

Modelos Microscópicos de Tráfego



PTR3531 - Engenharia de Tráfego

**Prof. Cassiano A. Isler
2022**

- Movimento de Veículo Independente
- Efeito dos Elementos de Tráfego
 - Características dos Veículos
 - Características dos Motoristas
 - Características do Ambiente
- Modelagem das interações entre veículos
 - Seguimento Veicular (*Car-Following*)

MOVIMENTO DE VEÍCULO INDEPENDENTE

Movimento de veículo independente

Movimento de um único veículo modelado por equações fundamentais estabelecidas pelas leis da Física.

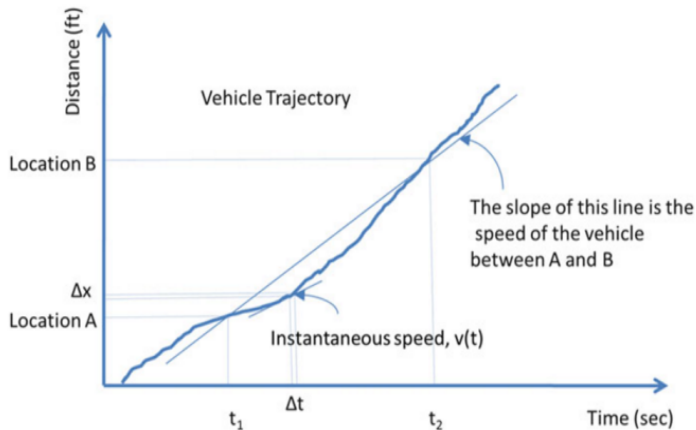
Compreensão do desempenho das correntes de tráfego e da teoria do fluxo de tráfego (modelos macroscópicos).

Relação entre parâmetros de aceleração, velocidade, distância percorrida, tempo de viagem etc.

Tipos de movimento compreendem três casos:

- Aceleração nula (velocidade constante)
- Aceleração constante (velocidade variável)
- Aceleração variável (velocidade variável)

Movimento de veículo independente



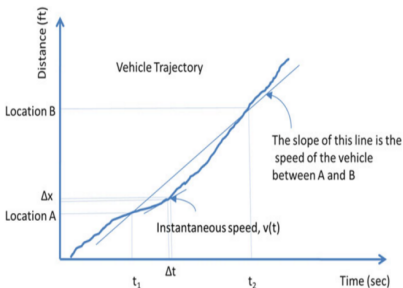
Adaptado de "Elefteriadou, Lily. **An introduction to traffic flow theory**. Springer: New York, 2014. 262 p."

Movimento de veículo independente

Velocidade média entre AB:

$$v_{AB} = \frac{d_{AB}}{(t_2 - t_1)}$$

onde d_{AB} é distância entre os pontos A e B e $(t_2 - t_1)$ é o tempo necessário para percorrer d_{AB} .



Velocidade instantânea em t:

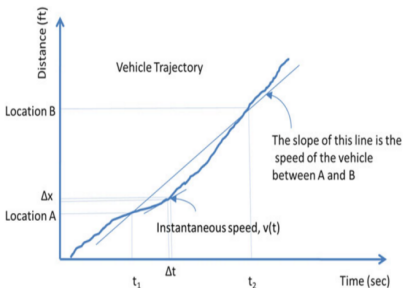
$$v(t) = \frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{dx}{dt}$$

onde $\Delta x \approx dx$ é a variação instantânea no espaço e $\Delta t \approx dt$ é a variação instantânea no tempo.

Movimento de veículo independente

Distância percorrida em dt :

$$dx = v(t)dt$$



Distância percorrida em função da velocidade em um intervalo $[t_0; t]$:

$$\int_{t_0}^t dx = \int_{t_0}^t v(t)dt$$

$$x(t) - x(t_0) = \int_{t_0}^t v(t)dt$$

$$x(t) = x(t_0) + \int_{t_0}^t v(t)dt$$

Adaptado de "Elefteriadou, Lily. **An introduction to traffic flow theory**. Springer: New York, 2014. 262 p."

