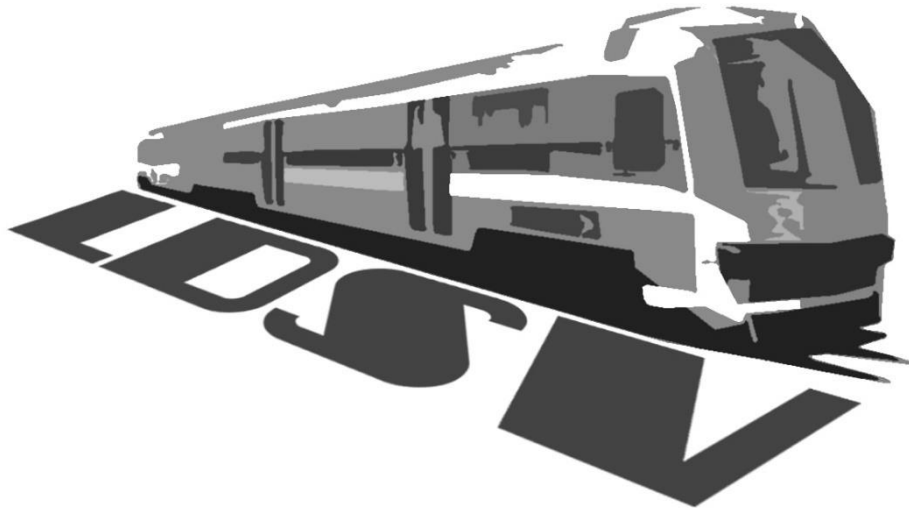


# Estudo da otimização do fluxo de comboio de veículos



Autor: Igor Seiji Nakamura

Orientador: Prof. Dr. Roberto Spinola Barbosa

# 1. Introdução

Uma rodovia é um caminho segregado sem cruzamento em nível que interliga duas localidades permitindo a mobilidade do cidadão. Esta é a função da rodovia.

Existem 3 aspectos importantes a serem levados em consideração com respeito as rodovias: velocidade média de tráfego, volume de tráfego e segurança da via. O objetivo da rodovia, portanto, é viabilizar o deslocamento dos veículos no menor tempo possível, visando maximizar a produtividade da pista de rolamento (maior volume de tráfego possível) enquanto garante a segurança dos condutores e passageiros

Tendo em mente este propósito, esta pesquisa busca desenvolver um modelo que seja capaz de encontrar a velocidade média ideal da via, que atinja os 3 objetivos citados acima, usando apenas parâmetros físicos conhecidos e que possam ser medidos e analisados estatisticamente.

## 2. Modelo obtido

A pesquisa busca encontrar um modelo de fluxo de carros baseado em uma distância de segurança. Tal análise é inspirada no modelo de perseguição, que busca analisar as ações do elemento motorista-veículo (chamado de veículo seguidor) como uma resposta à ação do veículo à sua frente (chamado de veículo líder). Vamos convencionar a nomenclatura para referenciar os veículos líder e perseguidor pelos índices  $n$  e  $n+1$  respectivamente, como pode ser visto na figura 2-1 abaixo.

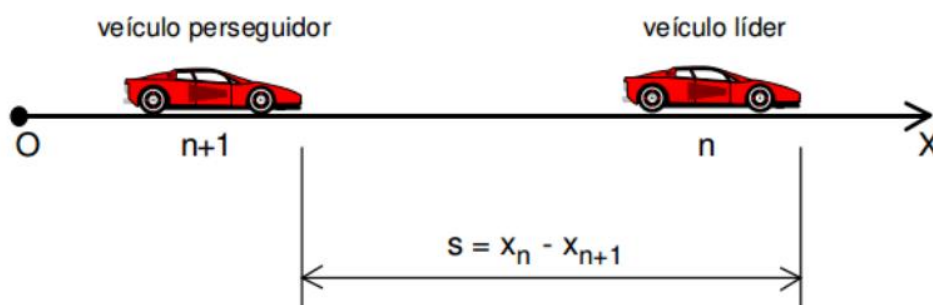


Figura 2-1: Modelo de perseguição. Extraído de (2).

A distância de segurança representa o espaço entre a frente do veículo seguidor e a traseira do veículo líder. Esta pode ser definida como a distância total de parada do veículo seguidor. No cálculo desta distância, devemos levar em consideração a distância percorrida pelo carro durante o tempo de reação do motorista, mais a distância de frenagem. Portanto a fórmula para o cálculo da distância de segurança fica:

$$D_{n+1} = L + D_{reação} + D_{frenagem} - D_n \quad (1)$$

, onde  $D_{n+1}$  é a distância de segurança do veículo perseguidor,  $D_{reação}$  é a distância percorrida pelo veículo antes de iniciar o processo de frenagem,  $D_{frenagem}$  é a distância percorrida para o veículo parar completamente e  $D_n$  é a distância percorrida pelo veículo líder durante o processo de parada do veículo seguidor.

