcela (o tempo de viagem entre as interseções). A expressão inicial deste termo tem, entretanto, de introduzir dois novos aspectos: a extensão ocupada pela fila e sua interação com a própria defasagem ou com restrições de capacidade à jusante.

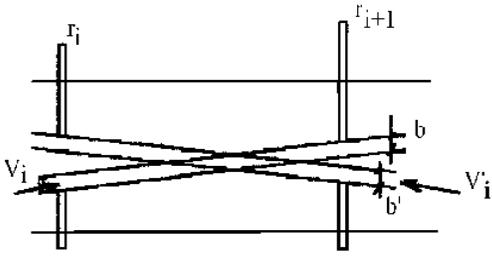
Em ambos os casos, sincronização progressiva ou regressiva, busca-se garantir que o pelotão da rota principal encontre um período de verde desimpedido ao chegar ao cruzamento posterior (à jusante). Permitir a dissipação das filas acumuladas no início do verde antes da chegada do pelotão principal é um simples aperfeiçoamento do cálculo da defasagem. No entanto, a obtenção da sincronização em redes mais gerais que uma rota aberta introduz também condições de outra natureza.

Em uma rota fechada, cujo exemplo mais imediato é o de uma artéria com fluxo em ambas as direções de tráfego mas que é o contexto também usual das redes semafóricas das malhas viárias das áreas centrais, desaparece esta simplicidade da solução de sincronização das defasagens e surgem diversas restrições que evidenciam a impossibilidade de obter-se uma solução perfeita de sincronização em ambas as direções de tráfego ou nas diversas rotas de circulação da malha viária.

Os primeiros estudos também trataram da situação usual de um corredor bidirecional e buscaram soluções que combinassem o atendimento de ambas as direções de forma adequada, que satisfizesse as restrições correspondentes a ambas as direções da melhor forma

(como no *software* MAXBAND e seus derivados, que desenvolveu o algoritmo publicado por Little e Morgan em 1964). A conclusão básica é ilustrada pela observação de que as relações para cada sentido de fluxo tornam normalmente impossível obter uma sincronização ideal para ambos os sentidos de tráfego. As variáveis envolvidas são as mesmas e as relações de restrição são totalmente determinadas pela geometria do corredor, incluindo as velocidades e filas.





Em qualquer rede de semáforos que contenha rotas fechadas, a duração da onda de verde (chamada de banda de verde) obtida com a sincronização em cada um dos sentidos deve satisfazer a relação de fechamento $b_{i,i+1} + t_{t,i+1} - g_{i+1} + b_{i+1,i} + t_{i+1,i} - g_i = n.t_c$, que implica

$$(b_{i,i+1} - g_i) + (b_{i+1,i} - g_{i+1}) = n.t_c - (t_{i,i+1} + t_{i+1,i}) \quad (4.21)$$

em uma perda de eficiência de sincronização dada por onde $n.t_c$ é um múltiplo conveniente do tempo de ciclo t_c (que torna $n.t_c$ maior que $(t_{i,i+1} + t_{i+1,i})$ por menos de um tempo de ciclo).

É fácil ver que a banda de verde em um sentido somente pode ser aumentada se for reduzida a banda de verde no sentido oposto, e que uma banda de verde perfeita é impossível, a menos que haja uma combinação entre tempos de viagem e tempo de ciclo conveniente.

Em função destes resultados, pode-se tentar determinar as condições viárias que favoreceriam a obtenção de boas condições para a sincronização semafórica. Pode-se verificar que, adotando um tempo de ciclo comum e admitindo uma velocidade média uniforme, a

sincronização perfeita viria com $n.t_c = \frac{L}{V_{i,i+1}} + \frac{L}{V_{i+1,i}}$, o que exige um

espaçamento entre interseções também uniforme $L = \frac{n.t_c \cdot V}{2}$. Visto de

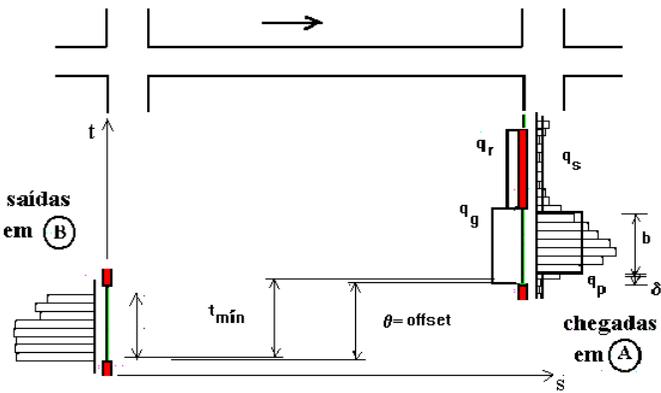
outra forma, fixando L , a sincronização perfeita exige um tempo de

ciclo $t_c = \frac{2.L}{n.V}$ (chamado de tempo de ciclo natural).