Movimento de veículo independente

Varição da velocidade por unidade de tempo (aceleração):

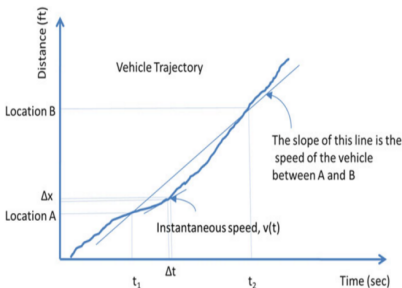
$$a(t) = \frac{dv}{dt} = \frac{d^2x}{dt^2}$$

Velocidade em função da aceleração em um intervalo $[t_0; t]$:

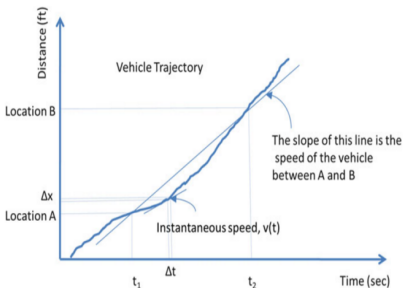
$$\int_{t_0}^t dv = \int_{t_0}^t a(t)dt$$

$$v(t) - v(t_0) = \int_{t_0}^t a(t)dt$$

$$v(t) = v(t_0) + \int_{t_0}^t a(t)dt$$



Movimento de veículo independente



Varição da aceleração por unidade tempo (Jolt):

$$j(t) = \frac{da}{dt} = \frac{d^2v}{dt^2} = \frac{d^3x}{dt^3}$$

Movimento de veículo independente

- **Aceleração nula (velocidade constante):** $v(t) = v = \text{constante}$

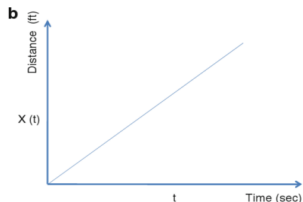
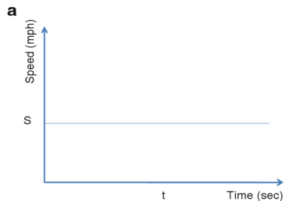
$$x(t) = x(t_0) + \int_{t_0}^t v dt$$

$$x(t) = x(t_0) + v \cdot \int_{t_0}^t dt$$

$$x(t) = x(t_0) + v \cdot (t - t_0)$$

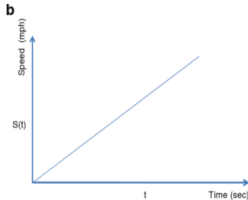
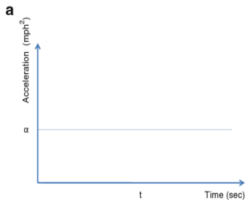
Se $x(t_0) = 0$ e $t_0 = 0$ então:

$$x(t) = v \cdot t$$



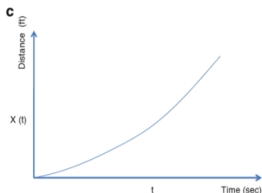
Movimento de veículo independente

- **Aceleração constante (velocidade variável):** $a(t) = a = \text{constante}$



$$v(t) = v(t_0) + \int_{t_0}^t a dt$$

$$v(t) = v(t_0) + a \cdot \int_{t_0}^t dt$$



$$v(t) = v(t_0) + a \cdot (t - t_0)$$

Se $v(t_0) = 0$ e $t_0 = 0$ então:

$$v(t) = a \cdot t$$

Movimento de veículo independente

- **Aceleração constante (velocidade variável):** $a(t) = a = \text{constante}$

A distância percorrida em função da aceleração é:

$$x(t) = x(t_0) + \int_{t_0}^t v(t) dt$$

$$x(t) = x(t_0) + \int_{t_0}^t [v(t_0) + a \cdot (t - t_0)] dt$$

$$x(t) = x(t_0) + v(t_0) \cdot \int_{t_0}^t dt + \int_{t_0}^t a \cdot (t - t_0) dt$$