Tomando o tempo de reação do motorista como igual a 1.07 segundos, valor médio obtido empiricamente por (4), a  $D_{reação}$  pode ser obtida utilizando a equação do movimento uniforme:

$$D_{reação} = V_0 \cdot t_{reação} \quad (2)$$

Para o valor de desaceleração máxima de um veículo, adotaremos 0.76g, valor obtido empiricamente por (2). Também vamos adotar  $g = 10 \text{ m/s}^2$ . Dessa forma, podemos obter a distância de frenagem a partir da equação de Torricelli:

$$V^2 = V_0^2 + 2 \cdot a \cdot D_{frenagem} \leftrightarrow D_{frenagem} = \frac{V_0^2}{2 \cdot a \cdot g} \quad (3)$$

A distância percorrida pelo veículo líder durante a frenagem do veículo seguidor pode ser encontrada utilizando a equação de Torricelli:

$$V^2 = V_0^2 + 2 \cdot a_n \cdot D_n \leftrightarrow D_n = \frac{V_0^2}{2 \cdot a_n} \quad (4)$$

, onde  $a_n$  é a taxa de frenagem máxima do veículo líder.

Portanto, a distância fica:

$$D_{n+1} = t_{reação} \cdot V_0 + V_0^2 \cdot \alpha \quad (5)$$

, em que  $\alpha = 0.5 \cdot (a_{n+1}^{-1} - a_n^{-1})$ .

Para encontrarmos o fluxo de carros por unidade de tempo, usamos a seguinte relação:

$$Q = V_0 \cdot K = \frac{V_0}{L + D_n}$$

, onde  $V_0$  é a velocidade média dos veículos em uma rodovia,  $K$  é a densidade de veículos (carros/m) e  $L$  é o comprimento médio dos veículos percorrendo a rodovia.

A vazão fica, portanto:

$$Q = \frac{V_0}{L + t_{reação} \cdot V_0 + \alpha \cdot V_0^2} \quad (6)$$

## 2.1. Parâmetros

### 2.1.1. Diferença da taxa de desaceleração

Nesta seção, iremos analisar a influência da diferença da taxa de desaceleração ( $\alpha$ ) nas propriedades de tráfego de comboio de veículos. Para isso, precisamos variar o  $\alpha$  dentro de uma série de valores pré-estabelecidos. Vamos tomar valores de desaceleração a partir de 0.66g. Portanto, podemos considerar 2 casos extremos: um para taxas de desaceleração idênticas, e outro com o veículo líder com taxa de 1.0g (valor suposto alto para a desaceleração do veículo)

e o seguidor com 0.66g. Desta forma, o parâmetro alfa irá variar dentro do intervalo de 0 à 0.076.

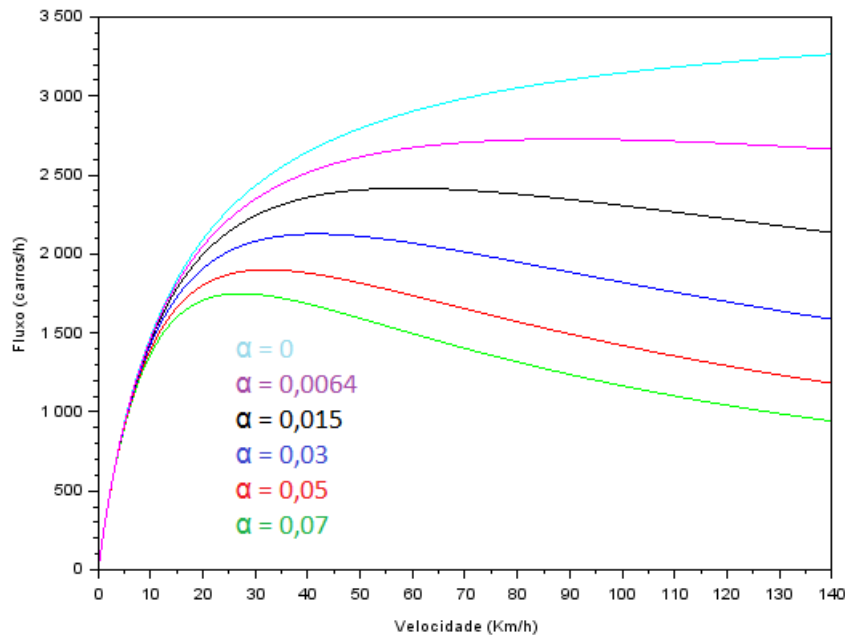


Figura 2-1: Gráfico do fluxo de veículos em função da velocidade, com tempo de reação igual a 1 s e  $L = 4$  m

