



Escola Politécnica da Universidade de São Paulo

Departamento de Engenharia de Transportes

Título do Projeto: Laboratório Didático no Ensino de Engenharia
- Sistemas Inteligentes de Transportes (ITS)

São Paulo, Julho de 2017

1.1. Resumo teórico sobre Priorização Semafórica

Num primeiro momento serão expostas definições essenciais para o entendimento do funcionamento da priorização semafórica. Segundo Cucci (2016) são elas:

Estágio: intervalo de tempo em que um ou mais movimentos compatíveis recebem simultaneamente o direito de passagem. O estágio é composto pelo tempo de verde e o tempo de entreverdes.

Entreverde: intervalo de tempo compreendido entre o final do verde de um estágio e o início do verde do estágio subsequente. É formado pelas seguintes parcelas: tempo de amarelo (T_a) e tempo de vermelho geral (T_{vg}).

$$\text{Entreverdes} = T_a + T_{vg}$$

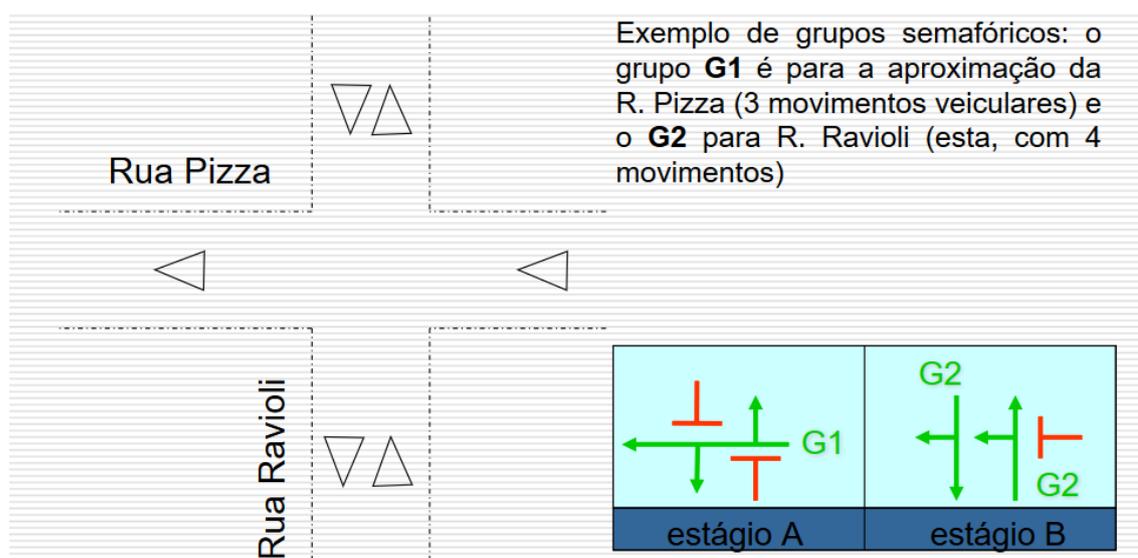
Programação semafórica: estabelecimento da sequência (ou das sequências) de estágios e dos entreverdes para operação de um semáforo.

Ciclo: sequência completa dos estágios de uma sinalização semafórica.

Plano semafórico: conjunto de elementos que caracteriza a programação da sinalização semafórica para uma interseção ou seção de via, num determinado período do dia.

Grupo semafórico: grupo de movimentos que recebe as mesmas indicações luminosas. É representado normalmente por G_1, G_2, \dots, G_n . A seguir, na Figura 4, está explicitada a representação dos mesmos.

Figura 1 – Exemplo de grupo semafórico



Fonte: Cucci (2016)

A seguir serão abordadas as diferentes formas de controle semafórico. De acordo com ¹Oliveira Neto (2004), existem três tipos de controle de sistemas semafóricos: isolado, coordenado e centralizado.

Sistema isolados de semáforos: não possuem nenhuma ligação ou relação com os semáforos dos cruzamentos próximos, ou seja, operam independentemente dos demais semáforos. Em geral são usados em locais de baixa densidade de semáforos ou em pontos que tem operação independente do resto da malha viária ao seu redor (grandes praças, por exemplo).

Sistema coordenado de semáforos: é um agrupamento de semáforos em rede, que operam coordenados. Em geral, essa coordenação é feita por ligação física entre os componentes da rede, via cabos. A principal vantagem da operação dos semáforos em rede é a possibilidade de se determinar os instantes de abertura de semáforos próximos, via programação, proporcionando uma “onda verde” aos usuários da via.

¹ OLIVEIRA NETO, F.M. (2004). **Priorização do Transporte Coletivo por Ônibus em Sistemas Centralizados de Controle de Tráfego**. Dissertação de Mestrado, Programa de Mestrado em Engenharia de Transportes, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, CE, 162 fl.