Naturalmente, como o tempo de ciclo varia ao longo do dia e tem de responder à evolução da demanda ao longo do tempo, relações desta natureza são impossíveis de observar para diferentes cenários de operação (pelo menos difíceis visto que há grande flexibilidade na escolha dos tempos de ciclo recomendados para semáforos). Além disso, as interseções usualmente não são espaçadas de maneira uniforme e a existência de sincronização imperfeita seria o caso mais comum (por razões puramente geométricas).

Os métodos baseados em bandas de verde são, entretanto, ainda utilizados em contextos mais simples (corredores isolados com filas reduzidas). Na verdade, é um método intuitivo que formaliza procedimentos gráficos que foram originalmente empregados para sincronizar semáforos no passado. A formulação básica foi estendida para diversos casos particulares (por exemplo, considerando uma fila inicial no verde, diferenciando os estágios de sentidos de tráfego opostos, como ocorre quando há estágios protegidos de conversão à esquerda). No entanto, o método não é baseado diretamente no desempenho do tráfego e falhas em condições mais complexas.

4.8.2. Sincronização com Formação/Dispersão de Pelotões



Há outra característica do tráfego que é responsável por uma perda adicional da eficiência possível na sincronização semafórica mas que também reduz sua importância. Esta característica, considerada a seguir, é o fenômeno de dispersão dos pelotões de tráfego ao longo de trajetos extensos. Esta é uma das características peculiares dos softwares tradicionais de sincronização semafórica (entre os quais, o melhor exemplo é o TRANSYT, que inclusive é o precursor de diversos sistemas de controle de tráfego em tempo real modernos, como o SCOOT, ambos baseados na otimização do desempenho e no modelo de dispersão de tráfego de Robertson, desenvolvido até hoje tanto pelo U.K.TRL, desde 1967, quanto pelo U.S.FHWA, que adquiriu a versão 7 em 1978 e produziu o TRANSYT 7F)

Em essência, a variação das velocidades desejadas de viagem dos usuários da via faz com que os pelotões formados pelos semáforos dispersem-se progressivamente ao longo do percurso, na medida em que os veículos mais rápidos logrem ultrapassar os mais lentos dentro de um pelotão até que pelotões sucessivos encontrem-se. Isso produz uma tendência à uniformização do fluxo em trechos distanciados de semáforos que elimina a necessidade de coordenação semafórica em função da chegada dos pelotões.

A dispersão do tráfego pode ser representada, dada uma distribuição das velocidades desejadas de viagem, pelo seu impacto nos tempos efetivos de viagem observados e é tanto mais rápida quanto melhores forem as condições de ultrapassagem dos veículos lentos pelos veículos rápidos (que tornam-se os líderes dos pelotões, com uma velocidade $v_{ij} > V_{ij}$). Na medida em que os pelotões sejam menos compactos ou mais extensos (além de 400 a 600m entre interseções, nas condições usuais), a sincronização semafórica perde, ao mesmo tempo, eficiência e relevância como estratégia de coordenação (sendo em geral desnecessária para espaçamentos superiores a 600m a 1km).

No TRANSYT, o modelo de dispersão de tráfego de Robertson é incorporado a um algoritmo de simulação microscópica em que a evolução do tráfego é calculada em passos com duração fixada ($\tau = 1a4seg$) ao longo do ciclo, que obtém o perfil cíclico do tráfego (das chegadas e partidas) em cada retenção semafórica e a variação das filas retidas como

$$q_{in,j}^k = \sum_i \left(p_{ij} \cdot F_{ij} \cdot q_{out,i}^{k-t_{ij}} + (1 - F_{ij}) q_{in,j}^{k-1} \right) \quad (4.22a)$$

$$q_{out,j}^k = [R : 0; G : \min\{n_j^k / \tau + q_{in,j}^k; S_j\}] \quad (4.22b)$$

$$n_j^{k+1} = n_j^k + q_{in,j}^{k+1} \cdot \tau - q_{out,j}^{k+1} \cdot \tau \quad (4.22c)$$

