

# Projeto de Doutorado

Carlos Miguel Moreira Gonçalves

April 5, 2024

## 1 Resumo

O rápido crescimento da área urbana sem o devido cuidado pode gerar diversos problemas economicos, sociais, ambientais e pode comprometer a estrutura a malha urbana. A previsão de quão vantajoso é uma mudança no conjunto de vias seja com reformas ou adicionadas pode otimizar o gasto em trânsito, que pode ser realocado em outras áreas essenciais, diminuição na poluição ou redução de congestionamentos. Através de modelagem computacional, esse projeto propõe simulações para entender como congestionamentos se propagam em diferentes cidades e quais são as vias que mais podem ser mais frágeis a engarrafamentos. Além disso, em geral para esse estudo é necessário o conhecimento de uma matriz Origem-Destino (OD) que é muito difícil de ser coletada devido à um grandes esforço na sua coleta e nos problemas éticos que isso pode causar. Para evitar isso será avaliado algoritmos que a partir de fluxos coletados da API do *Google Maps* seja possível conseguir a matriz OD. Portanto, esse trabalho visa contribuir para uma melhor entendimento do fenômeno de congestionamento e como é sua propagação dentro da cidade o que pode acarretar em um novo conhecimento sobre a física de percolação nesse contexto.

## 2 Introdução

A escalada da urbanização [1] em tempos recentes desencadeou uma série de investimentos significativos na expansão e melhoria das ruas e avenidas, visando facilitar a locomoção nas cidades. Tais investimentos, caracterizados por aportes financeiros substanciais e extensos períodos dedicados à infraestrutura e finalização das obras, refletem o esforço para acompanhar as demandas de uma população em crescimento, como ilustrado na evolução da urbanização em Fortaleza na Figura 1. No entanto, a ausência de uma análise meticulosa da infraestrutura viária pode acarretar uma série de consequências adversas, incluindo a proliferação de congestionamentos, o aumento do nível de estresse entre motoristas e passageiros [2, 3], a elevação do risco de acidentes e, conseqüentemente, um incremento nas emissões de gases nocivos ao meio ambiente [4]. Esses efeitos colaterais não apenas comprometem a eficácia dos investimentos em mobilidade urbana, mas também impactam negativamente a qualidade de vida nas cidades.

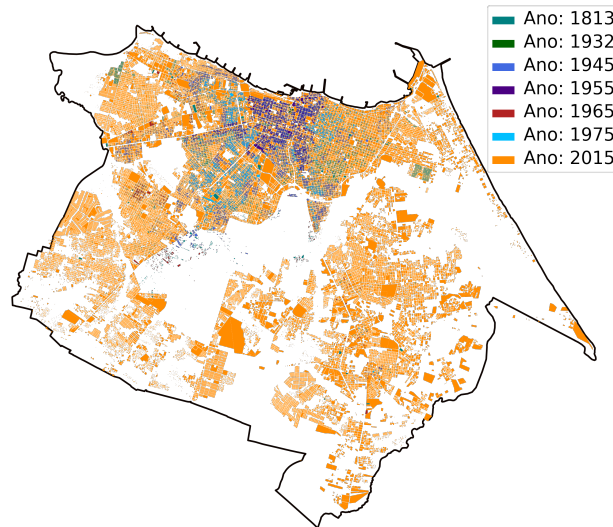


Figure 1: Evolução temporal da urbanização na cidade de Fortaleza.

Neste contexto, a modelagem computacional é uma ferramenta viável para abordar esses desafios urbanos complexos. Através de simulações precisas, é possível antecipar os impactos decorrentes de intervenções na infraestrutura viária, como a construção de novas vias, melhorias em rotas existentes, ou as consequências de obstruções temporárias provocadas por eventos climáticos adversos ou acidentes. O interesse por esta questão também se origina na presença de fundamentos físicos intrínsecos, tais como a lei da conservação do fluxo e o princípio de minimização de uma função de custo associada, além da manifestação de fenômenos críticos caracterizados por transições de fase entre estados de fluxo livre e congestionamento.