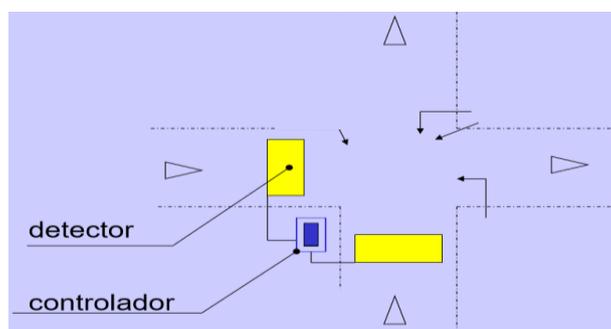
Sistema centralizado de semáforos: estratégia de controle na qual a região a ser controlada é subdividida em subáreas, com suas interseções operadas por controladores de campo, que se comunicam com um computador denominado de computador de zona, responsável por gerenciar os controladores de uma determinada área. Estes computadores de zona, por sua vez, se comunicam com um computador central, que realiza o controle e direciona as ações para os controladores locais. Dentre as principais vantagens estão a permissão de alterações remotas e o controle de falhas. Já a principal desvantagem é o investimento inicial relativamente alto.

A seguir serão introduzidos os modos de operação dos semáforos, eles são divididos em três: tempos fixos, atuados e em tempo real.

Tempos fixos: o sistema de controle é feito a partir de planos específicos pré-calculados para as várias situações do dia. São implementados automaticamente, obedecendo uma tabela horária. A operação semafórica em tempos fixos é a predominante no Brasil. Para obter resultados satisfatórios, esse tipo de operação depende de uma grande quantidade de dados (de demanda e oferta).

Semáforos atuados: é utilizado em semáforos isolados. A passagem do tráfego por dispositivos de detecção instalados nas vias é processada no controlador, que adapta os tempos semafóricos para atender às variações temporais da demanda veicular. Dessa forma, não existe programação horária prévia. A seguir – Figura 5 - segue um esquema do funcionamento dos semáforos atuados.

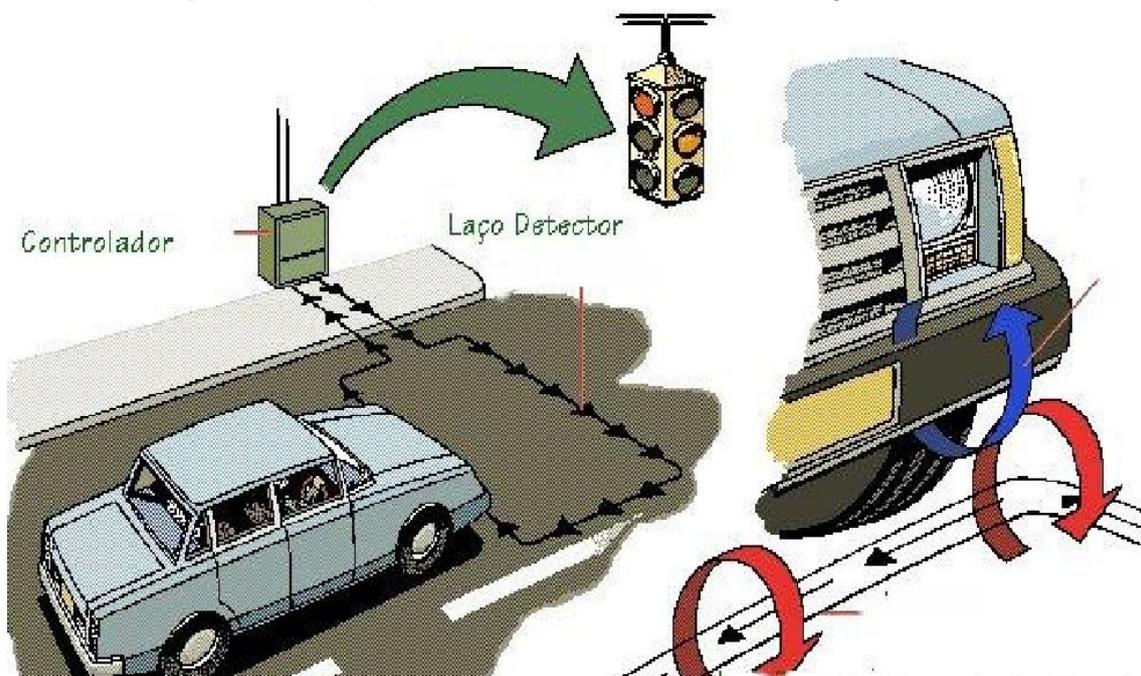
Figura 2 – Esquema do funcionamento dos semáforos atuados



Fonte: Cucci (2016)

Semáforos com operação em tempo real: seu funcionamento é semelhante ao modo atuado, porém, operando em redes e com processamento dos dados por um computador central. A passagem do tráfego pelos sistemas de detecção instalados nas vias é informada aos computadores, que adaptam os tempos semafóricos para atender às variações da demanda veicular. Os sistemas em tempo real otimizam continuamente três parâmetros: ciclo, fração de verde e defasagem. A seguir segue a Figura 6 mostrando o modo como os veículos são detectados.

