

# Um Estudo Comparativo de Modelos de Fluxo de Tráfego de Veículos para Sistemas de Transporte Inteligentes

João Pedro F. Silva<sup>1</sup>, Guilherme Maia<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Departamento de Ciência da Computação – Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG)  
Belo Horizonte, MG – Brasil

{joaofernandes, jgmm}@dcc.ufmg.br

**Abstract.** *With the growing process of urbanization, mobility becomes a sensitive topic. Urban traffic management is a key tool for getting around within metropolises in an efficient way. Through traffic management systems (TMS), it is possible to collect and process real-time data in order to mitigate the effects of congestion. An important step in this process is the identification of traffic congestion. This identification is made through mathematical models, which exist abundantly in the literature. This work aims to analyze the main mathematical models through traffic flow simulations in order to compare them and analyze the impact of model choice on the performance of a TMS. While many of the existing works that propose TMS focus only on the system architecture, this work shows that the choice of the congestion identification model has a significant impact on the performance of a TMS, resulting in up to 8.2% difference in average travel time depending only on the chosen model.*

**Resumo.** *Com o crescente processo de urbanização, a mobilidade se torna um tópico sensível. O gerenciamento do tráfego urbano de veículos é uma ferramenta chave para tornar a locomoção nas metrópoles mais eficiente. Através de sistemas de gerenciamento de tráfego (TMS), é possível coletar e processar dados em tempo real a fim de mitigar os efeitos dos congestionamentos. Um passo importante dentro deste processo é a identificação de congestionamentos nas vias urbanas. Essa identificação é feita através de modelos matemáticos, os quais existem em abundância na literatura. Este trabalho se propõe a analisar os principais modelos matemáticos através de simulações de fluxo de tráfego com o objetivo de compará-los, além de analisar o impacto da escolha do modelo no desempenho de um TMS. Enquanto muitos dos trabalhos existentes que propõem TMSs focam apenas na arquitetura do sistema, este trabalho mostra que a escolha do modelo de identificação de congestionamento tem um impacto significativo no desempenho de um TMS, resultando até 8,2% de diferença no tempo médio de viagem variando apenas o modelo escolhido.*

## 1. Introdução

O crescimento da frota de veículos no Brasil é uma realidade constante há anos. De acordo com o Ministério da Infraestrutura [Ministério da Infraestrutura 2023], em janeiro de 2023, houve crescimento de mais de 3 milhões de veículos em relação aos resultados de janeiro do ano anterior [Ministério da Infraestrutura 2022]. Com o aumento do número de veículos, a mobilidade urbana se torna cada vez mais custosa, influenciando em aspectos

como o tempo de viagem, consumo de combustível, e conseqüentemente, na emissão de gases causadores do efeito estufa na atmosfera [Singh et al. 2022].

Visando mitigar os efeitos adversos do congestionamento de veículos, vários pesquisadores propuseram ao longo dos últimos anos diferentes sistemas de gerenciamento de tráfego (TMS) [Souza et al. 2017]. De maneira geral, um TMS consiste em conjuntos de aplicações e ferramentas de gerenciamento que, ao agregar dados de diferentes fontes, tais como sensores em veículos e vias, geram informações que auxiliam os condutores em diferentes situações, tais como a presença de veículos de emergência na via, obstáculos na pista e congestionamentos [Djahel et al. 2015]. Uma vez identificado o estado da via, o TMS pode disparar mensagens de alerta aos veículos, ou até mesmo modificar rotas a fim de evitar vias congestionadas. É importante destacar que os TMS são um componente fundamental dos sistemas de transporte inteligentes e das cidades inteligentes [Singh et al. 2022].

Muitos dos trabalhos existentes que propõem um TMS focam na arquitetura do sistema (centralizada, distribuída ou híbrida) ou na forma com que os dados de congestionamento são coletados e rotas alternativas são disseminadas para os veículos. Por outro lado, o processo de identificação de uma via congestionada não costuma receber o mesmo nível de atenção e detalhamento das soluções utilizadas ou até mesmo justificativas do porquê elas funcionam. Muitas vezes, as soluções propostas utilizam parâmetros que necessitam de um estudo prévio do cenário urbano em que o TMS será utilizado para só então definir os melhores valores para utilizar nesses parâmetros [Du et al. 2021, Akabane et al. 2020, de Souza et al. 2019]. Neste trabalho, argumenta-se que o processo de identificação de congestionamento tem um impacto significativo no desempenho de um TMS e portanto demanda soluções objetivas, transparentes e adaptáveis para diferentes ambientes urbanos.

Com base no conhecimento oriundo da disciplina de engenharia de tráfego, foram propostos diferentes modelos matemáticos com o objetivo de descrever o comportamento dos veículos nas vias [Banks 2002]. Desse modo, é possível determinar de maneira objetiva e transparente quais vias estão congestionadas ou não. Além disso, tais modelos são adaptáveis para diferentes cenários e não dependem da definição de parâmetros de entrada. Logo, este estudo tem como objetivo comparar o desempenho de um TMS utilizando diferentes modelos matemáticos oriundos da disciplina de engenharia de tráfego para a descrição do fluxo de tráfego de veículos em vias urbanas.