(k é o passo na evolução do ciclo semafórico no tempo; i identifica os fluxos à montante que alimentam a interseção j , que em geral correspondem aos fluxos dos diferentes estágios semafóricos). É um modelo simples de fila corrigido de três formas principais: o modelo de dispersão de tráfego (o tempo mínimo $t = \beta \cdot \bar{t}$ e o fator de dispersão

$F = \frac{1}{1 + \alpha \cdot t}$) é em geral calibrado em campo ($\beta = 0,80$ e $\alpha = 0,35$ são

valores usuais para tráfego geral), um termo de sobre-fila é adicionado (reconhecendo o valor calculado com o modelo de tráfego como fila regular) e um fator de paradas parciais é ponderado (introduzindo o

efeito de desaceleração e aceleração). O fluxo de saturação S é também um aspecto crítico para a calibração do modelo de tráfego do TRANSYT e representa uma curva de capacidade de dissipação de filas (que pode representar variações físicas, conversões permitidas e mesmo interseções sem semáforos e efeitos de bloqueio).

Originalmente, a estimativa de fila acumulada (em veículo-hora) por ciclo foi a variável tomada como índice de desempenho, ponderando o tempo de atraso e o número de paradas de veículos decorrentes, como $PI[\theta_{ij}] = \sum_q (C_{dq} \cdot w_q \cdot D_q + C_{hq} \cdot w_h \cdot H_q)$. Posteriormente, outras variáveis puderam ser também incorporadas (como atraso de pedestres, emissão de poluentes, ...). No entanto, a adição mais relevante do ponto de vista prático foi a introdução de uma penalidade para filas excedentes (filas máximas maiores que a capacidade de acomodar filas em um trecho de via, que produziriam um efeito de bloqueio). Como observado, o modelo de tráfego do TRANSYT é capaz de considerar efeitos de bloqueio (pelo menos de forma aproximada) mas o método de otimização tradicional (um procedimento heurístico que é robusto em outros casos) não parece adequado quando a interação de bloqueio gerado por filas afeta drasticamente a operação do tráfego (por este motivo, tanto a versão do U.K.TRL quanto a do U.S.FHWA incluem métodos alternativos incipientes, baseados em meta-heurísticas). Além disso, mesmo quando representa a variação no tempo da demanda e da operação do tráfego, o TRANSYT usualmente tenta obter uma estratégia única para o período analisado, sem ponderar a necessidade de adotar estratégias dinâmicas (como a retenção da demanda em pontos estratégicos da rede na entrada da rede e no início do período, chamada de *gating*, que evita bloqueios no restante da rede e adia a entrada da demanda a períodos em que ela pode ser atendida).

4.8.3. Coordenação Semafórica em Sistemas Saturados

Após incorporar as relações de interação da alimentação dos fluxos das interseções anteriores (à montante) nas posteriores (à jusante), que são a essência da interação em condições de fluxo não saturado, os outros fenômenos que passaram a ser progressivamente considerados nos métodos de análise recentemente propostos tem destacado especialmente estes aspectos relevantes para sistemas saturados (que operam com sobre-demanda por um período de tempo relevante nos picos, exibindo um efeito considerável de bloqueio gerado por filas excedentes, que evidenciam a insuficiência de capacidade de tráfego).

Estes efeitos relacionam-se com a presença de filas e gargalos de capacidade (e podem exigir estratégias mais amplas, tanto no espaço quanto no tempo) e ainda não são, em geral, adequadamente tratados.

As expressões para cálculo da defasagem ideal entre duas interseções adjacentes aplicáveis quando as filas iniciais são significativas tem de ser ajustadas para incorporar a dimensão horizontal das filas e ainda generalizadas notando que pode haver algum fluxo da via transversal sendo acumulado durante o tempo de percurso do pelotão. A expressão mais precisa para a defasagem ideal seria

$$\theta_{ij}^* = \frac{L_{ij} - z_j}{v_{ij}} - \frac{z_j}{w_{sj}} \quad (4.23)$$

onde v_{ij} é a velocidade do líder do pelotão no trecho de i a j , z_j é a extensão da fila em j e w_{sj} é a velocidade de dissipação da fila em j

(reconhecendo a dimensão das filas), sendo $z_j = z_{Mj} = \frac{z_{Rj}}{1 - w_{cGj}/w_{sj}}$ a

fila no instante de dissipação (que corresponde à distância máxima atingida pela fila), com z_{Rj} é a extensão da fila no final do vermelho em j e w_{cGj} é a velocidade de propagação final da fila em j (no verde).