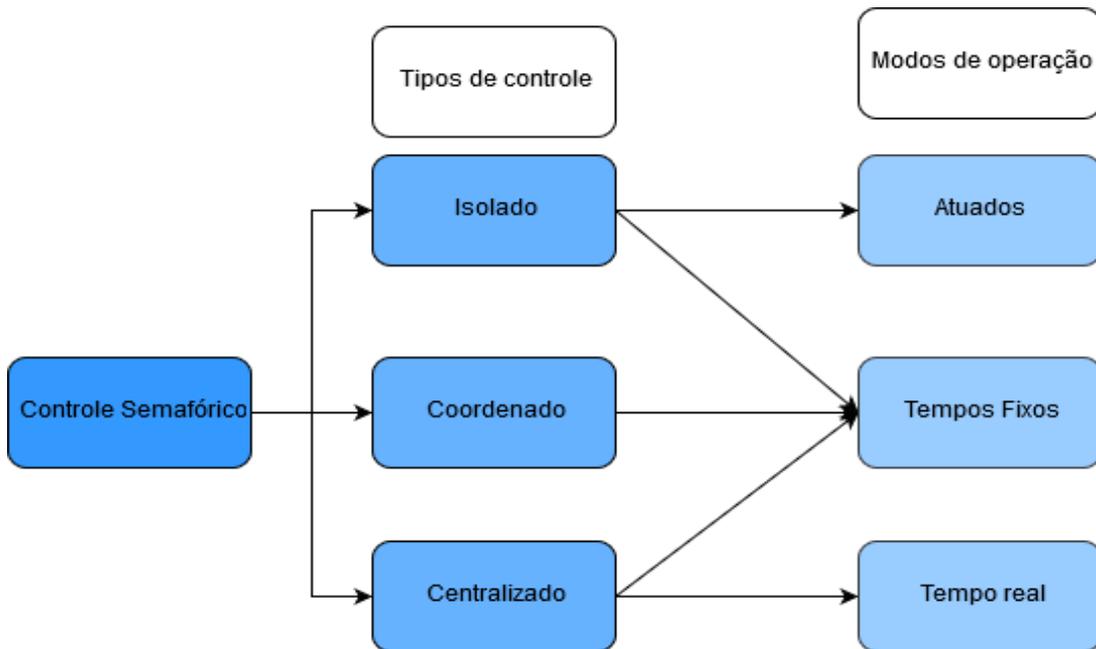
Figura 3 – Esquema do funcionamento do laço detector



Fonte: Cucci (2016)

A Figura 7 resume os diferentes sistemas de controle semafórico

Figura 4 - Esquema com os sistemas de controle semafórico



Fonte: Autor

Outro importante item que deve ser compreendido são as estratégias de priorização semafórica do transporte público. As prioridades são classificadas em duas categorias, passiva e ativa (adaptativa). A seguir essas estratégias serão apresentadas.

Prioridade Passiva: consiste em ajustar a programação semafórica manualmente ou através de programas, dando maior peso a aproximações de veículos com maior volume de passageiros (NETO, 2004). Neste tipo de operação, a prioridade para o transporte público coletivo pode ser dada por meio de configurações nos tempos semafóricos (ciclo, tempos de verde e defasagem) de forma que os favoreçam. Segundo²Gardner et al. (2009), embora a estratégia passiva não requeira modificações na infraestrutura, os benefícios obtidos são modestos e por isso não são amplamente implantados. A prioridade passiva é

² GARDNER, K. et al. **Review of Bus Priority at Traffic Signals around the World**. UITP Working Group. [S.l.]. 2009.

mais indicada para corredores onde os tempos de embarque/desembarque não variam muito (OLIVEIRA NETO, 2004). Dessa forma, a prioridade passiva não será explorada nas atividades de laboratórios.