Foram realizadas extensas simulações utilizando uma rede rodoviária de uma cidade de tamanho médio. Utilizou-se o EBkSP [Pan et al. 2012] como o algoritmo de roteamento de veículos em um sistema de gerenciamento de tráfego centralizado. Desse modo, os veículos reportam seus dados (posição, velocidade e direção) para um servidor centralizado, e então o TMS sugere rotas alternativas (computadas utilizando o EBkSP) ao detectar congestionamento nas vias. Para a tarefa de detecção de congestionamento, foram comparados quatro modelos matemáticos de fluxo de tráfego: o modelo linear de Greenshields [Greenshields et al. 1935], o modelo de Greenberg [Greenberg 1959], o modelo de Drake [Drake et al. 1966] e um modelo híbrido que combina a solução apresentada por Greenberg [Greenberg 1959] e Underwood [Underwood 1961]. Analisou-se o desempenho do TMS a partir de métricas como tempo de viagem, consumo de combustível e emissão de gases dos veículos utilizando cada um dos modelos.

Dessa forma, este estudo está organizado da seguinte maneira: na Seção 2 são apresentados os estudos relacionados na área, apresentando diferentes TMSs e os modelos de fluxo de tráfego utilizados; na Seção 3 é descrito o EBkSP, que foi a solução de re-roteamento de veículos utilizada para a avaliação dos modelos de fluxo de veículos; na Seção 4 são explicitados os modelos avaliados; na Seção 5 são descritos os experimentos realizados, os resultados e uma análise destes; a Seção 6 apresenta as conclusões e diretrizes para trabalhos futuros e agradecimentos estão contidos na Seção 7.

## 2. Estudos relacionados

Nesta seção serão apresentados alguns trabalhos em sistemas de gerenciamento de tráfego e re-roteamento de veículos presentes na literatura, dando enfoque aos modelos matemáticos de fluxo de tráfego utilizados.

Além dos modelos de fluxo de tráfego, TMSs se diferem entre si de várias maneiras. Informações podem ser agregadas de diferentes lugares, desde redes sociais e GPS [Silveira et al. 2015] até dados providos pelos próprios veículos através das redes veiculares ad-hoc (VANETs) [Akabane et al. 2020]. [de Souza et al. 2019] apresentam o Better Safe than Sorry (BSTS), um sistema de transporte inteligente que tem como objetivo realizar o re-roteamento dos veículos a fim de minimizar congestionamentos, porém evitando áreas de risco. O BSTS é um sistema híbrido, que agrega dados vindos dos próprios veículos, de redes sociais e da web, processados em um servidor central de forma que haja um equilíbrio entre rotas seguras e rápidas. Para definir se há congestionamento em uma via, o BSTS utiliza-se de um modelo matemático próprio que calcula um parâmetro  $\tau_{uv}$  que reflete a velocidade média da via em relação à velocidade máxima permitida, e a partir deste valor verifica-se em qual estado de congestionamento a via se encontra (fluxo livre, pouco congestionada ou congestionada).

[de Souza et al. 2016] propuseram uma aplicação de gerenciamento de tráfego com planejamento de rotas e identificação de congestionamentos em tempo real. O sistema intitulado CHIMERA funciona em três etapas principais: (i) detecção de congestionamento; (ii) classificação do tráfego; e (iii) sugestão de rotas. Os processos de detecção de congestionamentos e classificação de tráfego são realizados através de uma equação própria que calcula um valor de peso  $w_i \in [0, 1]$  da via sendo inversamente proporcional à condição do tráfego. A classificação da condição de tráfego é feita a partir do valor de  $w_i$ , podendo caracterizar o fluxo da via como sendo livre, levemente congestionado, congestionado moderadamente e extremamente congestionado. Já a etapa de sugestão de rotas é feita utilizando um algoritmo baseado no *K-Shortest-Paths* [Eppstein 1998].

A fim de evitar o uso de estruturas auxiliares, foi pensado o dEASY [Akabane et al. 2020], um TMS distribuído que funciona apenas com comunicação entre veículos (V2V) e que se baseia no algoritmo PageRank [Page et al. 1999] para realizar um ranqueamento da influência dos veículos na rede. A partir deste ranqueamento, veículos de maior relevância têm preferência na transmissão das mensagens na rede, evitando o congestionamento de mensagens no canal de comunicação. Esse TMS tem uma arquitetura de três camadas: (i) sensoriamento do ambiente e ranqueamento de veículos; (ii) geração de informação e distribuição; e (iii) consumo de informação. Na camada (i), através de sensores nos veículos, dados são coletados em relação ao ambiente e o cálculo de relevância dos veículos é feito. Na camada (ii), a partir dessas mensagens, a troca de

dados pode ser feita entre os veículos da rede a fim de gerar informação relevante. A classificação do estado da via é realizada nesta camada. Utiliza-se uma equação própria que é baseada na velocidade média da via, e a partir dela, veículos com maior ranqueamento decidem o estado de congestionamento do segmento.

