

Simulação de Tráfego Veicular Baseada no Modelo de Nagel–Schreckenberg e Extensão para Ambientes Urbanos

Luis Filipe Oliveira Santos¹, Jones Oliveira de Albuquerque¹

¹Departamento de Estatística e Informática
Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE) – Recife – PE – Brasil

{luis.filipeoliveira, jones.albuquerque}@ufrpe.br

O modelo de Nagel–Schreckenberg (NaSch), um autômato celular unidimensional, representa um paradigma essencial para a investigação da dinâmica do tráfego rodoviário a partir de regras simples de interação local entre veículos discretizados. Desenvolvido em 1992, o NaSch permite a simulação de fenômenos emergentes como congestionamentos e ondas de choque, servindo como base para extensões que visam representar cenários urbanos mais complexos. Este artigo aprofunda a fundamentação teórica do modelo clássico NaSch e analisa a interpretação de diagramas espaço-temporais gerados por suas simulações, incluindo cenários estendidos para ambientes urbanos. Destaca-se a utilidade dessas implementações computacionais como plataformas acessíveis para o estudo da emergência de padrões complexos no tráfego urbano, bem como para a avaliação de políticas e estratégias de controle viário, conferindo um rigor científico à compreensão da mobilidade.

1. Introdução

O artigo introduz o **modelo de Nagel–Schreckenberg (NaSch)**, um **autômato celular (CA)** unidimensional, como uma ferramenta fundamental para simular o tráfego rodoviário. O NaSch, notável por sua simplicidade e eficácia, permite reproduzir fenômenos complexos como congestionamentos e ondas de choque. O objetivo do trabalho é aprofundar a fundamentação teórica do NaSch clássico, analisar seus **diagramas espaço-temporais (x-t)** e estendê-lo para simular cenários urbanos mais complexos, incorporando elementos como múltiplas faixas e semáforos. A pesquisa destaca a utilidade dessas implementações como plataformas acessíveis para o estudo e a avaliação de políticas de tráfego.

2. Fundamentação Teórica: Modelagem de Tráfego e Autômatos Celulares

2.1 O Modelo de Nagel–Schreckenberg (NaSch) Clássico

O modelo NaSch é um autômato celular onde a pista é uma grade unidimensional e circular de células. Cada célula pode estar vazia ou ocupada por um único veículo, que possui uma velocidade v limitada por uma velocidade máxima v_{\max} . As posições e velocidades dos veículos são atualizadas simultaneamente em passos de tempo discretos, seguindo quatro regras principais:

1. **Aceleração:** $v \rightarrow v+1$, se $v < v_{\max}$.

2. **Desaceleração por Segurança:** $v \rightarrow \min\{d, v\}$, onde d é o número de células livres à frente.
3. **Frenagem Aleatória:** Com uma probabilidade p , $v \rightarrow v-1$, simulando a imprevisibilidade do comportamento humano.
4. **Movimento:** O veículo avança o número de células correspondente à sua nova velocidade.

Os parâmetros-chave são a velocidade máxima v_{max} , a probabilidade de frenagem p e a densidade veicular ρ . O modelo é capaz de reproduzir as três fases de tráfego: **Fluxo Livre**, **Fluxo Sincronizado** e **Engarrafamento Móvel Amplo**, demonstrando sua robustez na modelagem de fenômenos emergentes.

2.2 Análise de Padrões de Tráfego em Diagramas Espaço-Temporais

Os **diagramas espaço-temporais (x-t)** são ferramentas visuais cruciais para analisar a evolução do tráfego. O eixo horizontal representa o tempo, e o vertical, a posição na pista. A inclinação de cada linha no diagrama indica a velocidade do veículo. Linhas íngremes representam velocidades altas, enquanto linhas planas indicam baixas velocidades. O espaçamento entre as linhas reflete a distância entre os veículos.

A análise visual desses diagramas permite a identificação de **ondas de choque (shock waves)**, que são as transições abruptas entre diferentes fases de tráfego. Uma onda de choque é uma linha que separa dois estados de tráfego distintos e que geralmente se propaga na direção oposta ao fluxo (inclinação negativa). A **Onda de Parada** representa a transição do fluxo livre para o congestionado.

2.3 Extensões do Modelo NaSch para Cenários Urbanos

Para ampliar a aplicabilidade do modelo, o trabalho incorpora elementos urbanos que não são capturados pelo NaSch clássico,:

- **Múltiplas faixas:** Permitem a troca de faixas, o que impacta o fluxo geral.
- **Semáforos:** Introduzem interrupções periódicas, criando gargalos e filas.
- **Fiscalização:** Simula zonas onde a velocidade é reduzida, forçando os veículos a desacelerar.
- **Comportamento estocástico do condutor:** Expande o parâmetro p para incluir fatores humanos mais detalhados.