Uma expressão aproximada, em geral satisfatória, seria calcular a defasagem ideal como $\theta_{ij}^* = \frac{L_{ij} - z_{Bj}}{V_{ij}} - \frac{n_{Bj}}{S_j}$, onde $n_B \cong \frac{n_R}{1 - \frac{Q_{Gj}}{S_j}}$ é a

fila máxima de veículos afetados durante a dissipação, n_R é a extensão no final do vermelho e Q_G é o fluxo no verde, ambos

referidos ao estágio principal de j , sendo $z_B = \frac{n_B \cdot \ell_v}{N_f}$ é sua extensão

(admitindo uma aproximação com N_f faixas). Na situação mais simples, o fluxo no vermelho, indicado por Q_R (por ocorrer no período de vermelho em relação ao fluxo do pelotão principal), corresponde ao fluxo alimentado pela via transversal (normalmente os movimentos de conversão), a menos de filas residuais.

Outra aproximação é obtida com a expressão $\theta_{ij}^* = \frac{L_{ij} - z_{Bj}}{v_{ij}} - \frac{z_{Bj}}{w_{Sj}}$ mas fazendo w_{sj} , a velocidade de dissipação da fila, dada por

$$w_{sj} = \frac{S_j}{K_{Jj} - K_{Sj}} \cong \frac{S_j}{K_{Jj}} = \frac{z_{Bj}}{n_{Bj}} \cdot S_j = \frac{\ell_v \cdot S_j}{N_f} = \ell_v \cdot S_{fj}, \text{ onde } \ell_v \text{ é a extensão}$$

ocupada por veículo em fila (em geral 6 a 8m) e S_{fj} é o fluxo de saturação por faixa em j (em geral 1500 a 1800v/h).⁴

Estes termos de dissipação de fila são tão mais importantes quanto maiores os fluxos das vias transversais e a imperfeição da sincronização no corredor (que produz filas residuais por falta de sincronismo). A fila residual pode ser obtida a partir da defasagem de fechamento dos semáforos $\chi_{ij} = \theta_{ij} - \Delta g_{ij}$, onde Δg_{ij} é a diferença de

verde nos semáforos sucessivos, como $n_R = n_{R0} + q_c \cdot \left| r_i - |\chi_{ij} - t_{ij}|_+ \right|_+$

com $n_{R0} = q_p \cdot |t_{ij} - \chi_{ij}|_+$ em função da demanda no pelotão e nas

⁴ Outras formas usuais de escrever esta mesma relação são

$$\theta_{ij} = \frac{L_{ij} - z_{Rj}}{V_{ij}} - \frac{n_{Rj}}{S_j - Q_{Rj}} \text{ ou } \theta_{ij} = \frac{L_{ij} - z_{Rj}}{v_{ij}} - \frac{n_{Rj}}{S_j}, \text{ onde } n_{Rj} \text{ é a fila}$$

formada pelo fluxo da via transversal (supondo que a fila do fluxo gerado pela via transversal Q_{Rj} é pequeno e vigora durante o tempo de movimento do pelotão direto). Ambas as expressões também podem ser escritas trocando n por z e melhorando a estimativa da fila no instante de dissipação, como

$$\theta_{ij} = \frac{L_{ij} - z_j}{V_{ij}} - \frac{z_j}{w_{dj}} \text{ ou } \theta_{ij} = \frac{L_{ij} - z_j}{v_{ij}} - \frac{z_j}{w_{dj}}, \text{ onde } z_j = z_{Rj} + \delta_{zj} \text{ com}$$

$$\delta_{zj} = \frac{z_{Rj}}{w_{sj}/w_{oj} - 1} \cong \frac{Q_{Rj}}{S_j - Q_{Rj}} \cdot z_{Rj} \text{ é o crescimento da fila durante a dissipação,}$$