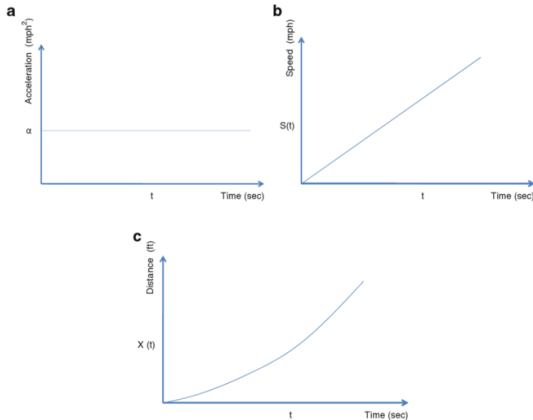
$$x(t) = x(t_0) + v(t_0) \cdot \int_{t_0}^t dt + a \cdot \int_{t_0}^t t dt - a \cdot t_0 \cdot \int_{t_0}^t dt$$

$$x(t) = x(t_0) + v(t_0) \cdot (t - t_0) + \frac{1}{2} \cdot a \cdot (t^2 - t_0^2) - a \cdot t_0 \cdot (t - t_0)$$

Movimento de veículo independente

- **Aceleração constante (velocidade variável):** $a(t) = a = \text{constante}$

Se $t_0 = 0$ então: $x(t) = x(0) + v(0) \cdot t + \frac{1}{2} \cdot a \cdot t^2$



Adaptado de "Elefteriadou, Lily. **An introduction to traffic flow theory**. Springer: New York, 2014. 262 p."

- **Aceleração constante (velocidade variável):** $a(t) = a = \text{constante}$
A (des)aceleração constante é utilizada para estimar, entre outros, os seguintes itens de projeto de rodovias:

Distância de parada (*stopping sight distance - SSD*).

Distância de frenagem (*braking distance*).

Por exemplo, a distância de parada segundo o *GREEN BOOK*¹ da *AASHTO* é calculada por:

$$SSD = 1,47 \cdot v \cdot t + 1,075 \cdot \frac{v^2}{a}$$

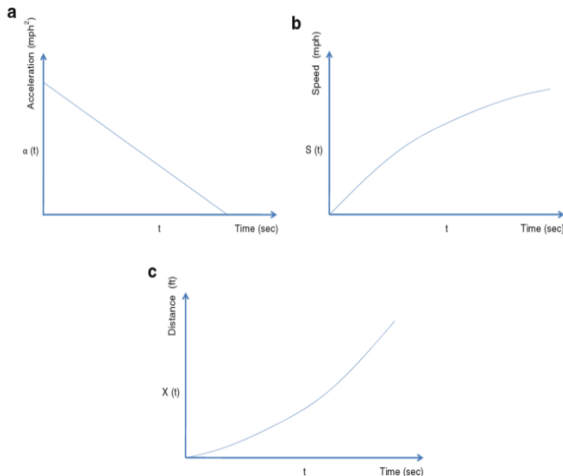
onde SSD em *pés*, v em *milhas/hora*, t em *segundos* (tempo de percepção e reação $\approx 2,5$ segundos) e a em pés/s^2 .

¹ AASHTO. *A Policy on Geometric Design of Highways and Streets*, Washington, D.C., 1984.

Adaptado de "Elefteriadou, Lily. *An introduction to traffic flow theory*. Springer: New York, 2014. 262 p."

Movimento de veículo independente

- **Aceleração variável (velocidade variável):** $a(t) = \text{variável}$



Adaptado de "Eleftheriadou, Lily. **An introduction to traffic flow theory**. Springer: New York, 2014. 262 p."