Essas extensões modificam o modelo básico adicionando novas regras ou adaptando as existentes, aumentando a fidelidade do modelo às realidades urbanas.

3. Metodologia: Implementação Computacional em Python

3.1 Implementação do Modelo Clássico NaSch

O modelo clássico foi implementado em Python em uma pista circular de $L=500$ células. Os parâmetros fixos para a simulação foram: $v_{\max}=2$, probabilidade de frenagem aleatória $p=0.2$ e densidade veicular $\rho=0.48$. O estado da pista foi armazenado a cada passo de tempo para a posterior geração de diagramas espaço-temporais.

3.2 Implementação da Extensão Urbana em Pygame

O modelo estendido foi codificado em Python utilizando a biblioteca Pygame para visualização gráfica em tempo real. Esta implementação contempla uma via com $L=30$ células e duas faixas, incorporando um algoritmo para troca de faixa, controle semafórico e uma zona de fiscalização onde a velocidade máxima é reduzida. A visualização em tempo real é fundamental para a compreensão dos padrões emergentes.

4. Análise e Discussão dos Resultados: Interpretação dos Diagramas.

4.1 Análise de Diagramas Espaço-Temporais do Modelo Clássico

A seguir, são apresentados e analisados os diagramas espaço-temporais obtidos a partir da simulação do modelo NaSch clássico.