Os trabalhos apresentados anteriormente realizam o processo de detecção de congestionamento utilizando soluções próprias, algumas sem embasamento na teoria de engenharia de tráfego. Porém, outros estudos como [Guidoni et al. 2020] que adotam modelos conhecidos e já validados de fluxo de tráfego. Esse trabalho descreve o Re-RouTE, um TMS V2V e comunicação de veículos e infraestruturas (V2I) a fim de transmitir dados para um servidor central, gerando um modelo macroscópico da malha rodoviária. A partir deste modelo macroscópico, o Re-RouTE utiliza-se do modelo logarítmico de Greenberg [Greenberg 1959] para definir o ponto de congestionamento da via. Uma vez identificados os segmentos congestionados, o sistema envia mensagens aos veículos que irão trafegar por essas vias, notificando a presença de congestionamento e possibilitando o cálculo de uma nova rota.

Observa-se que há uma grande variedade de modelos de detecção de congestionamento utilizados, e estes podem ou não ser baseados na literatura de engenharia de tráfego. Desse modo, este trabalho tem como objetivo avaliar o desempenho de modelos de fluxo de tráfego que já são reconhecidos na teoria de fluxo de veículos, apesar de não serem recorrentes nas soluções de TMS existentes. Conforme discutido anteriormente, grande parte dos trabalhos existentes utilizam algoritmos próprios em suas composições, muitas vezes sem qualquer embasamento teórico de como e porquê eles funcionam. Além disso, muitos desses algoritmos dependem de parâmetros de entrada que necessitam de um estudo prévio do ambiente urbano em que o TMS será utilizado para, a partir daí, definir os melhores valores para utilizar nesses parâmetros.

### 3. Arquitetura do TMS e algoritmo de re-roteamento

Para avaliar o desempenho dos modelos de fluxo de tráfego, este trabalho considera um sistema de gerenciamento de tráfego centralizado. Desse modo, os veículos reportam seus dados (posição, velocidade e direção) para um servidor centralizado, e então o TMS calcula periodicamente rotas alternativas para os veículos que possuem vias congestionadas em suas rotas originais. É importante destacar que a forma com que os dados de tráfego são coletados pelo TMS e as rotas alternativas são disseminadas para os veículos não são o escopo deste trabalho. Neste trabalho, utilizou-se o algoritmo *entropy balanced k-shortest paths* (EBkSP) [Pan et al. 2012] para o cálculo de rotas alternativas. A escolha do EBkSP foi devido ao fato de muitos TMSs existentes na literatura também utilizarem o EBkSP como algoritmo de re-roteamento principal, como visto em [Du et al. 2021], [Asvial et al. 2020] e [Asvial et al. 2018].

[Pan et al. 2012] apresentaram três estratégias de re-roteamento para prevenção de congestionamentos no tráfego, sendo: (i) *dynamic shortest path* (DSP), o qual atribui a cada veículo o caminho mais rápido atual para o destino; (ii) *random multipath load balancing* (RkSP), calcula as  $k$  rotas mais rápidas para todos os veículos e define aleatoriamente uma delas para cada veículo; e (iii) *entropy balanced k shortest paths* (EBkSP), no qual computa os  $k$  caminhos mais rápidos dos veículos a serem re-roteados, e atribui os veículos à rota com menor popularidade, a qual é calculada a partir da entropia

do caminho. O cálculo da popularidade de uma via é relevante pois, intuitivamente, as estratégias (i) e (ii) podem fazer com que novos congestionamentos sejam gerados caso muitos veículos compartilhem o mesmo destino.

O EBkSP (TMS de modo geral) funciona em quatro fases que são executadas periodicamente: (1) coleta e representação de dados; (2) detecção de congestionamentos; (3) seleção de veículos para re-roteamento; e (4) cálculo de rotas alternativas.

---

**Algoritmo 1: EBkSP**

---

**procedimento** main

*atualizaPesoVias()*

*viasCongestionadas = detectaCongestionamento(pesoVias)*

**se** *#viasCongestionadas > 0* **então:**

*veículosSelecionados = selecionaVeículos(viasCongestionadas)*

*veículosOrdenados = aplicaPreferência(veículosSelecionados)*

*paresOD = atualizaParesOD(veículosSelecionados)*

*todosOsCaminhos = computaTodos\_k\_Caminhos(paresOD)*

*realizaRerroteamento(todosOsCaminhos, veículosOrdenados)*

**fim se**

**fim procedimento**

**procedimento** realizaRerroteamento

**para todo** *veículo* em *veículosOrdenados* **faça**

*{origem, dest} = computaParOD(veículo)*

*kRotas = computa\_k\_Rotas(todosOsCaminhos, origem, dest)*

*novaRota = computaRotaMenosPopular(kRotas)*

*defineRota(veículo, novaRota)*

*atualizaFc(veículo, novaRota)*

**fim para**

**fim procedimento**

---

### 3.1. Coleta e representação de dados

A malha rodoviária é representada como um grafo direcionado ponderado, onde os vértices representam as interseções, arestas são os segmentos de via e os pesos das arestas são o tempo de viagem médio esperado nas vias. O cálculo do peso das arestas é feito a partir dos modelos de fluxo de tráfego utilizados, que serão detalhados na seção posterior.