$$\text{estimada com } w_{sj} = \frac{S_j}{K_{Jj} - K_{Sj}} \cong \frac{S_j}{K_{Jj}} = \frac{z_{Bj}}{n_{Bj}} \cdot S_j = \frac{\ell_v \cdot S_j}{N_f} = \ell_v \cdot S_{fj} \text{ e}$$

$$w_{fj} = \frac{Q_{Rj}}{K_{Jj} - K_{Rj}} \cong \frac{Q_{Rj}}{K_{Jj}} = \frac{z_{Bj}}{n_{Bj}} \cdot Q_{Rj} = \frac{\ell_v \cdot Q_{Rj}}{N_f} = \ell_v \cdot Q_{fRj} \text{ (} Q_{fj} \text{ é o fluxo de}$$

chegada na fila por faixa).

conversões ($|x|_+$ indica a parte positiva de x , igual a 0 para x negativo, com $\chi_{ij}^* = t_{ij}$ pois $q_p > q_c$ em geral) e pode determinar a melhor defasagem quando deve ser minimizado o risco de bloqueio (ou a duração do verde para o pelotão está diminuindo ao longo do percurso). Mas os termos de fila são especialmente relevantes em sistemas saturados (com capacidade insuficiente), em que as filas representam a demanda não servida imediatamente nos períodos de sobre-demanda (podendo significar grandes extensões do sistema viário) e os tempos de bloqueio comunicam a capacidade deficiente.

Os fenômenos de propagação das filas, que são a essência da interação em entre interseções com condições de fluxo saturado, ocorrem no sentido inverso do analisado inicialmente (das interseções posteriores para as anteriores). A qualidade da coordenação semafórica em sistemas saturados está fundamentalmente relacionado com a movimentação das filas, ao invés da progressão dos pelotões de montante para jusante. Além disso, a existência de sobre-demanda indica que vão estar presentes restrições adicionais decorrentes da necessidade de balanceamento entre demanda e capacidade (da restrição de fluxo imposta pela insuficiência de capacidade).

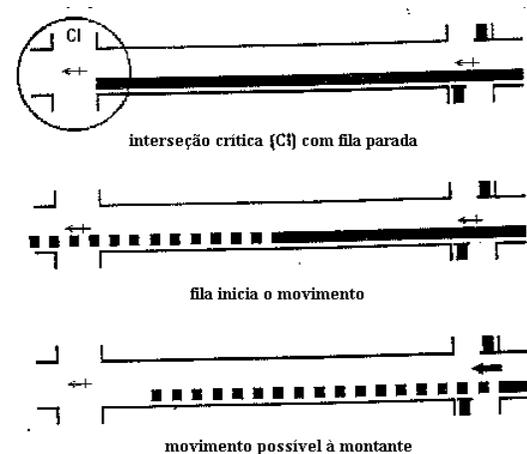
Os principais fenômenos correspondentes podem ser resumidos em:

- bloqueios decorrentes de falta de sincronismo em relação ao movimento das filas (linhas de retenção que recebem verde quando há fila parada adiante ou pelotões que chegam quando o final da fila ainda não está em movimento e não há capacidade para armazenar as chegadas adicionais, gerando um bloqueio quando o trecho fica cheio com a fila gerada);
- desperdício de capacidade pela falta de demanda (deficiência de alimentação de fluxos) durante períodos de verde sem fila (que no caso de sistemas saturados traduzem-se em redução de capacidade efetiva), uma situação frequente quando as filas são pequenas porque as interseções são próximas; e
- bloqueios decorrentes da saturação da capacidade de armazenamento de veículos dos trechos de via correspondentes a cada aproximação (com a fila acumulada durante o vermelho adiante ou ainda durante o tempo despendido em colocar a fila em movimento bloqueando o fluxo após o início do verde).

O primeiro e terceiro efeito geram um tempo bloqueado (vermelho de fato) e o segundo efeito gera um tempo ocioso que devem ser deduzidos do verde efetivo e reduzem a capacidade.

Ambos podem ser gerados por problemas de sincronismo (de defasagem). No entanto, os bloqueios podem indicar a existência de desbalanceamento (necessidade de balancear) demanda e capacidade em trechos sucessivos controlados por semáforos (não sincronização) e alocar a saturação às rotas de menor importância (em função da existência de sobre-demanda que tem de ser acumulada nos trechos mais favoráveis para não gerar bloqueios em locais mais crítico).