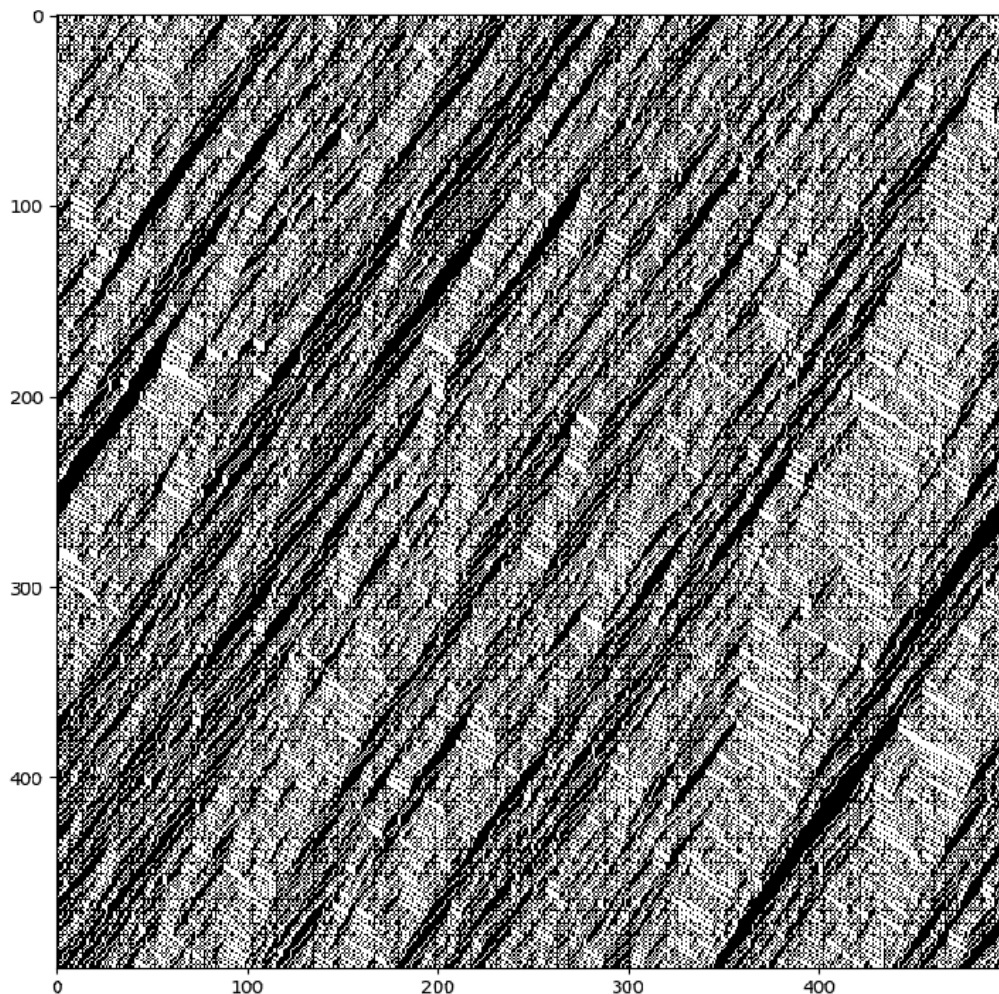


Figura 1: Diagrama Espaço-Temporal $d = 0.5$, $v_{\max}=10$ e $p=0.7$

O diagrama da **Figura 1** ilustra a coexistência de diferentes fases do tráfego. Neste cenário, a combinação de uma densidade intermediária ($d=0.5$) com uma alta probabilidade de frenagem aleatória ($p=0.7$) cria instabilidade. As faixas escuras e inclinadas negativamente que se propagam para trás são as **ondas de choque**, que representam a transição brusca de um fluxo livre para um estado de congestionamento. As lacunas claras indicam um fluxo rápido, enquanto as áreas escuras e densas com linhas mais verticais mostram a formação de congestionamentos espontâneos.

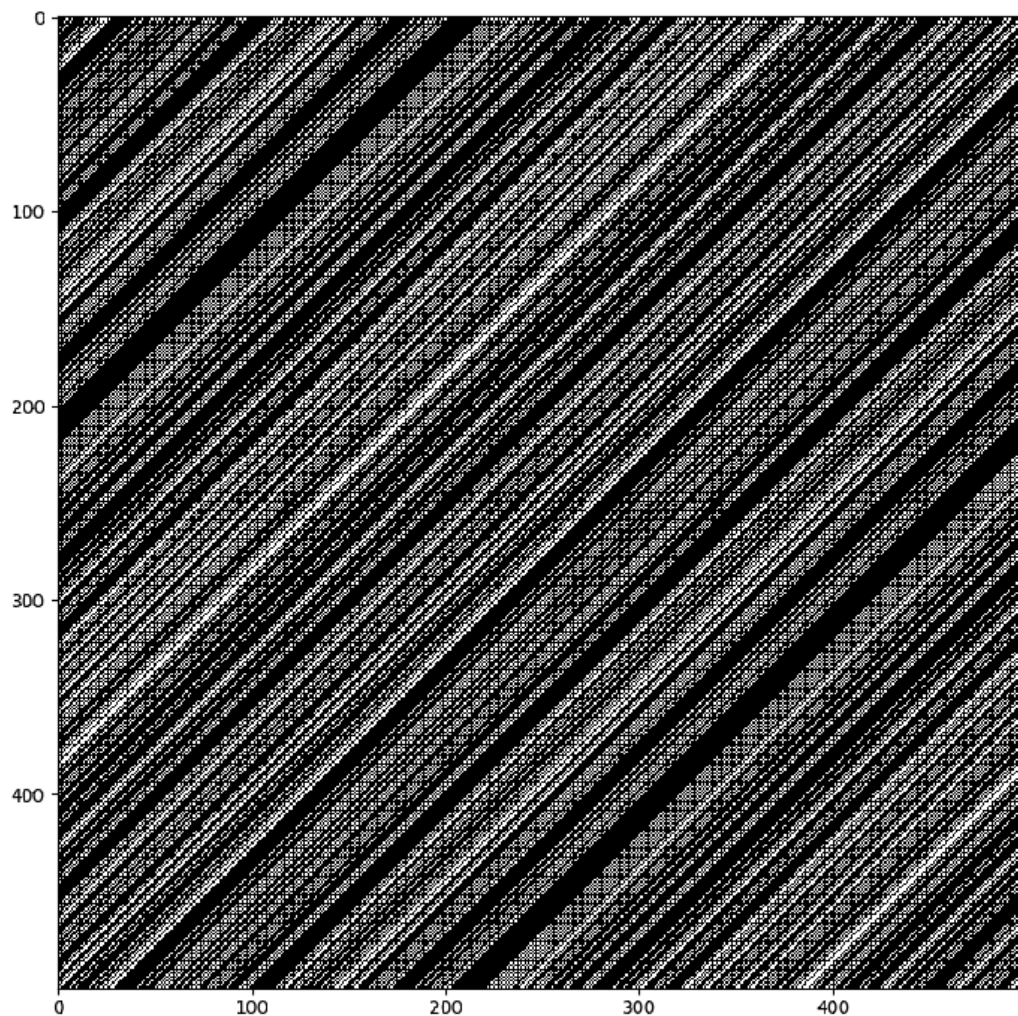


Figura 2: Diagrama Espaço-Temporal $d=0.7$, $v_{\max}=5$ e $p=0$

Já no cenário da **Figura 2**, com uma densidade veicular elevada ($d=0.7$) e probabilidade de frenagem nula ($p=0$), o sistema atinge um estado de **fluxo sincronizado** estável. A ausência de aleatoriedade impede a formação de congestionamentos caóticos. As linhas de trajetória são quase perfeitamente paralelas e densas, mas ainda inclinadas,

indicando que os veículos se movem de forma coesa e com uma velocidade média uniforme, sem as paradas e acelerações bruscas observadas no caso anterior.