- **Aceleração variável (velocidade variável):** $a(t) = \text{variável}$

Se a capacidade de tração decresce com o aumento da velocidade do veículo, é possível definir uma função linear decrescente de aceleração:

$$a(t) = y - z \cdot t \text{ onde } y \text{ e } z \text{ são constantes.}$$

Assim, substitui-se a equação de aceleração para determinar a velocidade em um instante t :

$$v(t) = v(t_0) + \int_{t_0}^t a(t) dt \Rightarrow v(t) = v(t_0) + \int_{t_0}^t (y - z \cdot t) dt$$

$$\Rightarrow v(t) = v(t_0) + y \cdot \int_{t_0}^t dt - z \cdot \int_{t_0}^t t dt$$

$$\Rightarrow v(t) = v(t_0) + y \cdot (t - t_0) - z \cdot \frac{(t^2 - t_0^2)}{2}$$

Movimento de veículo independente

- **Aceleração variável (velocidade variável):** $a(t) = \text{variável}$

Substituindo a equação de velocidade com aceleração variável para determinar a distância percorrida em um instante t , dado $t_0 = 0$:

$$x(t) = x(t_0) + \int_{t_0}^t \left[v(t_0) + y \cdot (t - t_0) - z \cdot \frac{(t^2 - t_0^2)}{2} \right] dt$$

Aplicando as integrais nos limites definidos:

$$x(t) = x(t_0) + v(t_0) \cdot (t - t_0) + y \cdot \frac{(t - t_0)^2}{2} - z \cdot \frac{(t^3 - 3 \cdot t_0^2 \cdot t + 2 \cdot t_0^3)}{6}$$

Se $x(0) = 0$ então:

$$x(t) = v(0) \cdot t + y \cdot \frac{t^2}{2} - z \cdot \frac{t^3}{6}$$

EFEITO DAS CARACTERÍSTICAS DOS VEÍCULOS

Efeito das características dos veículos

As características dos veículos são componentes-chave da teoria de fluxo de tráfego e da operação de tráfego.

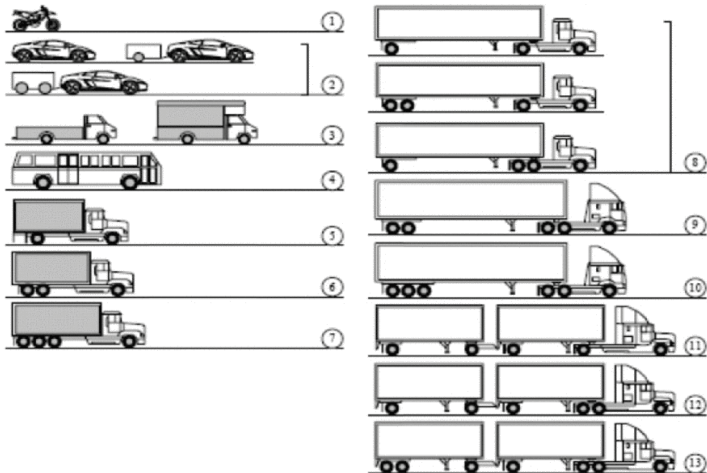
Tamanho, peso e características do motor afetam a função de aceleração que, por sua vez, afeta a velocidade do veículo.

Comprimento e possibilidade de combinação de unidades tratora e reboque afetam o espaço que o veículo ocupa e a capacidade viária.

O equilíbrio de forças determina o movimento do veículo:

- Tração em função da potência do motor e peso do veículo
- Resistência que impede o movimento do veículo

Efeito das características dos veículos



Adaptado de "Elefteriadou, Lily. **An introduction to traffic flow theory**. Springer: New York, 2014. 262 p."

EFEITO DAS CARACTERÍSTICAS DOS MOTORISTAS

Efeito das características dos motoristas

Características individuais dos motoristas, ações e escolhas afetam trajetória do veículo e a corrente de tráfego.