Os fenômenos de desperdício de capacidade pela deficiência de alimentação ocorrem também em sistemas não saturados mas, neste contexto, existe reserva de capacidade e não há nenhum problema fundamental criado. Em um sistema saturado, essa perda de capacidade é importante para a eficiência global e pode traduzir-se em uma de duas situações: o acúmulo de filas maiores que as normais (que eliminarão o desperdício de capacidade se tiverem extensão suficiente)



ou a repetição cíclica do padrão de desperdício de capacidade (quando causada por semáforos próximos com filas reduzidas). Em ambos os casos, tem-se a criação de uma sobre-demanda (ou seu aumento) por ineficiência no uso da capacidade existente.

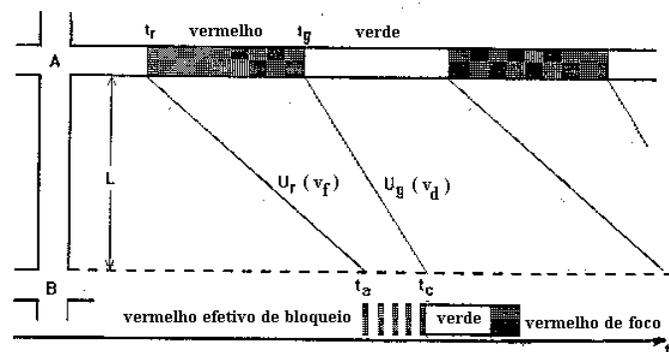
Pode-se verificar que a defasagem calculada por $\theta_{ij} = \frac{L_{ij} - z_{Bj}}{V_{ij}} - \frac{z_{Bj}}{w_{sj}}$

ou $\theta_{ij} = \frac{L_{ij} - z_{Bj}}{V_{ij}} - \frac{n_{Bj}}{S_j}$ representa um valor que permitiria a chegada

do pelotão ao final da dissipação da fila à jusante e, portanto, evitaria o desperdício de verde. Este é o valor máximo de defasagem que evita o desperdício de capacidade. Um valor menor fará o pelotão chegar antes da dissipação de filas e, embora gere atrasos, garantirá o aproveitamento da capacidade para um trecho que não tem capacidade de armazenamento de filas suficiente para utilizar todo o verde efetivo da linha de retenção à montante.⁵

Os fenômenos de bloqueio são específicos de sistemas saturados e são

tanto mais prováveis quanto menor for a capacidade de armazenar filas no trecho anterior das aproximações semaforizadas em relação aos valores de fila geradas pela demanda manifesta. Este é, portanto, um aspecto normalmente crítico quando os trechos tem pequena extensão ou quando as filas são potencialmente grandes (como nos períodos de sobre-demanda). Além disso, a interação entre filas pode afetar vias transversais e ter efeitos ainda mais acentuados de redução de capacidade global. Este é o cenário peculiar do que é denominado de *grid-lock* ou super-saturação.



O ponto inicial da operação efetiva na linha de retenção à montante de um trecho com capacidade de armazenamento de fila saturada (toda a extensão ocupada por fila) é determinado pelo instante em que o movimento da fila acumulada atinge o início do trecho. Pode-se

verificar que a defasagem calculada por $\theta_{ij} = \frac{z_{Bj}}{w_{sj}}$ ou $\theta_{ij} = \frac{n_{Bj}}{S_j}$, dado

que $L_{ij} = z_B$, representa um valor mínimo que garante a possibilidade de movimento efetivo na linha de retenção à montante.⁶

Por fim, como a necessidade de armazenamento necessária para evitar riscos de bloqueio quando há sobre-demanda (capacidade insuficiente) é normalmente muito maior que as extensões existentes, as situações

⁵ Sendo a fila máxima armazenada igual a L/ℓ_v veículos por faixa e o fluxo de saturação igual a S_f por faixa tem-se que a situação de desperdício de verde pode ser identificada pela condição $n_L < n_g \Rightarrow L/\ell_v < S_f \cdot g_{ef}$ (ou seja, $L < 3 \cdot g_{ef}$ em metros e segundos). O valor da defasagem máxima é função da fila acumulada durante o vermelho da via transversal.