### 3.2. Detecção de congestionamento

Periodicamente o estado das vias é verificado, observando se o peso da aresta alcançou um limite  $\delta$  definido pelo modelo de fluxo de tráfego utilizado. Uma vez que há vias congestionadas, o processo de re-roteamento é disparado.

### 3.3. Seleção de veículos para re-roteamento

Quando uma via congestionada é identificada, o sistema procura por veículos próximos para serem re-roteados. Veículos de segmentos que levam tráfego à via congestionada são selecionados para terem suas rotas modificadas. A distância para considerar vias vizinhas para o re-roteamento é definida por um parâmetro  $L$  (*level*), que denota a maior distância

(em número de segmentos) em que uma via é considerada para re-roteamento. Ou seja, é realizado uma busca em profundidade (BFS) no grafo reverso da rede, começando pela via congestionada e considerando vias até a profundidade  $L$ , e todos os veículos presentes nestes segmentos são relacionados para o re-roteamento.

### 3.4. Cálculo de rotas alternativas

O cálculo das rotas alternativas no EBkSP funciona a partir do cálculo da “popularidade” de uma via. Dessa forma, assumindo que os veículos compartilham as informações sobre suas rotas, é possível estimar quantos veículos irão passar por qualquer via da malha rodoviária. Essa estimativa é feita através da variável *footprint counter*.

**Definição 1** *Um footprint counter,  $fc$ , de um segmento é o número total de veículos que são atribuídos à rotas que contém o segmento.*

Pan et al. [Pan et al. 2012] basearam-se na definição de entropia na teoria da informação para definir o conceito de “popularidade” de uma via.

**Definição 2** *Seja  $(p_1, \dots, p_k)$  o conjunto das rotas do veículo que será re-roteado a seguir. Seja  $(r_1, \dots, r_n)$  a união de todas as vias de  $(p_1, \dots, p_k)$  e seja  $(fc_1, \dots, fc_n)$  o conjunto de todos os footprint counters relacionados à essas vias. A popularidade de um segmento  $p_j$  é definida como  $Pop(p_j) = e^{E(p_j)}$ .  $E(p_j)$  é a entropia ponderada de  $p_j$  e é computada como  $E(p_j) = -\sum_{i=1}^n w_i \frac{fc_i}{N} \ln \frac{fc_i}{N}$ ,  $N = \sum_{i=1}^n fc_i$ , e  $w_i = \frac{C_{avg}}{C_i}$ , com  $C_{avg}$  sendo a capacidade média de número de veículos da rede e  $C_i$  a capacidade de veículos da via  $r_i$ .*

Além da função de popularidade, [Pan et al. 2012] descreve funções de urgência para definir a prioridade dos veículos a serem re-roteados.

**Definição 3** *Dado um conjunto de veículos  $V = (v_1, v_2, \dots, v_m)$  a serem re-roteados, são definidas duas funções de urgência para computar a prioridade do re-roteamento de um veículo em  $V$ :*

- *Relative Congestion Impact:  $RCI = (RemTT - RmFFTT)/RmFFTT$*
- *Absolute Congestion Impact:  $ACI = RemTT - RmFFTT$*

com  $RemTT$  sendo o tempo restante de viagem total e  $RemFFTT$  o tempo restante de viagem em fluxo livre para o veículo.

As duas funções se diferem de forma que o valor  $RCI$  reflete o impacto do congestionamento relativo ao tempo de viagem restante, enquanto o  $ACI$  enfatiza o aumento absoluto no tempo de viagem.

Dessa forma, o EBkSP foi a estratégia de re-roteamento utilizada para avaliar o desempenho dos modelos de fluxo de tráfego escolhidos por este trabalho. Na seção seguinte serão apresentados os modelos de fluxo de tráfego.

## 4. Modelos de fluxo de tráfego

Nesta seção serão detalhados os modelos de fluxo de tráfego que tiveram seu desempenho avaliado no estudo. Como citado anteriormente, o processo de detecção de congestionamentos em algoritmos de re-roteamento é feito através de modelos matemáticos que descrevem o comportamento da malha rodoviária. Para este estudo, foram considerados quatro modelos de fluxo de tráfego: o modelo linear de Greenshields

[Greenshields et al. 1935], o modelo de Greenberg [Greenberg 1959], o modelo de Drake [Drake et al. 1966] e um modelo híbrido que combina a solução apresentada por Greenberg [Greenberg 1959] e Underwood [Underwood 1961]. Abaixo, define-se a notação comum que será utilizada nas equações para descrever os modelos:

- $v_e$  é a velocidade esperada calculada para uma via.
- $v_o$  é a velocidade “ótima” da via, ponto em que se obtém o fluxo máximo.
- $v_f$  é a velocidade de fluxo máximo, ou seja, a velocidade máxima permitida na via.
- $k$  é a concentração atual da via.
- $k_j$  é a concentração máxima de veículos na via.
- $k_o$  é a concentração “ótima” da via, ponto em que se obtém o fluxo máximo. Uma via é considerada congestionada caso  $k > k_o$ .