Transições de fase representam transformações fundamentais que ocorrem em vários contextos, desde fenômenos físicos, como a mudança de estados da matéria, até aplicações em processos biológicos e a dinâmica de atribuição de tráfego, onde sistemas experimentam mudanças abruptas de estado. Essas mudanças abruptas são quantificáveis através de expoentes críticos, os quais não dependem da dimensionalidade do sistema. Essa independência dimensional sugere que problemas distintos, quando compartilham expoentes críticos similares, podem ser agrupados em uma categoria comum denominada classe de universalidade. Li et al. [5], Zeng et al. [6] exploraram a dinâmica do tráfego na rede viária de Pequim, revelando uma transição de fase. Eles criaram um parâmetro que determina a capacidade de uma via para acomodar o fluxo de veículos. Descobriram que há um valor crítico, que varia com o tempo, no qual emerge o fenômeno da percolação. Ambühl et al. [7] aprofundaram a análise ao investigar as redes viárias de cinco grandes metrópoles, focando na evolução do maior conglomerado urbano e encontraram uma forte correlação entre a percolação do congestionamento e o fluxo médio da rede.

No entanto, a aplicação desta metodologia enfrenta obstáculos intrínsecos. Em primeiro lugar, a determinação das variáveis que um indivíduo considera ao escolher um percurso dentro do tecido urbano permanece incerta; não está claro se, ou como, as pessoas buscam otimizar seus trajetos em termos de tempo, custo ou conforto. Em segundo lugar, a velocidade de fluxo nas vias urbanas é diretamente influenciada pela densidade de tráfego, tornando a previsão do tempo de percurso uma questão dinâmica, sujeita a flutuações constantes em função do volume de veículos e por último a quantidade de dados disponíveis.

Assim como a corrente elétrica naturalmente encontra o caminho de menor resistência numa rede de resistores, e o fluido se desloca através do caminho de menor impedância em um meio poroso, seguindo a Lei de Darcy [8], os motoristas em uma rede urbana também buscam otimizar seus percursos. No entanto, ao contrário dos sistemas físicos regidos por leis bem definidas, o processo de decisão dos motoristas incorpora uma complexidade substancialmente maior. Esta complexidade deriva da diversidade de fatores que podem influenciar a escolha de uma rota, que vão além do mero cálculo de eficiência temporal ou de deslocamento. A seleção de um caminho pode ser afetada por aspectos como congestionamento, conhecimento da área, preferências pessoais, e até condições momentâneas, como o estado do tempo ou o humor do motorista resultando em trajetórias significativamente distintas daquelas focadas no benefício individual, ou uma abordagem altruísta, voltada para o bem-estar coletivo da sociedade.

Youn et al. [9] estudaram a razão do tempo considerando a otimização egoísta pelo tempo otimizando a sociedade e como esse valor se comporta em diferentes cidades e em modelos tradicionais de redes.

Outro impasse nessa modelagem é a influência direta da densidade de tráfego sobre a velocidade de fluxo nas vias urbanas, à medida que a concentração de veículos aumenta em uma via, a mobilidade tende a ser comprometida, levando a uma redução na velocidade média e, eventualmente, a situações de congestionamento. Nesse contexto, para modelagem é utilizado, tradicionalmente, a função de Bureau of Public Roads (BPR) [10, 9, 7]. A função BPR (Equação 1)

determina o tempo  $l_{i,j}$  entre dois pontos  $i$  e  $j$  que depende da velocidade limite da rua  $v_{i,j}$ , do fluxo  $f_{i,j}$ , da distância  $d_{i,j}$  entre  $i$  e  $j$  e da capacidade  $p_{i,j}$  com dois parâmetros  $\alpha = 0.2$  e  $\beta = 10$ [9]. Essa função é aproximadamente constante para valores de  $f_{i,j} < p_{i,j}$  porém é altamente não linear quando  $f_{i,j} \geq p_{i,j}$  e rapidamente tende a infinito.

$$l_{i,j} = \frac{d_{i,j}}{v_{i,j}} \left( 1 + \alpha \left( \frac{f_{i,j}}{p_{i,j}} \right)^\beta \right) \quad (1)$$

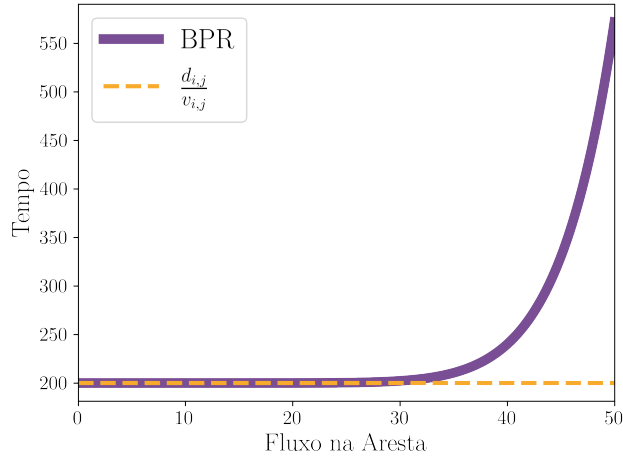


Figure 2: Comportamento da Função BPR com o incremento de fluxo.