Prioridade Ativa ou Adaptativa: Segundo Peron (2015), é necessário para o seu funcionamento a detecção da presença dos veículos nas proximidades das interseções e depende da lógica do sistema e das condições do tráfego. O sistema deve ser capaz de detectar a presença de um coletivo e prever o instante da sua chegada à interseção. Para tanto, os ônibus devem ser equipados com dispositivos de identificação veicular como *transponders*, GPS ou dispositivos similares. As principais estratégias são apresentadas a seguir:

- extensão do verde: extensão do tempo de verde ao final do estágio de passagem do veículo detectado;
- antecipação do verde: um tempo de verde adicional é alocado no início do estágio de passagem do veículo detectado, antecipando o início do estágio de verde;
- interrupção do vermelho (*Red Truncation*): um curto período de verde é inserido durante o vermelho na aproximação do veículo detectado, enquanto os veículos da via conflitante são forçados a parar;
- supressão de estágios: um ou mais estágios de movimentos de baixa demanda podem ser suprimidos em um determinado ciclo, para priorizar determinado movimento ou veículo do transporte público coletivo;
- interrupção do verde: se o ônibus é detectado distante da interseção, interrompe-se o período de verde de passagem do veículo detectado na via priorizada, logo a probabilidade deste veículo chegar à interseção no próximo período de verde aumenta, já que durante o tempo que o ônibus leva para se deslocar do ponto de detecção até o semáforo a fase vermelha do semáforo deve ter passado para verde.

As medidas de prioridade ativa também podem ser classificadas dentro de duas principais categorias: prioridade incondicional e condicional. Na primeira, a prioridade é dada sem nenhuma restrição de variáveis de controle, sendo

também conhecida como prioridade absoluta. Na segunda, a prioridade é garantida se condições predefinidas são satisfeitas, devendo-se estabelecer limites sobre as variáveis controladas.

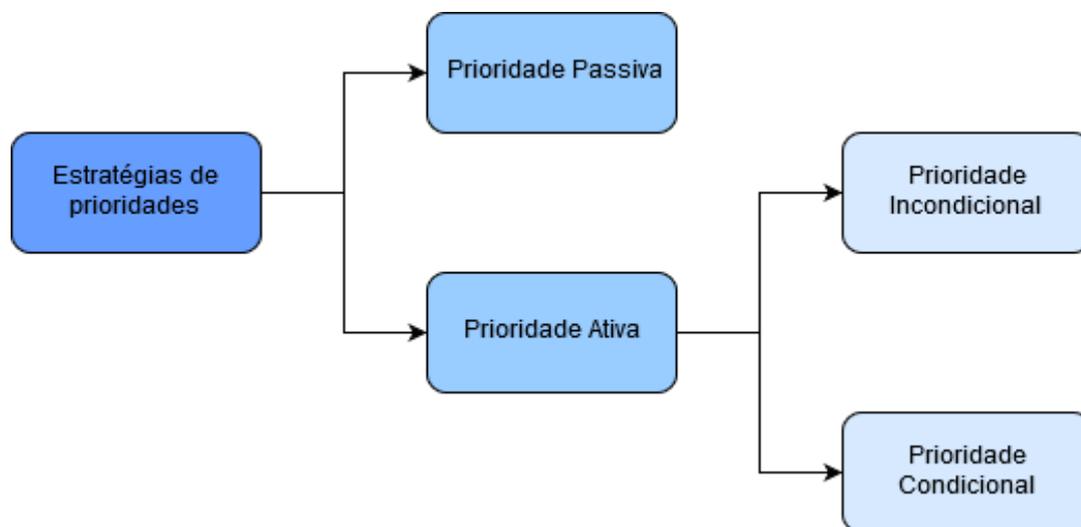
Prioridade incondicional: em um sistema de prioridade incondicional, a requisição de prioridade é feita cada vez que um ônibus detectado se aproxima de uma interseção semaforizada. O pedido de prioridade é emitido independentemente de quaisquer condições existentes (como atraso ou lotação). No entanto, essa estratégia tem alguns efeitos negativos. Quando um ônibus emitir um sinal de requisição de passagem e for aplicada uma determinada estratégia de prioridade, o tempo de verde para as vias não priorizadas pode ser reduzido, dessa forma diminuindo o fluxo da via e limitando o número de veículos que consegue passar pela intersecção. Outro fato que prejudica o sistema é a prioridade a ser requisitada para um veículo que está aderente a sua programação horária. Caso isso ocorra, geram-se conflitos com a programação, podendo ocasionar diversos problemas como redução da regularidade e aumento dos tempos de ciclo, uma vez que os ônibus chegariam mais rápido aos pontos de parada. Além do que pode haver a formação de filas de ônibus em pontos de parada, pois quando os veículos fogem da sua programação horária, podem chegar muitos veículos nos pontos ao mesmo tempo.