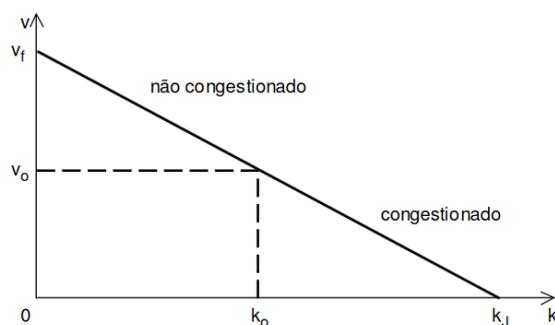
É importante ressaltar que na representação da malha rodoviária como um grafo direcionado ponderado, o valor do “peso”  $w$  de uma aresta é dado pelo tempo de viagem médio na via. Em uma via de tamanho  $L$ , têm-se que:

$$w = \frac{L}{v_e} \quad (1)$$

onde  $v_e$  é definida pelos modelos de fluxo de tráfego apresentados a seguir.

#### 4.1. Modelo de Greenshields

O modelo de Greenshields [Greenshields et al. 1935] descreve o fluxo de tráfego com um comportamento linear. Ou seja, há uma relação inversa direta entre a velocidade esperada na via e a concentração, como pode ser visto na Figura 1, retirada de [da Silva 1994].

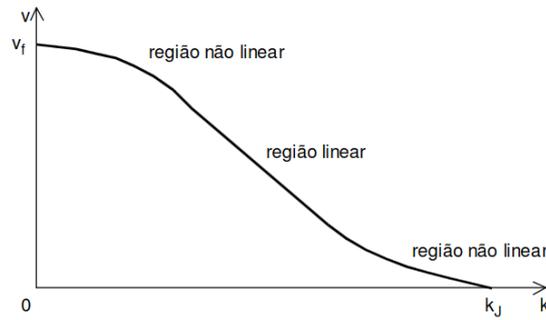


**Figura 1. Representação gráfica do modelo linear de Greenshields**

Assim foi descrita a equação (2):

$$v_e = v_f \left(1 - \frac{k}{k_j}\right) \quad k_o = \frac{k_j}{2} \quad (2)$$

O modelo se destaca pela simplicidade, muitos TMSs o utilizam como base para a detecção de congestionamentos, como [Wang et al. 2016] e [Pan et al. 2012]. Porém as equações propostas por Greenshields se mostraram limitadas, tendo baixa aderência em



**Figura 2. Comportamento observado da relação velocidade-concentração**

valores não intermediários de  $v$  e  $k$  [Gerlough and Huber 1975], como mostra a Figura 2, retirada de [da Silva 1994].

Pensando em superar as falhas do modelo linear, foram desenvolvidos modelos logarítmicos para descrever o fluxo de tráfego.

#### 4.2. Modelos logarítmicos

Todos os modelos analisados, com exceção do modelo de Greenshields, se caracterizam por terem comportamento logarítmico, com o parâmetro  $k_o$  (concentração ótima) tendo a seguinte equação:

$$k_o = \frac{k_j}{e} \quad (3)$$

##### 4.2.1. Greenberg

O modelo logarítmico de Greenberg [Greenberg 1959], descrito em (4), foi o primeiro a ser proposto após Greenshields.

$$v_e = v_o \ln\left(\frac{k_j}{k}\right) \quad (4)$$

Análises de campo mostraram que o modelo de Greenberg possui boa aderência para fluxos congestionados [Gerlough and Huber 1975]. Como citado na seção de trabalhos relacionados, este modelo também já foi utilizado como base para a detecção de congestionamentos em TMSs na literatura [Guidoni et al. 2020].

##### 4.2.2. Greenberg - Underwood

[Underwood 1961] descreveu um modelo logarítmico de fluxo de tráfego que mostrou ter uma boa aderência para baixas concentrações. A expressão obtida pode ser vista em (5).

$$v_e = v_f e^{-\frac{k}{k_o}} \quad (5)$$

A fim de explorar as propriedades específicas da melhor aderência dos modelos de Greenberg e Underwood, foi proposto um modelo de multi-regime que se baseia nas

duas formulações anteriores [Edie 1961]. Dessa forma, define-se um modelo híbrido simplificado. Uma vez que é identificada uma via congestionada com  $k > k_o$ , o peso da via é calculado a partir do modelo de Greenberg. Caso a via não esteja congestionada, é considerado o modelo de Underwood apresentado na expressão (5).

### 4.2.3. Drake

[Drake et al. 1966] descreveu um modelo logarítmico de fluxo de tráfego baseado na curva de Bell, descrito abaixo.

$$v_e = v_f e^{-\frac{1}{2}(\frac{k}{k_o})^2} \quad (6)$$

Graças ao seu formato, o modelo de Drake consegue modelar a velocidade da via de forma que ela cai lentamente até  $k_o$ , e decai rapidamente uma vez que a via está congestionada [Romanowska and Jamroz 2021].