O parâmetro  $\alpha$  pode ser interpretado como a existência de um fluxo turbulento, durante o tráfego do comboio. Portanto, em um fluxo ordenado, no qual os veículos se locomovem de maneira previsível, em que o risco de colisão é menor, o valor do parâmetro alfa será menor, uma vez que as taxas de desaceleração terão valores mais uniformes. Para uma situação de tráfego com condutores que assumem uma dirigibilidade mais arriscada, é possível afirmar que as taxas de desaceleração assumirão valores maiores, e com maior variação. Portanto, o valor do parâmetro será maior. Podemos ver pela figura 2-2 que o fluxo reduz conforme o alfa aumenta, corroborando a interpretação feita.

Analisando a curva da figura 2-2 para  $\alpha = 0.0064$ , é possível notar que a velocidade de comboio que otimiza o fluxo de veículos é 90 km/h (limite de velocidade máxima das Marginais Tietê e Pinheiros). A vazão é igual a 2727 carros por hora, e a distância de segurança entre os veículos é igual a 29 metros.

### 2.1.2. Tempo de reação

Para o estudo do comboio de veículos, é essencial ter o conhecimento do tempo de reação de um motorista para executar a parada, de forma a se conhecer a distância que o veículo percorre antes de iniciar o processo de frenagem, conforme podemos perceber na seção 2.1.

Nesta seção, iremos verificar a influência deste parâmetro nas propriedades do fluxo de um comboio de veículos. Para variarmos o tempo de reação, iremos usar o mínimo como igual a 0.9 segundos (obtido por (5) como a média para motoristas em alta velocidade), e o máximo

como 2.5 segundos (tempo de reação padrão utilizado em (1)). Portanto o intervalo para o tempo de reação é [0.9, 2.5].

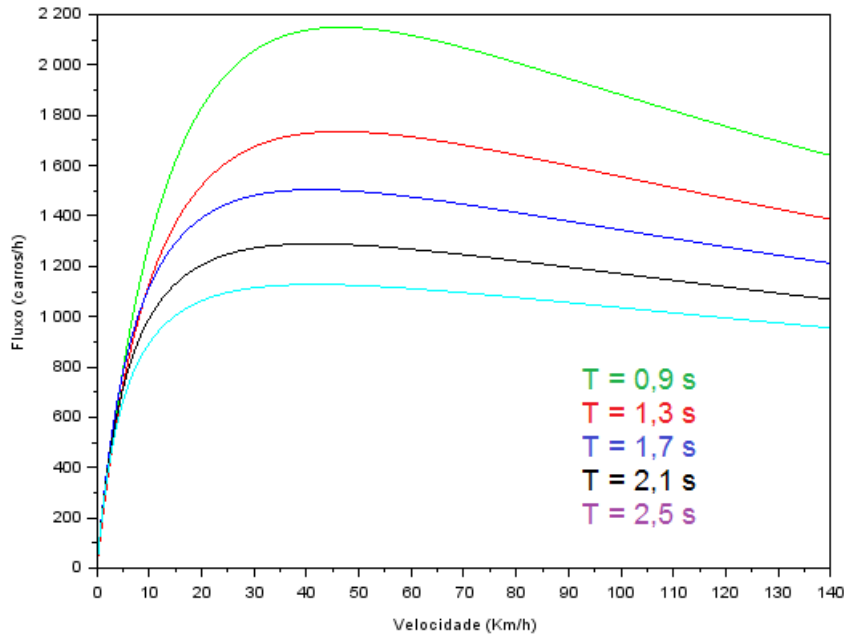


Figura 2-2: Gráfico do fluxo de veículos em função da velocidade, com  $\alpha = 0,03$

## 2.2. Propriedades da vazão máxima

Analisando o formato do gráfico vazão por velocidade, é fácil perceber que a curva toma um ponto máximo para uma determinada velocidade, que vamos chamar de velocidade ótima. Para encontrarmos esta velocidade, basta tomar a derivada com respeito a  $V_0$  na equação (6), do fluxo de veículos.

$$\frac{dQ}{dV_0} = \frac{L - \alpha \cdot V_0^2}{[L + t_{reação} \cdot V_0 + \alpha \cdot V_0^2]^2}$$

$$\left. \frac{dQ}{dV_0} \right|_{V=V_{ótimo}} = 0 \Leftrightarrow L - \alpha \cdot V_{ótimo}^2 = 0 \Leftrightarrow V_{ótimo} = \sqrt{\frac{L}{\alpha}} \quad (7)$$

Portanto, é possível perceber que a velocidade de otimização depende apenas de 2 parâmetros: o comprimento médio dos veículos (diretamente proporcional) e da diferença média da desaceleração (inversamente proporcional).

