

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

Luis Filipe Oliveira Santos<sup>1</sup>, Jones Oliveira de Albuquerque<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Departamento 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  $\rho$ . 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.

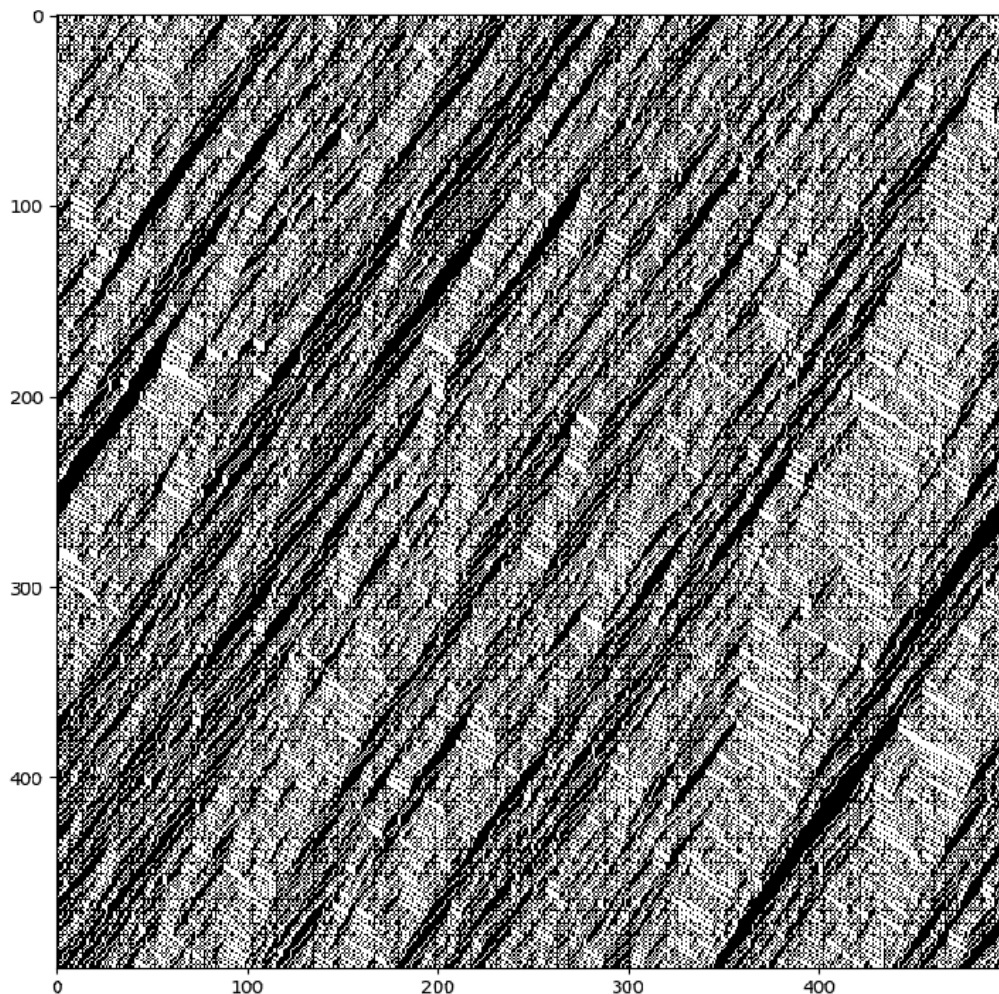


Figura 1: Diagrama Espaço-Temporal  $d = 0.5$ ,  $v_{\max}=10$  e  $p=0.7$

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.