Prioridade condicional: os critérios da prioridade condicional buscam evitar impactos negativos para a corrente do tráfego não priorizado e podem maximizar os benefícios do TSP (Transit Signal Priority), conforme afirmam ³Furth e Muller, (2002). Dessa forma, pode-se requisitar prioridade apenas em casos que se entendam necessários, como quando o ônibus está atrasado em relação à programação horária, ou ainda quando o *headway* entre dois ônibus está maior que o ideal. Um fator a ser considerado é se o sistema possui folga em relação à programação horária. Caso ela seja muito justa, os ônibus estarão, em sua

³ FURTH, P. G.; MULLER, T. H. J. **Transportation Research Record 1731 - Conditional Bus Priority at Signalized Intersections**. [S.l.], p. 23-30. (00-0873).

maioria, atrasados, prejudicando o tráfego não priorizado. A Figura 8 traz um resumo dessas prioridades.

Figura 5 – Esquema com as estratégias de prioridades semafórica



Fonte: Autor

1.2. Resumo teórico sobre os modelos de Wiedemann

Veículos se movem na rede através de um modelo de fluxo de tráfego. A qualidade do modelo de fluxo de tráfego é essencial para a qualidade da simulação. Em oposição aos modelos simplistas, que em sua maioria utilizam uma velocidade constante e uma lógica determinística, o *car-following*, adotado pelo Vissim utiliza o modelo psico-físico de percepção desenvolvido por Wiedemann (1974).

O conceito básico deste modelo é que o condutor de um veículo que esteja mais rápido começa a desacelerar assim que ele atingir o limiar da percepção com relação a um veículo que esteja mais devagar a sua frente. Como o condutor não consegue determinar exatamente a velocidade do veículo a sua frente, a sua velocidade irá cair abaixo da velocidade do veículo a sua frente, até que começa a acelerar novamente até alcançar o limiar da percepção novamente.

Dessa forma, há uma leve e contínua aceleração e desaceleração. O comportamento do motorista é considerado com uma distribuição de funções de velocidade e de comportamento espacial.

O modelo do *car-following* foi calibrado através de múltiplas medições no Instituto de Estudos de Transportes da Karlsruhe [Institute of Technology (KIT)], Alemanha. Edições recentes certificam de que mudanças no comportamento do condutor e nos aspectos dos veículos são considerados.

Para rodovias com múltiplas faixas, o condutor no modelo do Vissim leva em conta não apenas os veículos a sua frente, que por padrão é levado em conta os 4 primeiros veículos que estão a sua frente, mas também os veículos nas duas faixas adjacentes. Além disso, ao se aproximar de um controle semafórico em um raio de 100 metros, o condutor passa a ter um elevado estado de atenção, isto é, o seu tempo de reação e as suas manobras com relação ao carro da frente passam a ser menores.

O Vissim simula o fluxo de tráfego movimentando unidades condutor-veículo (*driver- vehicle-units*) através de uma rede. Cada motorista tem um comportamento específico e é atribuído a um veículo específico. Como consequência, o comportamento durante a condução corresponde às capacidades de seu veículo. Atributos caracterizando cada unidade condutor-veículo podem ser subdivididas nas três categorias seguintes:

- Especificações técnicas dos veículos, como por exemplo:
 - Comprimento do veículo
 - Velocidade máxima
 - Poder de aceleração
 - Atual posição do veículo na rede
 - Velocidade e aceleração
- Comportamento da unidade condutor-veículo, por exemplo:
 - Limiar psico-físico da percepção do condutor, ex: habilidade de estimar, percepção da segurança, vontade de se arriscar.
 - Memória do condutor
 - Aceleração baseada na velocidade atual e na velocidade desejada

- Interdependência das unidades condutor-veículo, por exemplo:
 - Referência aos veículos na frente e atrás nas próprias faixas como nas faixas do lado.
 - Referência ao trecho da rede no momento e no próximo nó
 - Referência à próxima intersecção semafórica.

Modelos de Wiedemann 74

Aqui será explicado quais atributos são levados em conta nos dois principais fatores do modelo Wiedemann 74. Esse modelo é utilizado pelo Vissim, seu uso é recomendado onde se deseja modelar características de trechos urbanos.

O modelo de Wiedemann parte do princípio que há 4 estados/modos de condução. Esses 4 estados serão descritos abaixo.

1. Free Driving (Dirigir livremente):

Nesse estado não há influência dos carros na frente do veículo. Nele, o condutor procura chegar e manter a velocidade desejada (velocidade de fluxo livre). Na verdade, a velocidade irá variar devido às imperfeições do controle do acelerador. Dessa forma, há uma pequena oscilação em torno da velocidade desejada.

2. Approaching (Aproximação):

Processo que o piloto adapta a velocidade do seu carro para a velocidade inferior do carro que está a sua frente. Nessa situação, o carro desacelera para que não haja diferença de velocidade com o carro da frente, no momento que ele chegar à distância de segurança necessária.