O fato de que  $V_{ótimo}$  é inversamente proporcional ao parâmetro  $\alpha$  reforça a análise feita na seção 2.1.1, em que a diferença na taxa de desaceleração indica a existência de um risco de colisão, no qual veículos são conduzidos de forma mais arriscada.

## 3. Produtividade do corredor de tráfego

O objetivo de uma via é ligar 2 pontos, de forma que se tenha o maior volume de tráfego possível, realizado no menor tempo de viagem permitido (maior velocidade) e com a maior segurança para os passageiros. Portanto, essa análise pode ser feita através de um coeficiente de eficácia  $\epsilon$ , tal que este é definido da seguinte forma:

$$\varepsilon = V_0 \cdot Q \cdot s \quad (8)$$

, onde o  $s$  é um fator de segurança que varia de 0 até 1.

Substituindo a equação (6) em (8), obtemos:

$$\varepsilon = \frac{s \cdot V_0^2}{L + s \cdot (t_{\text{reação}} \cdot V_0 + \alpha \cdot V_0^2)} \quad (9)$$

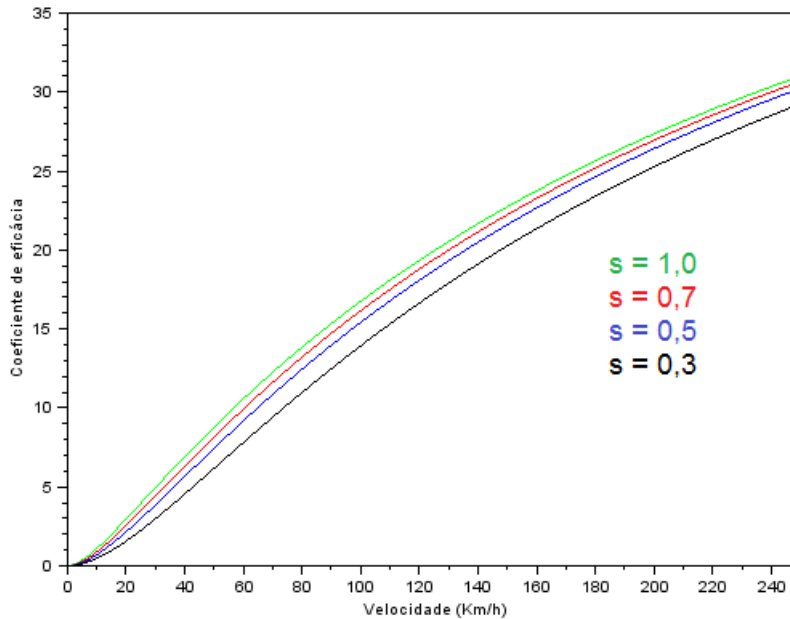


Figura 3-1: Gráfico de coeficiente de eficácia por velocidade, para 4 fatores de segurança distintos, usando  $L = 4 \text{ m}$ ,  $\alpha = 0.016$  e  $T_{\text{reação}} = 1.07 \text{ s}$

## 4. Bibliografia

1. *Highway Capacity Manual*; Transportation Research Board; National Research Council, Washington D.C: 2000;
2. *Teoria do Fluxo de Tráfego*; Universidade de Brasília; Departamento de Engenharia Civil e Ambiental - Área de transportes; Brasília, 2007;
3. Sivak, M., Olson, P. L., Farmer, K. M. Radar measured reaction times of unalerted drivers to brake signals. *Perceptual and Motor Skills*, Montana, v. 55, n. 2, p. 594, Out. 1982.
4. *Skidding friction: A review of Recent Research*; Mechanical Forensics Engineering Services LLC, New Hampshire; 2007;
5. Chang, M. S., Messer, C. J., Santiago, A. J. Timing traffic signal change intervals based on driver behavior. In: Transportation Research Board (Ed.) *Driver information needs and visibility of traffic control devices*. Washington, DC: TRB, 1985. P. 20 -30. (Transportation Research Record, 1027)
6. *NT 148/92; Tempo de reação para frenagem de motoristas não alertados*; Companhia de Engenharia de Tráfego – São Paulo (CET-SP);