Habilidades pessoais

Tempo de reação

Visão

Preferências

Velocidade escolhida

Aceleração

Desaceleração

Processamento da informação

Acuidade visual

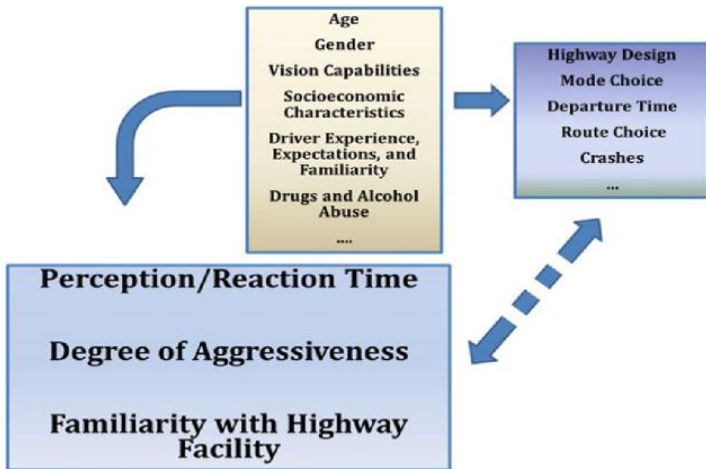
Sensibilidade ao contraste

Visão periférica

Tempo de percepção-reação

Adaptado de "Elefteriadou, Lily. **An introduction to traffic flow theory**. Springer: New York, 2014. 262 p."

Efeito das características dos motoristas



Adaptado de "Elefteriadou, Lily. *An introduction to traffic flow theory*. Springer: New York, 2014. 262 p."

EFEITO DAS CARACTERÍSTICAS DO AMBIENTE

Local e arredores: uso do solo adjacente à rodovia, densidade de ocupação, presença de outros modos de transporte.

Tipo de infraestrutura

Freeway e multilane highway

Two-lane highway

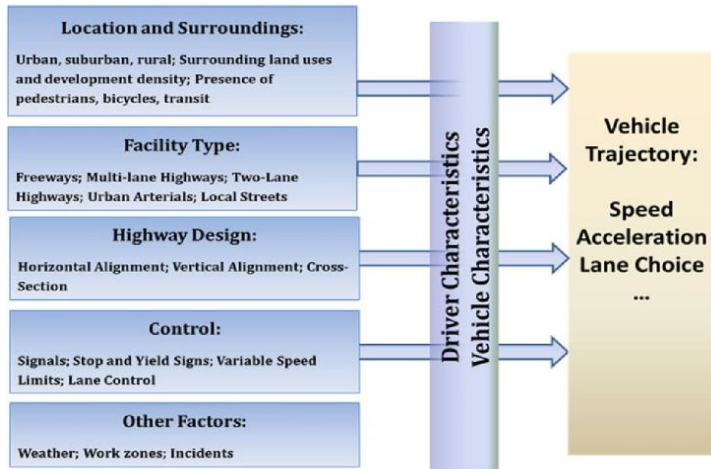
Urban and local street

Projeto: velocidade de projeto, número e largura de faixas.

Controle: semáforos, restrição ao fluxo de entrada em rodovias, sinalização vertical e horizontal, limites de velocidade variáveis, canalização e faixas exclusivas para caminhões e ônibus.

Outros fatores: condições meteorológicas, qualidade do pavimento, incidentes, zonas em obras, sistemas de informação ao usuário.

Efeito das características do ambiente



Adaptado de "Elefteriadou, Lily. *An introduction to traffic flow theory*. Springer: New York, 2014. 262 p."

SEGUIMIENTO VEICULAR

Car-Following

Seguimento Veicular (*Car-Following*)

Processo em que um veículo segue o outro a uma dada distância.

Ocorre quando a velocidade do veículo à frente (veículo líder - *leader*) afeta a velocidade do veículo atrás (veículo seguidor - *follower*).

Quanto maior a proximidade no seguimento veicular, maior é a capacidade da via.