## 5. Experimentação e resultados

A fim de comparar o desempenho de diferentes modelos de fluxo de tráfego, além de analisar o impacto da escolha do modelo nos resultados de um TMS, foram realizadas extensas simulações com os modelos apresentados.

### 5.1. Configuração da simulação

Para realizar a simulação, foi adotado o *Simulation of Urban Mobility* (SUMO)<sup>1</sup>, na versão 0.30.0, e o *Traffic Control Interface* (TraCI)<sup>2</sup>. O SUMO é um simulador microscópico de rede rodoviária que tem o TraCI como interface que possibilita o controle do comportamento da simulação. Através do TraCI, é possível alterar o estado de veículos, rotas, configuração da rede, sinais de trânsito, etc. Foi adotado um recorte da cidade de Chicago como cenário das simulações, a topologia da rede pode ser vista na Figura 3. As informações do cenário de simulação utilizado estão na Tabela 1.

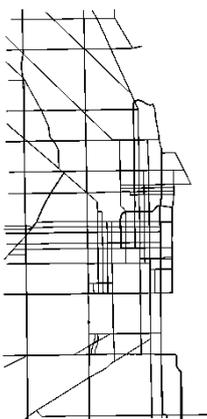


Figura 3. Cenário de Chicago - Imagem retirada do software SUMO

<sup>1</sup><https://sumo.dlr.de/docs/index.html>

<sup>2</sup><https://sumo.dlr.de/docs/TraCI.htm>

**Tabela 1. Informações sobre o cenário de Chicago**

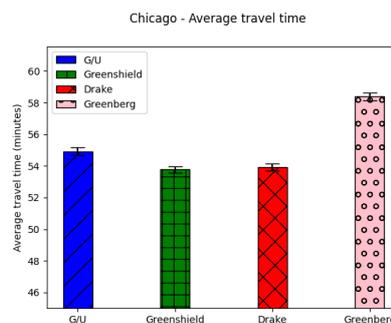
Número de vias	1021
Tamanho total das vias	291,24 km
Número de interseções	998

Como descrito na seção 3, o algoritmo de re-roteamento necessita da definição de certos parâmetros para seu funcionamento. Um valor  $L$ , que denota a maior distância em que uma via é considerada para re-roteamento. Um valor  $k$  relacionado à quantidade máxima de rotas alternativas que serão consideradas para cada veículo. A política de urgência utilizada (*ACI* ou *RCI*). Além de um valor de período  $T$ , que denota a frequência de disparo do re-roteamento. Nos experimentos realizados foram utilizados os parâmetros de  $L = 3$ ;  $k = 3$ ;  $T = 900s$  baseados no experimentos de [Pan et al. 2012]; utilizando a política *ACI* de urgência.

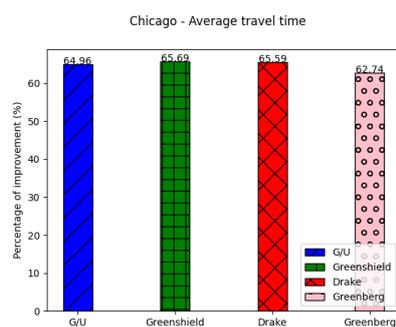
Os resultados foram obtidos através da média de uma amostragem de 100 simulações diferentes para cada um dos modelos analisados, gerando intervalos de confiança de 95%. Para analisar o desempenho de cada um dos modelos, foram analisadas as métricas de tempo de viagem médio, emissão de CO<sub>2</sub>, tamanho médio da rota e número de re-roteamentos. A seguir os resultados são apresentados.

## 5.2. Resultados obtidos

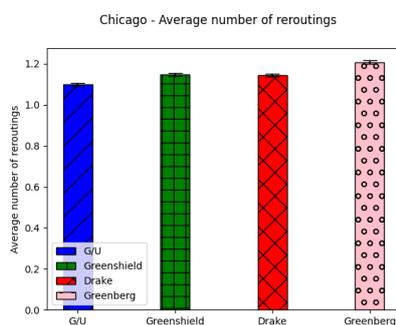
A Figura 4 apresenta o tempo médio de viagem obtido por cada um dos modelos. Na Figura 5 pode-se observar o ganho (%) de cada modelo em relação à simulação sem re-roteamento. Em ordem de desempenho, têm-se que o modelo de Greenshields obteve média de tempo de viagem de 53.77 minutos (ganho de 65,69% em relação à solução sem re-roteamento), o modelo de Drake obteve média de tempo de viagem de 53,92 minutos (ganho de 65,59% em relação à solução sem re-roteamento), o modelo híbrido de Greenberg e Underwood (G/U) resultou em uma média de 54.90 minutos (ganho de 64,96% em relação à solução sem re-roteamento) e, por fim, o modelo de Greenberg obteve o pior desempenho com média do tempo de viagem de 58.39 minutos (ganho de 62.74% em relação à solução sem re-roteamento). Na Figura 6, pode-se observar o número médio de re-roteamentos, calculado como o somatório dos rerroteamentos totais dividido pelo número de veículos. É importante observar que, ao mesmo tempo que obteve o pior desempenho de tempo de viagem, o modelo de Greenberg foi o que disparou mais re-