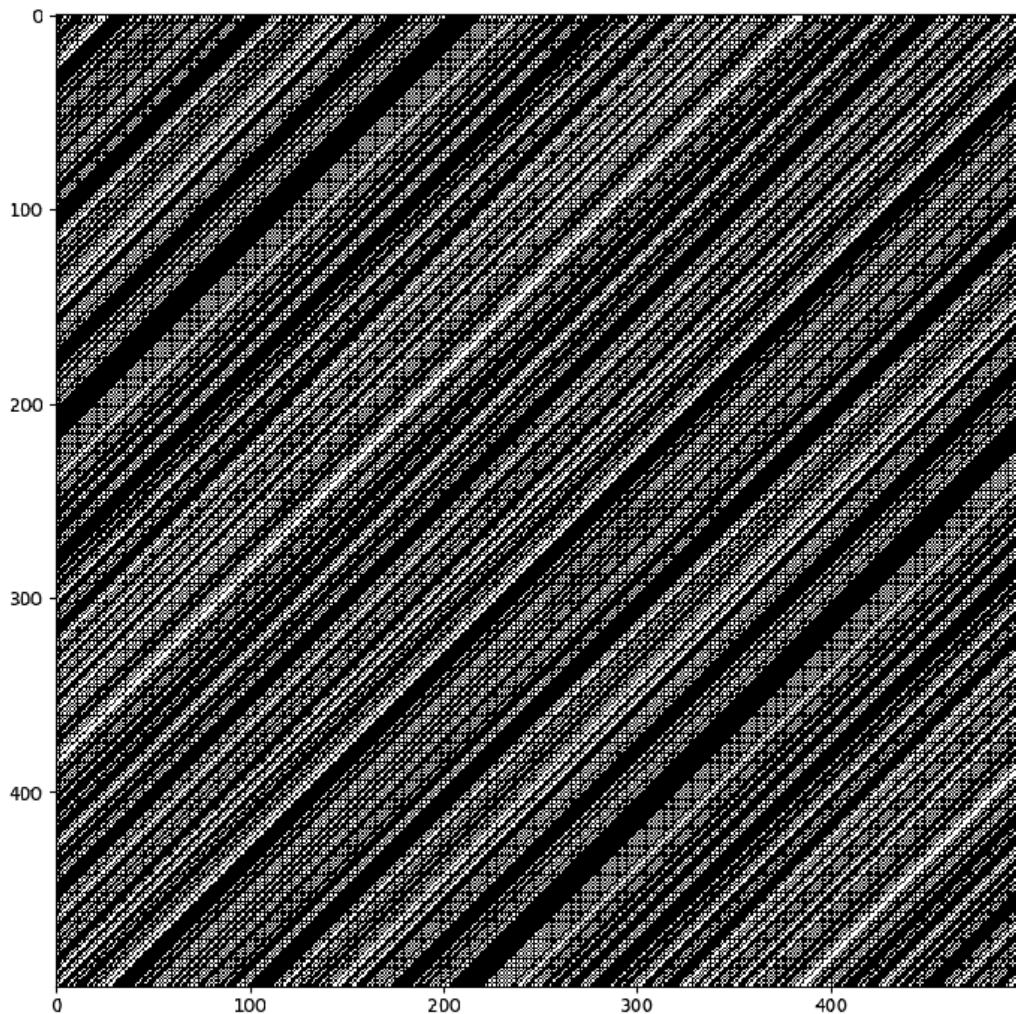


Figura 2: Diagrama Espaço-Temporal  $d=0.7$ ,  $v_{\max}=5$  e  $p=0$

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.

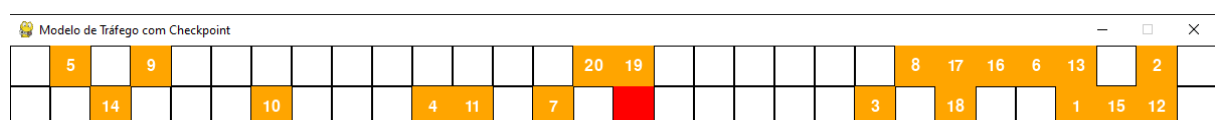


Figura 4: Cenário 2, Teste com Semáforo

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 identificar as diferentes fases de escoamento. A interpretação detalhada dos **diagramas espaço-temporais** constitui uma abordagem visual poderosa para compreender a evolução do sistema ao longo do tempo. A adaptação do modelo para cenários urbanos, incorporando múltiplos elementos como interseções, semáforos e variações de infraestrutura, aumenta significativamente seu realismo e aplicabilidade. As implementações computacionais oferecem plataformas acessíveis e eficazes para fins didáticos, pesquisa acadêmica e até suporte a planejamentos de engenharia de tráfego.

Para o futuro, recomenda-se a incorporação de **dados reais** para calibração, a inclusão de diferentes tipos de veículos e a otimização de políticas de tráfego. Tais aprimoramentos podem ampliar seu uso em ferramentas de apoio à tomada de decisão e no desenvolvimento de soluções inteligentes para mobilidade urbana. Para compreensão do artigo num geral, é possível ter acesso a os códigos completos para testes no 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](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...* - ResearchGate[https://www.researchgate.net/figure/The-shockwave-is-shown-as-a-bold-line-in-space-time-diagram-on-the-right-Behind-it-the\\_fig8\\_281375204](https://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