3. Following (Perseguição):

O condutor segue o carro a sua frente, sem conscientemente desacelerar e acelerar. Ele mantém uma distância de segurança mais ou menos constante, uma vez que, devido às imperfeições do controle do acelerador, a diferença de velocidade oscila em torno de 0.

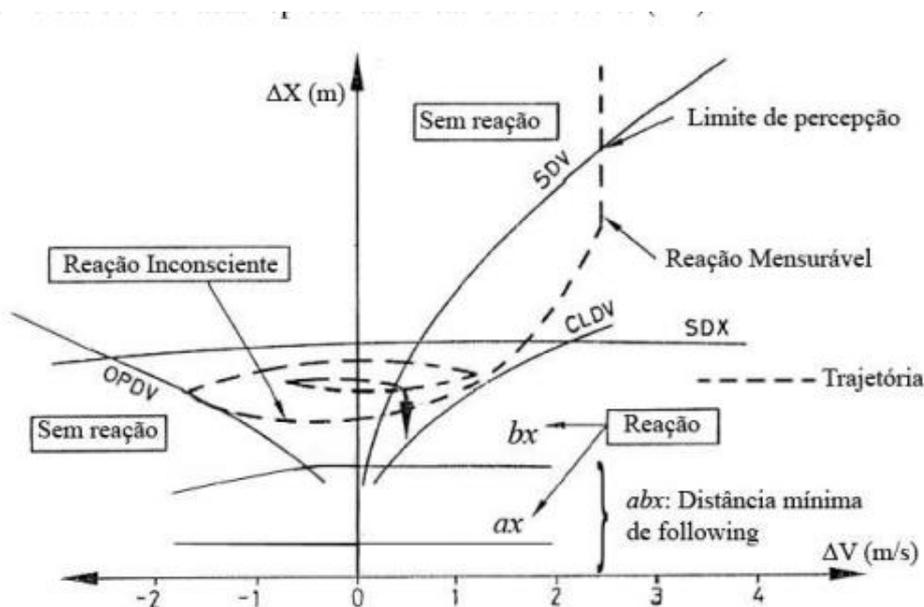
4. Braking (Frenagem):

O condutor desacelera em uma taxa que varia de média a alta, caso a distância de segurança caia abaixo da desejada. Isso pode acontecer se o veículo a frente muda bruscamente a sua velocidade ou se um terceiro veículo entra no espaço entre dois veículos.

Para cada um dos quatro estados de condução, a aceleração depende de certos parâmetros como a velocidade instantânea do veículo, a diferença de velocidade, a distância do veículo precedente, assim como características individuais do piloto e de seu carro.

Os condutores mudam de um estado para outro assim que alcançam determinado limite que pode ser descrito como função da diferença de velocidade e distância. Por exemplo, pequenas diferenças de velocidades só são percebidas em pequenas distâncias, já grandes diferenças são percebidas em grandes distâncias. Isso pode ser percebido de acordo com a Figura 9, onde pode ser visualizado que o limiar da percepção, ou limite de percepção (*perception threshold*), aumenta com o aumento da diferença de velocidade.

Figura 6 - Gráfico do modelo de *car following* de Wiedemann



Fonte: Lacerda e Neto 2005

Nesse gráfico (Figura 9) a ordenada representa a distância entre o veículo seguidor e o veículo líder (“veículo seguido”) enquanto o eixo das abscissas representa a diferença de velocidade entre esses veículos.

Quando o veículo líder encontra-se em velocidade constante e o veículo seguidor também, porém com uma velocidade superior ao do veículo seguido, a distância ΔX entre os 2 veículos se reduz enquanto a diferença de velocidades se mantém constante. A partir do momento quando o veículo seguidor notar a presença do veículo líder, ele passará a reagir, reduzindo lentamente a sua velocidade, de forma que ΔX continua caindo, mas com menor intensidade, ao passo que ΔV não é mais constante.

Esse limite de percepção do veículo a sua frente (veículo líder) é representado na Figura 9 pela linha SDV – *Selective Vehicle Detection*. O limite SDV impõe aos motoristas alguma ação de aceleração ou desaceleração, portanto são comumente chamados de pontos de ação (*action points*).

O veículo seguidor continua diminuindo sua velocidade até que sua velocidade fique menor que a do veículo líder. Ao perceber que o espaçamento para o veículo da frente começa a aumentar, o veículo seguidor retorna a acelerar próximo ao ponto de ação OPDV - *Opening Difference in Velocity*. A partir deste ponto, o módulo de ΔV começa a diminuir, mas o ΔX ainda aumenta, pois a velocidade do veículo seguidor ainda é menor que a do seu líder.