Um seguimento veicular mais agressivo tende a aumentar a velocidade operacional, mas em geral resulta em operação menos segura.

Seguimento Veicular (*Car-Following*)

Considere dois veículos em fila em uma via de faixa única.

O veículo líder viaja desimpedido, o seu movimento é regido pelos modelos de um veículo independente e a velocidade é definida segundo as características do veículo, do motorista e do ambiente.

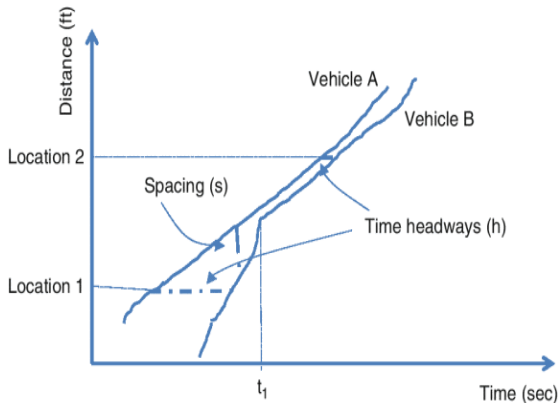
O veículo seguidor não pode colidir com o veículo à frente e, por isso, deve manter espaçamento e velocidade compatíveis com a situação.

- (1) **Velocidade desejada do veículo seguidor é menor do que a do líder:** a distância entre os dois aumenta, o veículo seguidor não é influenciado pelo líder e o movimento daquele veículo é caracterizado como independente.
- (2) **Velocidade desejada do veículo seguidor é maior do que a do líder:** o veículo seguidor entra no estado de “seguimento veicular” e seu movimento é definido pelo veículo líder.

Seguimento Veicular (*Car-Following*)

Quanto mais próximos um do outro, maior a sensibilidade das reações do veículo seguidor às ações do líder.

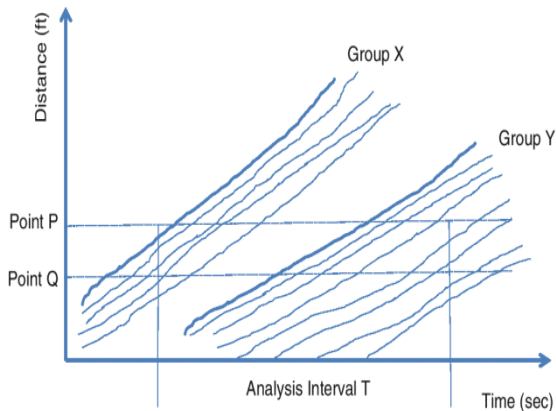
Essa sensibilidade também aumenta com a velocidade de operação.



Adaptado de "Elefteriadou, Lily. **An introduction to traffic flow theory**. Springer: New York, 2014. 262 p."

Seguimento Veicular (*Car-Following*)

Para múltiplos grupos de veículos (pelotões) regidos por diferentes veículos líderes tem-se o gráfico a seguir.

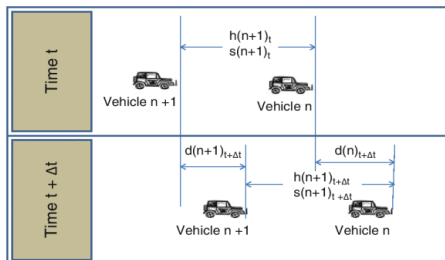


Adaptado de "Elefteriadou, Lily. **An introduction to traffic flow theory**. Springer: New York, 2014. 262 p."

Seguimento Veicular (*Car-Following*)

Entender o processo de “seguinto veicular” permite:

- Perceber o efeito de sua variabilidade na operação de tráfego.
- Perceber como o fenômeno afeta o tráfego em nível macroscópico.



Algoritmos de seguimento veicular determinam o movimento do veículo seguidor no tempo $(t + \Delta t)$ como uma função da sua relação com o veículo líder no tempo (t) .

