



Universidade Federal Rural de Pernambuco - UFRPE

Departamento de Estatística e Informática - DEINFO

Cellular Automata

Jones Albuquerque

Simulação do Fluxo de Trânsito Utilizando Autômatos Celulares Baseados no Modelo Nagel-Schreckenberg

Daniel da Silva Santana Chastel Inacio

2 de Fevereiro de 2026

Resumo

O crescimento urbano e o aumento da frota veicular têm intensificado problemas relacionados à mobilidade urbana, tornando o estudo do fluxo de trânsito um tema relevante em diversas áreas científicas. Modelos computacionais baseados em autômatos celulares têm se mostrado eficientes na simulação de sistemas complexos, permitindo a análise de fenômenos emergentes a partir de regras locais simples. Este trabalho apresenta o desenvolvimento de uma simulação computacional do fluxo de veículos em uma via unidimensional utilizando o modelo Nagel-Schreckenberg. O sistema implementado permite visualizar o comportamento do tráfego, além de coletar dados estatísticos e gerar gráficos científicos que relacionam velocidade média, densidade veicular e fluxo de veículos. Os resultados demonstram a existência de diferentes regimes de tráfego, incluindo fluxo livre, fluxo máximo e congestionamento, evidenciando a capacidade dos autômatos celulares de representar fenômenos reais do trânsito urbano.

1. Introdução

O trânsito urbano representa um dos principais desafios enfrentados pelas cidades modernas, impactando diretamente a mobilidade, o consumo de combustível, a emissão de poluentes e a qualidade de vida da população. Com o aumento contínuo da quantidade de veículos, torna-se essencial desenvolver ferramentas capazes de analisar e prever o comportamento do fluxo de tráfego.

Modelos matemáticos e computacionais são amplamente utilizados para compreender sistemas complexos, especialmente aqueles que envolvem múltiplos agentes interagindo simultaneamente. Nesse contexto, os autômatos celulares surgem como uma abordagem eficiente para modelagem de fenômenos dinâmicos distribuídos, sendo aplicados em áreas como biologia, física, epidemiologia e mobilidade urbana.

Os autômatos celulares permitem representar sistemas complexos através de estruturas discretas compostas por células que evoluem ao longo do tempo segundo regras locais. No estudo do tráfego veicular, esses modelos possibilitam simular interações entre veículos e observar padrões emergentes, como formação espontânea de congestionamentos.

Este trabalho tem como objetivo desenvolver e analisar uma simulação do fluxo de trânsito utilizando autômatos celulares baseados no modelo Nagel-Schreckenberg, amplamente reconhecido na literatura científica como um dos principais modelos para simulação de tráfego rodoviário.

2. Fundamentação Teórica

2.1 Autômatos Celulares

Autômatos celulares são modelos matemáticos compostos por uma grade de células discretas que evoluem em passos de tempo igualmente discretos. Cada célula possui um

estado que pode ser atualizado com base em regras previamente definidas e nas condições das células vizinhas.

Uma das principais características dos autômatos celulares é a capacidade de gerar comportamentos complexos a partir de regras simples, permitindo o estudo de sistemas dinâmicos e fenômenos emergentes.

2.2 Modelagem de Tráfego com Autômatos Celulares

A modelagem de tráfego através de autômatos celulares permite representar a estrada como uma sequência de células discretas, onde cada célula pode estar vazia ou ocupada por um veículo. O movimento dos veículos é determinado por regras que simulam o comportamento dos motoristas, incluindo aceleração, frenagem e interação com outros veículos.

Entre os modelos mais utilizados destaca-se o modelo Nagel-Schreckenberg, proposto em 1992, que se tornou referência na simulação de tráfego rodoviário devido à sua simplicidade e capacidade de reproduzir características observadas em sistemas reais.