Por fim, a obtenção dos dados, apresenta desafios significativos em termos de sensibilidade temporal, uma vez que as condições de tráfego são altamente dinâmicas e sujeitas a variações diárias, sazonais e devido a eventos não regulares. Além disso, há questões morais intrínsecas à coleta e ao uso desses dados, particularmente no que se refere à privacidade dos indivíduos. As informações de localização e padrões de movimento, por exemplo, podem revelar detalhes sobre a vida das pessoas, levantando preocupações éticas sobre como esses dados são coletados, armazenados e utilizados. Simini et al. [11] utilizaram um modelo para tentar estimar, dado uma conexão entre cidades dos Estados Unidos, o número de pessoas que trafegam entre as duas cidades.

Os principais trabalhos que estudam tráfego precisam, majoritariamente, de uma matriz chamada de Origem-Destino (OD) que cada elemento representa quantas pessoas saem de uma região para outra. Utilizando essa matriz, grafo da região em estudo e algoritmos de programação não linear [12] conseguem obter o fluxo de cada aresta do grafo. Uma das mais estudadas formulações desse problema é assumindo que os indivíduos otimizam o seu próprio tempo, sem se preocupar se isso será pior para rede como um todo e devemos assumir

a conservação de fluxo de veículos. Seja  $G$  um grafo composto por um conjunto  $N$  de nós e um conjunto  $A$  de arestas, o problema que deve ser resolvido é:

$$\min_x \sum_{(i,j) \in A} l_{i,j} \left( \sum_{s=1}^p f_{i,j}^s \right), \quad (2)$$

$$\text{sujeito a: } OD(j, s) = \sum_{(j,k) \in A} f_{j,k}^s - \sum_{(i,j) \in A} f_{i,j}^s, \quad (3)$$

$$f_{i,j} = \sum_p f_{i,j}^p \quad \forall (i,j) \in A, \quad (4)$$

$$f_{i,j}^s \geq 0 \quad \forall s \quad (5)$$

$$(6)$$

na qual  $OD(j, s)$  é a quantidade de indivíduos que desejam sair do nó  $j$  e irem para o nó  $s$ ,  $f_{i,j}^s$  representa o fluxo que passa entre a aresta  $(i, j)$  e que tem o intuito de chegar em  $s$ . A equação (3) representa que ao passar por um nó, se existe saldo significa que existem pessoas querendo ir de  $j$  para  $s$ .

Entretanto, como explicado anteriormente a matriz OD e até os valores  $f_{i,j}^p$  são difíceis de serem coletados e são confidenciais. Contudo com o auxílio do *Google Maps* é possível ter acesso ao fluxo em determinada rua por meio da sua API e assim pode-se tentar encontrar a matriz OD utilizando outras técnicas de otimização [13, 14, 15].

Portanto, neste projeto, é proposto um estudo sobre o comportamento de congestionamento em cidades, a partir de dados de Matrizes Origem-Destino, e como ele se propaga dentro da malha viária. Em paralelo a isso também será analisado a viabilidade de algoritmos para obtenção dessas matrizes em outras cidades a partir do fluxo de APIs do *Google Maps*, pois isso expandiria o trabalho para mais cidades e para um estudo ao longo do tempo.

### 3 Objetivos

Este projeto propõe uma investigação dos modelos de distribuição de tráfego em redes viárias, com o intuito de compreender as dinâmicas que governam o movimento e a alocação de indivíduos em diferentes vias. Essa investigação será conduzida através da aplicação de diversas métricas e técnicas de otimização, visando não apenas desvendar a distribuição baseadas em matrizes Origem-Destino, mas também explorar a possibilidade de reconstruir essas matrizes a partir dos fluxos observados na rede. Outrossim, o estudo pretende examinar os efeitos dos congestionamentos no comportamento geral do fluxo, proporcionando uma compreensão mais refinada de como as interrupções e as variações de capacidade impactam a distribuição de tráfego. A seguir, os objetivos específicos são detalhados:

1. Investigar e analisar modelos matemáticos e computacionais que descrevem a distribuição de indivíduos em redes de transporte. Este objetivo inclui a aplicação e o desenvolvimento de métricas para avaliar a eficiência, a equidade e a sustentabilidade dos padrões de tráfego resultantes.
2. Explorar a viabilidade de inferir matrizes Origem-Destino a partir de dados de fluxo observados, utilizando técnicas inversas e métodos de otimização. Este aspecto é crucial para melhorar as estratégias de planejamento e gestão de tráfego, especialmente em contextos onde os dados de origem-destino não estão diretamente disponíveis.
3. Avaliar como os congestionamentos alteram os padrões de fluxo dentro da rede, utilizando modelagem dinâmica e simulações para compreender as mudanças no comportamento dos usuários e na eficiência geral da rede sob condições variáveis de tráfego.