Quando o veículo seguidor possuir velocidade maior do que o líder, ou seja, quando ΔV se torna positivo novamente, ΔX recomeça a diminuir, e o motorista continua a acelerar até chegar ao ponto de ação CLDV - *Closing Difference in Velocity*, quando ele então retira o pé do acelerador. A partir deste ponto, o veículo seguidor ainda se aproxima do veículo líder (ΔX diminui), pois o ΔV ainda é positivo.

Em seguida, o espaçamento começa a aumentar novamente quando ΔV se torna negativo, e o motorista reagirá no ponto de ação OPDV novamente. Este comportamento oscilatório se repete, caracterizando o regime de *following* (Lacerda e Castro Neto, 2015).

As percepções de diferença de velocidade, velocidade desejada pelo motorista e distância de segurança variam de acordo com a população.

O modelo é denominado psico-físico *car-following*, pois leva em conta aspectos psicológicos assim como fisiológicos da percepção do condutor. Com relação aos parâmetros que afetam o modelo, há uma explicação a seu respeito no Anexo C.

2. Bibliografia

Cucci, J.(2016). Slides de Aula, disponível em http://meusite.mackenzie.com.br/professor_cucci/ acesso em 20/01/2017

CUNTO, F. J. C.; LOUREIRO, F. G. **O uso da microssimulação na avaliação do desempenho da segurança viária**. Universidade Federal do Ceará, Departamento de Engenharia de Transportes. Fortaleza, p. 19. 2011

FURTH, P. G.; MULLER, T. H. J. **Transportation Research Record 1731 - Conditional Bus Priority at Signalized Intersections**. [S.l.], p. 23-30. (00-0873).

GARDNER, K. et al. **Review of Bus Priority at Traffic Signals around the World**. UITP Working Group. [S.l.]. 2009.

LACERDA, V. M. ; NETO M. M. C. **Considerações sobre a calibração do modelo de car following do vissim para vias arteriais urbanas**. In: Anais do Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes–ANPET Curitiba, 2005. Disponível em <http://www.anpet.org.br/xxviii/anpet/anais/documents/AC514.pdf>

NETO, F. M. D. O. **Priorização do Transporte Coletivo Por Ônibus Em Sistemas Centralizados De Controle De Tráfego**. Universidade Federal do Ceará. Fortaleza. 2004.

OLIVEIRA NETO, F.M. (2004). **Priorização do Transporte Coletivo por Ônibus em Sistemas Centralizados de Controle de Tráfego**. Dissertação de Mestrado, Programa de Mestrado em Engenharia de Transportes, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, CE, 162 fl.

PERON, L. **Contribuição Metodológica para aplicação de prioridade semaforica condicional em corredores de ônibus**. Dissertação apresentada à Escola Politécnica, São Paulo, 2015.

PTV (2014) **VISSIM 7.0. Manual do Usuário**. Planung Transport Verkehr AG, Karlsruhe, Germany.

PTV (2006) **VISVAP 2.16 USER MANUAL**. Planung Transport Verkehr AG, Karlsruhe, Germany.

Wiedemann, R. : **Simulation des Verkehrsflusses**. Schriftenreihe des Instituts für Verkehrswesen, Heft 8, Universität (TH) Karlsruhe (seit 2009 KIT – Karlsruher Institut für Technologie), 1974 (Traffic flow simulation)

3. Anexos

ANEXO C – Parâmetros do modelo de Wiedemann 74

Parâmetros do modelo do Car Following de Wiedemann 74

O modelo atualmente utilizado no Vissim é uma versão melhorada do modelo de Wiedemann 74, os parâmetros utilizados são:

- Average Standstill distance (distância média para frenagem)
 - (ax): Define a distância média desejada entre dois veículos. O valor fica numa margem de -1,0m a 1,0m, em relação ao valor padrão, e a sua distribuição é normal com média igual a 0m e desvio padrão de 0,3m em relação ao valor padrão. O valor padrão do Vissim é 2,0.
- Additive part of safety distance (parcela aditiva da distância de segurança)
 - (bx_{add}): Valor usado para o cálculo da distância de segurança desejada “d”. Permite ajustar o valor de tempo requisitado. O valor padrão é 2,0.
- Multiplicative part of safety distance (parcela multiplicativa da distância de segurança)
 - (bx_{mult}): Valor usado para o cálculo da distância de segurança desejada “d”. Permite ajustar o valor de tempo requisitado. Maiores valores significam distribuições mais espaçadas, logo maiores valores de desvio padrão na distância de segurança. O valor padrão do Vissim é 3,0.
- Desired distance (distância desejada)
 - (d): Define a distância que um veículo deseja estar em relação ao do frente. O seu valor é calculado por:

$$d = ax + bx$$

Na qual:

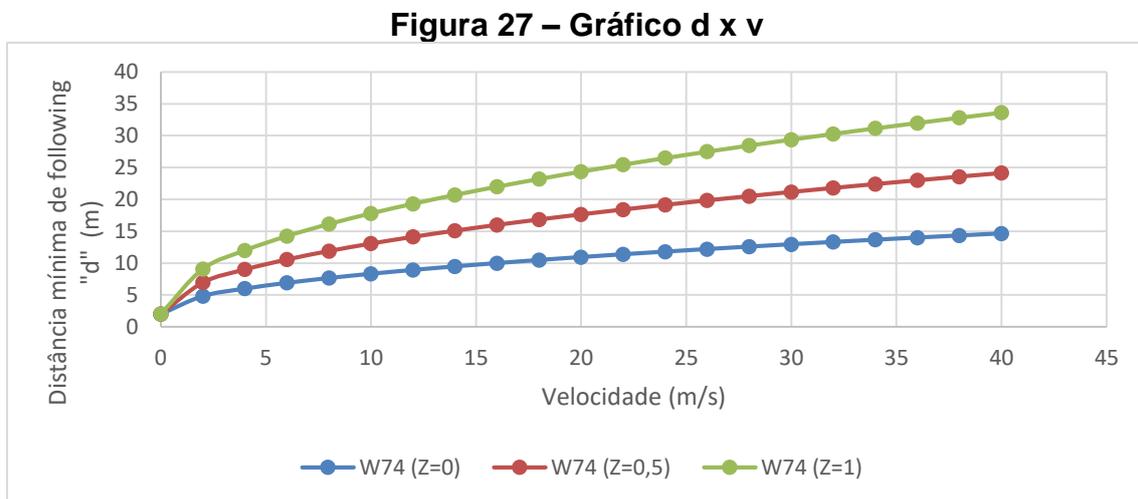
ax: distância média para frenagem

$$bx = (bx_{add} + bx_{mult} \times z) \times \sqrt{v}$$

v: velocidade do veículo (m/s)

z: é uma variável aleatória com distribuição normal $N(0,5;0,15)$, truncada entre 0 e 1, ou seja é distribuído em torno da média 0,5 e tem desvio padrão de 0,15, sendo seus valores mínimos e máximos - 0 e 1 respectivamente.

O efeito da variável aleatória “z” pode ser observado na Figura 27, um gráfico que demonstra os resultados da distância “d” em relação à velocidade. É possível observar que a distância mínima de *following* é maior conforme o valor de “z”.



Fonte: Autor

Taxa de fluxo de saturação

A taxa de fluxo de saturação define o número de veículos que passam em um link por uma hora. Os impactos causados por intersecções semaforicas e filas de trafego são descontados. A taxa de fluxo de saturação também depende dos seguintes parâmetros: velocidade, porcentagem de caminhões e número de faixas.

No Vissim define-se o fluxo de saturação combinando os parâmetros bx_{add} e bx_{mult} . Usuários experientes podem querer utilizar esses parâmetros para adaptar o modelo aos dados observados.

Lane change

No Vissim há uma diferenciação em duas situações que podem ocorrer a mudança de faixa. Elas são o *necessary lane change* e o *free lane change*. A seguir segue uma explicação sobre em quais situações elas são aplicadas.

- *Necessary lane change* (Mudança de faixa necessária)
 - A mudança de faixa é necessária para que o veículo consiga chegar no conector que o leva à faixa desejada para a sua rota. Para uma mudança de faixa necessária, os parâmetros de comportamento de condução (*driving behaviour parameters*) contém a máxima desaceleração aceitável para o veículo que deseja mudar de faixa e o veículo que esta chegando por trás.
- *Free lane change* (Mudança de faixa livre)
 - A mudança de faixa acontece livremente, caso haja mais espaço e um incremento na velocidade seja exigido. Nessa situação, o Vissim checa a distância de segurança desejada para o veículo posterior na nova faixa. A distância de segurança desejada depende da velocidade do veículo que deseja mudar de faixa e da velocidade do veículo precedente. Não se consegue mudar o grau de agressividade para a mudança de faixa livre, mas se pode influenciar a mudança de faixa livre ao se mudar a distância de segurança. As distâncias de segurança são usadas para especificar o comportamento do car-following.

Para ambas as mudanças de faixa é necessário primeiro um espaço aceitável na direção da viagem. O tamanho do espaço depende de duas velocidades:

- Velocidade do veículo que está mudando de faixa

- Velocidade do veículo que vem chegando por trás na faixa que será feita a manobra.

Para mudanças de faixas o intervalo de tempo também depende da agressividade do motorista. Neste caso, o máximo atraso nos parâmetros de comportamento do motorista está incluso no cálculo do intervalo de tempo.