⁶ Sendo a fila máxima armazenada igual a L/ℓ_v veículos por faixa e o fluxo de saturação igual a S_f por faixa tem-se que a defasagem mínima é igual ao tempo necessário para movimentar a fila de L/ℓ_v com fluxo de saturação S_f , que é

$L/(\ell_v \cdot S_f)$ (ou seja, $L/3$ em metros e segundos). O movimento terá, a partir deste instante, uma capacidade de movimento igual ao volume escoado na interseção à jusante. Este é o aspecto que relaciona os fenômenos de bloqueio e balanceamento.

de bloqueio podem ser inevitáveis e a questão de alocar o vermelho de fato entre os estágios concorrentes no semáforo tem de considerar a prioridade de cada rota e as repartições de verde entre aproximações adjacentes. O objetivo é normalmente traduzido na obtenção de um padrão de filas estáveis no sistema viário (isto é, que acumula as filas correspondentes à sobre-demanda nos locais e momentos mais adequados para evitar repercussões de perda de capacidade).

O balanceamento de capacidade (especificamente para o tráfego veicular) pode ser formulado como uma condição para cada aproximação viária mas manipula variáveis da interseção como um todo (ambos os sentidos de uma via bidirecional e todas as aproximações de cada semáforo), introduzindo um grande número de restrições muitas vezes difíceis de satisfazer simultaneamente.

Para uma dada aproximação, a restrição de balanceamento exige que a alimentação dos diversos fluxos seja coerente com sua capacidade de escoamento ou armazenamento de fila. Em um sistema saturado, este é um princípio que tem de ser normalmente aplicado a partir da interseção crítica e utilizado para limitar a alimentação admitida pelos semáforos de montante. Naturalmente, se g_{efA} e g_{efB} são os tempos de verde à montante (anterior) e à jusante (posterior), a restrição de

balanceamento exige que $g_{efA} \leq \frac{g_{efB} \cdot S_B - N_c + L/\ell_v \cdot t_c}{S_A} T_P$ para evitar

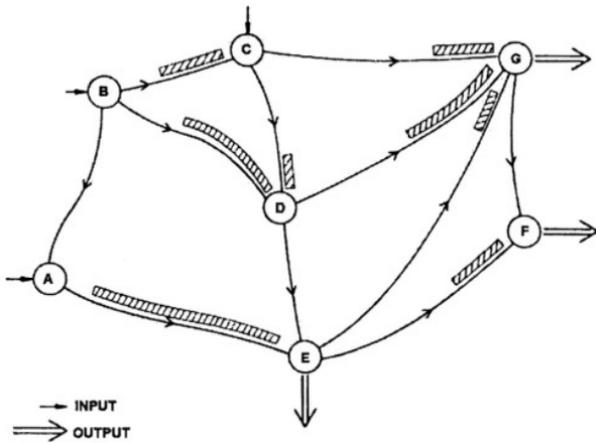
a saturação da capacidade de armazenamento de fila por saturação antes do final do período de pico T_P , onde N_c é o número de veículos por ciclo admitidos das vias transversais. Tanto g_{efA} quanto N_c serão limitados pela repartição de tempos de verde ou pelo vermelho de fato decorrente dos bloqueios, com a alocação de capacidade determinada pela defasagem em relação ao instante de movimentação das filas.

Um período de verde maior que o determinado pela condição de balanceamento será necessariamente transformado em um período de vermelho efetivo de bloqueio. A definição das defasagens, neste contexto, determina a posição dos períodos de verde dos estágios em relação ao início do movimento da fila à montante, traduzindo-se na priorização da alocação da capacidade à jusante. O efeito adicional de permitir a formação de períodos com desperdício de verde também resulta da sincronização e afeta a capacidade efetiva nos semáforos.

Existem, portanto, dois fenômenos iniciais que podem prejudicar a produtividade da operação do tráfego em sistemas saturados: o desperdício de verde (tempo de verde sem alimentação máxima de fluxo) e o vermelho efetivo de bloqueio (tempo de verde com movimento impedido pela fila adiante).

Além disso, existem perdas de eficiência decorrentes a interação de filas associada com a existência de super-saturação (com bloqueio pelas filas transversais).

Por este motivo, a coordenação de redes de semáforos saturadas muitas vezes utiliza um princípio de maximização da produtividade do tráfego (*throughput*, isto é, o fluxo escoado através do sistema viário), que corresponde à minimizar estas perdas de eficiência do movimento nas interseções.⁷ Além disso, o atendimento à demanda com capacidade insuficiente normalmente exige decisões dinâmicas de retenção e liberação (*store and forward*) que ajustam o controle do tráfego ao longo do período de análise, em função de uma estratégia global.