4.2 Impactos da Extensão Urbana

Os testes com a extensão urbana, com múltiplas faixas, semáforo e fiscalização, revelaram a complexidade adicional introduzida por esses elementos.



Figura 3: Cenário 1, Teste com Fiscalização

No **Cenário 1 (Figura 3)**, a implementação de uma zona de **fiscalização**, representada por uma célula azul, atua como um **gargalo artificial**. Essa perturbação fixa força os veículos a desacelerar em um ponto específico, causando a formação de ondas de choque que se propagam para trás, demonstrando como elementos da infraestrutura podem impactar a dinâmica do tráfego.

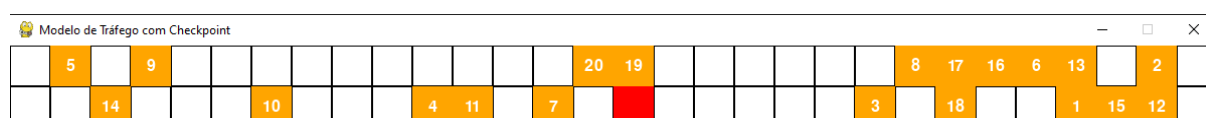


Figura 4: Cenário 2, Teste com Semáforo

No **Cenário 2 (Figura 4)**, a presença de um **semáforo** introduz uma interrupção completa e periódica do fluxo. A dinâmica de mudança de estado do semáforo modula a densidade e o fluxo local, resultando em um acúmulo temporário de veículos. A visualização mostra como a fila se forma e se dissipa, e como a dinâmica de troca de faixa, embora não visível na imagem estática, contribui para a tentativa de manter a fluidez mesmo diante de tal interrupção.

5. Considerações Finais

O modelo de Nagel–Schreckenberg é uma ferramenta analítica robusta para a simulação de tráfego, capaz de reproduzir fenômenos emergentes e capturar as fases de tráfego. A interpretação detalhada dos diagramas espaço-temporais é uma abordagem visual poderosa para discernir a evolução do sistema. A extensão do modelo para cenários urbanos, incorporando múltiplos elementos, aumenta significativamente seu realismo e aplicabilidade. As implementações computacionais servem como plataformas acessíveis e eficazes para fins didáticos e de pesquisa. Para o futuro, sugere-se a incorporação de dados reais, a inclusão de diferentes tipos de veículos e a otimização de políticas de tráfego, para tal compreensão é possível ter acesso ao código completo para testes nesse link:

<https://github.com/LuisFilipeOliveiraSantos/Simulaco-de-Trafego-Veicular-Baseada-no-Modelo-de-Nagel-Schreckenberg>

Referências

1. Traffic flow - Wikipedia, acessado em agosto 07, 2025, https://en.wikipedia.org/wiki/Traffic_flow
2. Traffic flow cellular automaton model with bi-directional information in an open boundary condition \ Transportation Safety and Environment \ Oxford Academic,,<https://academic.oup.com/tse/article/3/1/1/5897195>
3. Modelling of traffic flow, <https://www.thp.uni-koeln.de/~as/Mypage/traffic.html>
4. Nagel-Schreckenberg model of traffic – study of diversity of car rules - SciSpace <https://scispace.com/pdf/nagel-schreckenberg-model-of-traffic-study-of-diversity-of-2ut0z2fpv4.pdf>
5. The shockwave is shown as a bold line in space-time diagram on the... - ResearchGatehttps://www.researchgate.net/figure/The-shockwave-is-shown-as-a-bold-line-in-space-time-diagram-on-the-right-Behind-it-the_fig8_281375204
6. Shock wave analysis - TU Delft OpenCourseWare <https://ocw.tudelft.nl/wp-content/uploads/Chapter-8.-Shock-wave-analysis.pdf>
7. SCHIFF, Joel L. **Cellular Automata: A Discrete View of the World**. Hoboken: Wiley-Interscience, 2008