**Figura 4. Tempo médio de viagem por modelo**



**Figura 5. Ganho no tempo médio de viagem**



**Figura 6. Número médio de re-roteamentos por modelo**

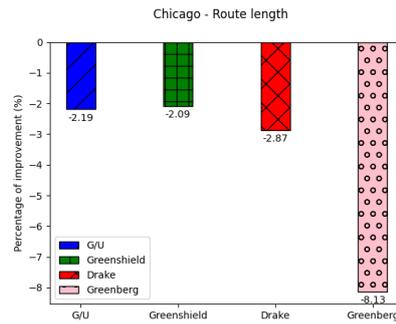
roteamentos. A sensibilidade do modelo de Greenberg ao cenário utilizado fez com que re-roteamentos fossem disparados desnecessariamente, aumentando o tamanho da rota dos veículos, como pode ser observado na Figura 7. Além disso, pode-se observar que o modelo de Greenshields, apesar de ter disparado mais re-roteamentos que o modelo de Drake, conseguiu um tempo de viagem ligeiramente inferior. Isso mostra que o modelo de Greenshields obteve maior precisão na detecção de congestionamentos, mesmo sendo um modelo linear.

Na Figura 8 pode-se observar o ganho na quantidade de emissões de gás carbônico de cada modelo, comparados com a solução sem re-roteamento. Verifica-se que a ordem de desempenho observada no gráfico de tempo de viagem médio se manteve: Greenshields, Drake, modelo híbrido G/U, e por fim, o modelo de Greenberg.

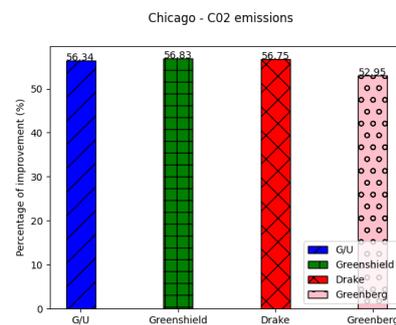
No geral, o modelo de Greenshields obteve melhor desempenho. Ao diminuir o tempo de viagem médio, outras métricas também são beneficiadas por consequência. Todos os resultados numéricos obtidos nas simulações do cenário de Chicago podem ser observados na Tabela 2.

**Tabela 2. Tabela de resultados obtidos no cenário de Chicago**

	<b>Greenshields</b>	<b>Drake</b>	<b>G/U</b>	<b>Greenberg</b>
Tempo médio de viagem (minutos)	53.77	53.92	54.90	58.39
Emissão média de C02 (mg/s)	7073126	7085945	7153358	7153358
Número médio de re-roteamentos	1.15	1.14	1.10	1.21
Tamanho médio de rota (m)	12843.07	12941.57	12855.67	13603.30



**Figura 7. Ganho no tamanho médio da rota**



**Figura 8. Ganho na emissão de gás carbônico**

## 6. Conclusão e trabalhos futuros

Com o congestionamento de rodovias sendo um problema latente no cenário de mobilidade urbana atual, pesquisas e trabalhos em TMS continuarão a ser feitas, propondo novas soluções a fim melhorar a qualidade de vida das pessoas em metrópoles. Com isso, modelos matemáticos que descrevem fluxo de tráfego continuarão a ser usados para a detecção de congestionamentos.

Diante deste cenário, este trabalho se propôs a analisar o desempenho de diferentes modelos de fluxo de veículos baseados na teoria de engenharia de tráfego utilizando o EBkSP como sistema de re-roteamento. Ao realizar simulações no cenário de Chicago, os modelos obtiveram resultados semelhantes, com o modelo de Greenshields tendo uma ligeira vantagem em relação aos outros. Isso evidencia que nem sempre modelos mais complexos terão desempenho superior, uma vez que o modelo de Greenshields é o único analisado que possui comportamento linear. Além disso, o estudo mostrou que a escolha do modelo matemático de fluxo de tráfego pode afetar significativamente o desempenho do TMS. Utilizando o cenário de Chicago, o modelo de Greenberg obteve o pior desempenho dentre os modelos, resultando em um tempo de viagem médio 8,2% pior se comparado com o modelo de Greenshields.

Em trabalhos futuros, sugere-se a avaliação dos modelos clássicos tratados neste estudo utilizando-se de outros cenários de simulação. Além disso, este trabalho limitou-se a analisar o desempenho de modelos de fluxo de tráfego clássicos. A literatura em engenharia de tráfego descreve modelos mais recentes e complexos, que ainda não foram utilizados como base para a detecção de congestionamentos em sistemas de gerencia-

mento de tráfego, e portanto, ainda carecem de análises de desempenhos nesse tipo de contexto.

## 7. Agradecimentos

O presente trabalho foi realizado com apoio da FAPEMIG (Universal APQ-02510-18).