Seguimento Veicular (*Car-Following*)

Vários algoritmos já foram propostos com diferentes medidas de desempenho para prever a trajetória do veículo seguidor.

- Predição da aceleração do veículo seguidor.
- Predição do *headway* espacial em relação ao veículo líder.

Primeiros modelos (1950)

Microsimulador AIMSUN (Modelo de Gipps)

Microsimulador SUMO (Modelo de Krauß)

Microsimulador VISSIM (Modelo de Wiedemann)

Seguimento Veicular (*Car-Following*)

- **Microsimulador AIMSUN** (Modelo de Gipps)

Desenvolvido na Austrália no início da década de 1980.

Veículo seguidor em dois modos:

- (1) Modo de frenagem (*braking mode*);
- (2) Modo de seguimento veicular (*Car-Following mode*).

Considera a velocidade desejada do veículo seguidor.

Calcula a velocidade do veículo seguidor de duas maneiras e escolhe o menor dos dois valores.

- (1) Condições sem restrições;
- (2) Condições com restrições pelo veículo líder.

- **Microsimulador AIMSUN** (Modelo de Gipps)

$$v_{n+1}(t + \Delta t) = \min \left\{ v_{n+1}(t) + \sqrt{2.5 \cdot a_n \cdot \Delta t \cdot [1 - v_{n+1}(t)/V_{n+1}] [0.025 + v_{n+1}(t)/V_{n+1}]}, b_{n+1} \cdot \Delta t + \sqrt{b_{n+1}^2 \cdot \Delta t^2 - b_n \left[2[x_n(t) - s_n - x_{n+1}(t)] - v_{n+1}(t) \cdot \Delta t - v_n(t)^2/\hat{b} \right]} \right\}$$

onde a_{n+1} = aceleração máxima do veículo seguidor ($n + 1$);

b_{n+1} = desaceleração máxima do veículo seguidor ($n + 1$) [$b_{n+1} < 0$];

s_n = comprimento efetivo do veículo líder (n) [real mais margem de segurança];

\hat{b} = desaceleração mais severa que o veículo ($n + 1$) estima para o veículo n ;

V_{n+1} = velocidade desejada do veículo seguidor ($n + 1$);

$x_{n+1}(t)$ = posição da frente do veículo seguidor ($n + 1$) no instante t ;

$v_{n+1}(t)$ = velocidade do veículo seguidor ($n + 1$) no instante t ;

Δt = intervalo de tempo de simulação.

- **Microsimulador SUMO** (Modelo de Krauß)¹

Considera dois tipos de movimentos:

(1) **Movimento livre**

Velocidade do veículo é limitada pela velocidade máxima, que pode ser a desejada pelo motorista.

(2) **Interação com outro veículo**

Considera que os motoristas não desejam se envolver em acidentes e, portanto, a velocidade máxima é definida por uma velocidade segura.

¹Tavares, A. R. (2013). Uma abordagem baseada em agentes para simulação de tarifação viária e comunicação inter-veicular. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

- **Microsimulador SUMO** (Modelo de Krauß)¹

A atualização da velocidade dos veículos é dada pelas equações:

$$v_{n+1, safe}(t) = v_n(t) + [d(t) - d_{des}(t)] / (\sigma_b + \sigma)$$

$$v_{n+1, des}(t) = \min \left\{ v_{n+1, max}(t); v(t) + a_{n+1} \cdot \Delta t; v_{n+1, safe}(t) \right\}$$

$$v_{n+1}(t + \Delta t) = \max \left\{ 0; v_{n+1, des}(t) - \Omega \right\}$$

¹Tavares, A.R. Uma abordagem baseada em agentes para simulação de tarifação viária e comunicação interveicular. 2013.