Uma formulação básica do problema de retenção e liberação para o controle de tráfego inicialmente divide o período de análise T em sub-períodos t e decide a alocação da capacidade na rede viária resolvendo um problema matemático de otimização

$$\min_{\{t_{ct}, g_{ik}^k\}} \sum_{at} f_{at} [n_{at}]$$

$$\text{s.a.} \sum_k g_{it}^k + t_{pi} = t_{ct}, u_{it}^k = g_{it}^k / t_{ct}, g_{imin}^k \leq g_{it}^k \leq g_{imax}^k$$

$$n_{at+1} = n_{at} + (Q_{at} - q_{at}) \tau_t, q_{at} = \sum_{ik} \delta_{ki}^a \cdot u_{ki} \cdot S_{at}$$

$$Q_{bt} = Q_{bt}^{ext} + \sum_a p_{abt} \cdot q_{at}, n_{a0} = 0, n_{aT} = 0, n_{at} \leq n_{amax}$$

onde $f_{at} [n_{at}]$ é uma função de desempenho (função da filas).

Naturalmente, esta formulação básica não reconhece diversos fenômenos relevantes (não admite filas iniciais ou finais, não representa efeitos de bloqueio na dissipação das filas, não representa as defasagens entre semáforos e a dispersão de pelotões, etc ...) e diversas restrições práticas (ciclos mínimos e máximos, capacidades com fluxo oposto, etc ...), além de ignorar algumas variáveis de decisão que podem ser importantes (além do ciclo e verde). É apenas um exemplo ilustrativo de uma formulação que pode ser generalizada e prover decisões dinâmicas (no caso, ciclos e verdes em cada sub-período t).

Este conjunto de restrições e relações, especificamente importantes em sistemas saturados ou não saturados, coexistem e adicionam diversos aspectos que tem de ser adequadamente considerados nas ferramentas tradicionais de projeto de coordenação semafórica.

De forma geral, em condições saturadas ou não, para cada ligação viária entre interseções adjacentes tem-se normalmente um conjunto de restrições decorrentes das condições de sincronização perfeita nesta ligação. No entanto, a decisão sobre a defasagem entre interseções adjacentes vincula, simultaneamente, todas as ligações envolvidas, da mesma maneira como no caso dos sentidos opostos de um corredor.

As relações que vinculam as decisões sobre defasagens de diferentes ligações viárias são chamadas de restrições de fechamento e condicionam de forma muito forte o conjunto de estratégias de coordenação factíveis.

Por este motivo, a coordenação por princípios de maximização de banda verde ou produtividade do tráfego devem ser formuladas de forma a selecionar entre alternativas de coordenação imperfeita. Em

⁷ A produtividade do tráfego (ou *throughput*) é normalmente medido em veículos/hora através de uma seção (a interseção crítica, se for claramente identificável) ou cordão de referência (por exemplo, o limite da área central). Uma opção alternativa é medir esta produtividade em toda a rede viária através de variáveis como veículos-quilômetro/hora, que pondera o fluxo em cada trecho pela sua extensão (ou mesmo veículo-hora/hora, que pondera o fluxo pelo tempo de viário e mede a fila média no sistema viário, e veículo-quilômetro/veículo-hora, que pondera o fluxo pela velocidade e mede a velocidade média global ou índice de permanência na rede viária). Estas alternativas têm a desvantagem de não levar em conta quais são os elementos críticos da rede viária, que comandam sua operação.

geral, recorre-se a procedimentos numéricos de otimização (como os do MAXBAND ou do TRANSYT). É importante, no entanto, antes avaliar a pertinência de cada estratégia de solução e do modelo de análise de tráfego utilizado. Por exemplo, o MAXBAND ignora a dispersão de pelotões e não considera adequadamente as filas intermediárias, sendo mais aplicável a corredores arteriais com níveis de saturação e espaçamento entre interseções intermediários. Por sua vez, o TRANSYT permitiria considerar de forma mais adequada o problema de sincronizar redes mais complexas e variadas mas ainda representa de forma imperfeita as condições de sobre-demanda (pelo menos nas versões tradicionalmente utilizadas). As formulações efetivamente dinâmicas e capazes de representar a dinâmica de formação e dissipação de filas de forma adequada são desenvolvimentos ainda em avaliação (como as versões mais recentes dos softwares mencionados).