## Referências

- Akabane, A. T., Immich, R., Bittencourt, L. F., Madeira, E. R., and Villas, L. A. (2020). Towards a distributed and infrastructure-less vehicular traffic management system. *Computer Communications*, 151:306–319.
- Asvial, M., Gita Pandoyo, M. F., and Setyo Arifin, A. (2018). Internet of things solution for motorcycle riders to overcome traffic jam in jakarta using ebksp. In *2018 International Conference on Information and Communication Technology Convergence (ICTC)*, pages 636–638.
- Asvial, M., Pandoyo, M. F. G., and Arifin, A. S. (2020). Entropy-based k shortest-path routing for motorcycles: A simulated case study in jakarta. *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*, 11(7).
- Banks, J. (2002). *Introduction to Transportation Engineering*. McGraw-Hill series in transportation. McGraw-Hill.
- da Silva, P. C. M. (1994). *Apostila: Teoria do Fluxo de Tráfego*. Universidade de Brasília.
- de Souza, A. M., Braun, T., Botega, L. C., Cabral, R., Garcia, I. C., and Villas, L. A. (2019). Better safe than sorry: a vehicular traffic re-routing based on traffic conditions and public safety issues. *Journal of Internet Services and Applications*, 10:1–18.
- de Souza, A. M., Yokoyama, R. S., Maia, G., Loureiro, A. A. F., and Villas, L. A. (2016). Real-time path planning to prevent traffic jam through an intelligent transportation system. *2016 IEEE Symposium on Computers and Communication (ISCC)*, pages 726–731.
- Djahel, S., Doolan, R., Muntean, G.-M., and Murphy, J. (2015). A communications-oriented perspective on traffic management systems for smart cities: Challenges and innovative approaches. *IEEE Communications Surveys Tutorials*, 17(1):125–151.
- Drake, J., Schofer, J., and May, A. (1966). A statistical analysis of speed-density hypotheses. *Highway Research Record 154*, pages 53–87.
- Du, R., Chen, S., Dong, J., Ha, P. Y. J., and Labi, S. (2021). Gaq-ebksp: A drl-based urban traffic dynamic rerouting framework using fog-cloud architecture. In *2021 IEEE International Smart Cities Conference (ISC2)*, pages 1–7.
- Eddie, L. C. (1961). Car-following and steady-state theory for noncongested traffic. *Operations Research*, 9(1):66–76.
- Eppstein, D. (1998). Finding the k shortest paths. *SIAM Journal on computing*, 28(2):652–673.
- Gerlough, D. and Huber, M. (1975). *Traffic Flow Theory: A Monograph*. Special Reports. Transportation Research Board, National Research Council.

- Greenberg, H. (1959). An analysis of traffic flow. *Operations Research*, 7(1):79–85.
- Greenshields, B. D., Bibbins, J., Channing, W., and Miller, H. (1935). A study of traffic capacity. In *Highway research board proceedings*, volume 14, pages 448–477. Washington, DC.
- Guidoni, D. L., Maia, G., Souza, F. S. H., Villas, L. A., and Loureiro, A. A. F. (2020). Vehicular traffic management based on traffic engineering for vehicular ad hoc networks. *IEEE Access*, 8:45167–45183.
- Ministério da Infraestrutura (2022). Frota de veículos 2022. Disponível em: <https://www.gov.br/infraestrutura/pt-br/assuntos/transito/conteudo-Senatran/frota-de-veiculos-2022>. Acesso em: 17 de mar. de 2023.
- Ministério da Infraestrutura (2023). Frota de veículos 2023. Disponível em: <https://www.gov.br/infraestrutura/pt-br/assuntos/transito/conteudo-Senatran/frota-de-veiculos-2023>. Acesso em: 17 de mar. de 2023.
- Page, L., Brin, S., Motwani, R., and Winograd, T. (1999). The pagerank citation ranking: Bringing order to the web. Technical report, Stanford infolab.
- Pan, J., Khan, M. A., Popa, I. S., Zeitouni, K., and Borcea, C. (2012). Proactive vehicle re-routing strategies for congestion avoidance. In *2012 IEEE 8th International Conference on Distributed Computing in Sensor Systems*, pages 265–272.
- Romanowska, A. and Jamroz, K. (2021). Comparison of traffic flow models with real traffic data based on a quantitative assessment. *Applied Sciences*, 11:9914.
- Silveira, L. M., Almeida, J. M., Marques-Neto, H., and Ziviani, A. (2015). Mobdatu: A new model for human mobility prediction based on heterogeneous data. In *2015 XXXIII Brazilian Symposium on Computer Networks and Distributed Systems*, pages 217–227.
- Singh, T., Solanki, A., Sharma, S. K., Nayyar, A., and Paul, A. (2022). A decade review on smart cities: Paradigms, challenges and opportunities. *IEEE Access*, 10:68319–68364.
- Souza, A., Brennand, C., Yokoyama, R., Donato, E., Madeira, E., and Villas, L. (2017). Traffic management systems: A classification, review, challenges, and future perspectives. *International Journal of Distributed Sensor Networks*, 13:155014771668361.
- Underwood, R. (1961). Speed, volume, and density relationship. quality and theory of traffic flow, yale bur.
- Wang, S., Djahel, S., Zhang, Z., and McManis, J. (2016). Next road rerouting: A multi-agent system for mitigating unexpected urban traffic congestion. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 17(10):2888–2899.