2.3 Modelo Nagel-Schreckenberg

O modelo Nagel-Schreckenberg representa a estrada como uma estrutura unidimensional onde cada veículo possui uma posição e uma velocidade discreta. A dinâmica do sistema é determinada por quatro regras fundamentais:

- Aceleração dos veículos até uma velocidade máxima;
- Redução da velocidade para evitar colisões;
- Frenagem aleatória para simular comportamento humano;
- Atualização simultânea das posições dos veículos.

Esse modelo permite reproduzir diferentes regimes de tráfego e analisar o impacto da densidade veicular sobre o desempenho do sistema.

3. Metodologia

3.1 Modelagem do Sistema

Neste trabalho, a estrada foi representada como um vetor unidimensional composto por células discretas. Cada célula pode assumir dois estados principais: vazia ou ocupada por um veículo. Os veículos possuem velocidade variável limitada por um valor máximo definido como parâmetro do sistema.

A densidade veicular foi controlada através da proporção entre o número de veículos e o tamanho total da estrada. Além disso, foi incorporado um parâmetro probabilístico responsável por simular a frenagem aleatória dos motoristas.

3.2 Regras de Transição

A atualização do sistema ocorre em passos discretos de tempo, seguindo as regras do modelo Nagel-Schreckenberg:

- Inicialmente, cada veículo tenta aumentar sua velocidade até o limite máximo permitido;
- Em seguida, a velocidade é ajustada com base na distância até o próximo veículo à frente, evitando colisões;
- Uma probabilidade de frenagem aleatória é aplicada para representar variações no comportamento dos motoristas;
- Por fim, o veículo é deslocado para sua nova posição com base na velocidade atual.

3.3 Implementação Computacional

A simulação foi desenvolvida utilizando a linguagem Python, com o auxílio das bibliotecas NumPy e Matplotlib. O sistema foi estruturado em módulos independentes responsáveis pela simulação do modelo, visualização gráfica e análise estatística dos resultados.

A visualização do fluxo de trânsito foi realizada por meio de animações que representam o deslocamento dos veículos ao longo da estrada. Além disso, foram coletados dados referentes à velocidade média e ao fluxo de veículos para posterior análise científica.

4. Resultados e Discussão

A simulação permitiu observar diferentes padrões de comportamento do tráfego conforme a variação da densidade veicular.

Os resultados indicaram que, em baixas densidades, o sistema apresenta fluxo livre, caracterizado por altas velocidades médias e baixa interação entre veículos. À medida que a densidade aumenta, o sistema atinge um ponto de fluxo máximo, no qual ocorre maior eficiência na utilização da via.

Em densidades elevadas, observou-se a formação de congestionamentos espontâneos, caracterizados pela redução significativa da velocidade média e pela formação de agrupamentos de veículos. Esse comportamento é consistente com fenômenos observados em sistemas reais de tráfego.

Os gráficos gerados demonstraram uma relação não linear entre densidade e fluxo veicular, evidenciando a existência de diferentes regimes de operação do sistema. Além disso, a análise da velocidade média ao longo do tempo revelou oscilações características do comportamento dinâmico do tráfego.

5. Conclusão

Este trabalho apresentou a implementação de uma simulação do fluxo de trânsito utilizando autômatos celulares baseados no modelo Nagel-Schreckenberg. Os resultados obtidos demonstraram que o modelo é capaz de reproduzir comportamentos observados em sistemas reais de tráfego, incluindo a formação espontânea de congestionamentos.

A abordagem baseada em autômatos celulares mostrou-se eficiente para análise de sistemas complexos, permitindo o estudo de interações entre veículos e o impacto da densidade veicular sobre o desempenho do trânsito.

Como trabalhos futuros, sugere-se a expansão do modelo para simulações com múltiplas faixas, inclusão de semáforos, simulação de cruzamentos e aplicação de técnicas estatísticas mais avançadas para análise dos resultados.

Referências

Nagel, K.; Schreckenberg, M. A cellular automaton model for freeway traffic. *Journal de Physique I*, 1992.

Wolfram, S. *A New Kind of Science*. Wolfram Media, 2002.

Chopard, B.; Droz, M. *Cellular Automata Modeling of Physical Systems*. Cambridge University Press, 1998.