- **Microsimulador SUMO** (Modelo de Krauß)¹

$v_n(t)$ = velocidade do veículo líder (n) no instante t ;

$v_{n+1}^{safe}(t)$ = velocidade de segurança do veículo seguidor ($n + 1$) no instante t ;

$v_{n+1}^{des}(t)$ = velocidade desejada do motorista do veículo seguidor ($n + 1$) no instante t ;

v_{n+1}^{max} = velocidade máxima do veículo seguidor ($n + 1$) no instante t ;

$d(t)$ = distância efetiva entre o veículo seguidor ($n + 1$) e o veículo líder (n);

$d_{des}(t)$ = distância desejada entre o veículo seguidor ($n + 1$) e o veículo líder (n);

a_{n+1} = aceleração máxima do veículo seguidor ($n + 1$);

Ω = perturbação aleatória para simular as imperfeições do motorista.

$\sigma_b + \sigma$ = parâmetro de sensibilidade do motorista relativo ao tempo de percepção;

Δt = intervalo de tempo de simulação.

¹Tavares, A.R. Uma abordagem baseada em agentes para simulação de tarifação viária e comunicação interveicular. 2013.

Seguimento Veicular (*Car-Following*)

- **Microsimulador VISSIM** (Modelo de Wiedemann)

Desenvolvido na Alemanha na década de 1970.

Usa limites entre regimes baseados em ações e percepções dos motoristas.

Por exemplo, considera a distância que o motorista é capaz de perceber a velocidade relativa em relação ao líder, ao invés de um espaçamento fixo.

Considera quatro diferentes situações de interação entre veículos.

- **Microsimulador VISSIM** (Modelo de Wiedemann)

- (1) **Veículo seguidor dirigindo livremente**

Não sofre a influência de veículo líder.

Procura atingir e manter sua velocidade desejada.

- (2) **Aproximação**

Quando passa um ponto limite de aproximação (SDV).

Processo de adaptação da velocidade do veículo seguidor à velocidade do líder (mais baixa).

O motorista desacelera para que a diferença de velocidade entre os dois veículos seja zero quando a distância de segurança desejada é atingida.

- **Microsimulador VISSIM** (Modelo de Wiedemann)

- (3) **Seguimento**

SDV: limite de aproximação.

ABX: distância mínima de seguimento com diferença de velocidade.

SDX: distância máxima de seguimento.

OPDV: diferença no aumento de velocidade.

Veículo seguidor sem acelerações ou desacelerações conscientes.

A distância de segurança é mantida aproximadamente constante.

- **Microsimulador VISSIM** (Modelo de Wiedemann)

- (4) **Frenagem**

- Distância da frente à traseira é menor que ABX .

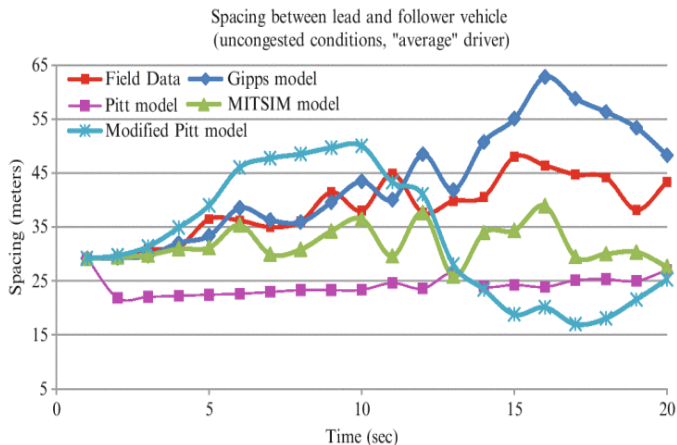
- Desacelerações médias a altas quando a distância fica menor que a distância desejada de segurança.

- Mudança abrupta de velocidade do veículo líder.

- Veículo que troca de faixa a frente do seguidor.

Seguimento Veicular (*Car-Following*)

• Comparação de modelos



Adaptado de "Elefteriadou, Lily. **An introduction to traffic flow theory**. Springer: New York, 2014. 262 p."