## 4 Métodos

- **Coleta de Dados:** a partir de dados de cidades obtidos através da API do Google Maps, ou recorrendo a conjuntos de dados publicados em artigos acadêmicos, que podem ser representados sob a forma de matrizes Origem-Destino ou como fluxos de tráfego específicos de uma área urbana em determinados períodos, daremos início às nossas análises. Além disso o site OpenStreetMap disponibiliza a partir da sua biblioteca do Python o shapefile de qualquer cidade.
- **Análise dos Dados:** A exploração desses conjuntos de dados pode ser realizada sob múltiplas perspectivas. Para os dados organizados em matrizes Origem-Destino, é factível derivar os correspondentes fluxos de tráfego mediante a aplicação de modelos consolidados na literatura científica, os quais podem ser adaptados e otimizados levando em consideração as singularidades de cada indivíduo na rede. Quanto aos dados relativos a fluxos específicos, abre-se a possibilidade de tentar reconstruir as matrizes OD, pois a construção dessas matrizes é muito custosa.
- **Estudo de Engarrafamentos:** Analisando a malha viária urbana e a distribuição de fluxos em cada via, é possível investigar a extensão do impacto que diversas interrupções — como obras de infraestrutura, congestionamentos ou inundações — exercem sobre as rotas adjacentes. Essa análise permitirá identificar não apenas as cidades mais vulneráveis a essas perturbações, mas também aquelas vias específicas que, quando obstruídas, têm maior potencial de desencadear efeitos em cascata, levando a engarrafamentos generalizados.
- **Impactos de Falhas Semafóricas:** durante períodos chuvosos, é frequente a ocorrência de falhas em semáforos, provocando uma dinâmica em que pedestres e motoristas, enfrentando cruzamentos com sinais inoperantes, hesitam em ceder passagem, gerando congestionamento na rua perpendicular. Essa situação pode ser meticulosamente modelada para compreender as interações e o comportamento dos usuários da via, permitindo identificar quais semáforos demandam atenção prioritária em termos de manutenção preventiva. Além disso, diante da iminência de falhas, a implementação de uma estratégia proativa, que inclua a designação de pessoal para gestão do trânsito, pode mitigar o impacto negativo desses eventos no fluxo veicular e na segurança dos usuários da via.

## 5 Resultados Esperados e Cronograma

Espera-se desenvolver uma análise sobre o comportamento de congestionamentos dentro de cidades e sua evolução, como se comporta os fluxos com esse congestionamento e quando existem falhas nos semáforos e o estudo de modelos para encontrar as matrizes OD pelos fluxos dentro da rede.

- **Primeiro Ano:**

- Concluir as cadeiras obrigatórias;
- Analisar os métodos de otimização para dado uma matriz OD encontrar os fluxos na rede;
- Analisar os métodos de otimização para dado fluxos em redes encontrar a respectiva matriz OD;

- **Segundo Ano:**

- Concluir as cadeiras optativas e estágio a docência;
- Entender o funcionamento da API do Google Maps e obter as matrizes OD em diferentes cidades;
- A partir das matrizes OD fazer os primeiros estudos sobre congestionamento;

- **Terceiro Ano:**

- Escrita da qualificação do doutorado;
- Investigar a falha em semáforos dentro da rede viária, como os fluxos são alterados e quais os semáforos que podem gerar mais defeitos utilizando-se métricas em redes;

- **Terceiro Ano:**

- Fazer as últimas análises dos resultados;
- Defender a tese;



## References

- [1] Leiwen Jiang, Malea Young, and Karen Hardee. Population, urbanization, and the environment. *World watch*, 2008/9, 01 2009.
- [2] Janice Hegewald, Melanie Schubert, Alice Freiberg, Karla Romero Starke, Franziska Augustin, Steffi G. Riedel-Heller, Hajo Zeeb, and Andreas Seidler. Traffic noise and mental health: A systematic review and meta-analysis. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17(17):6175, August 2020. ISSN 1660-4601. doi: 10.3390/ijerph17176175. URL <http://dx.doi.org/10.3390/ijerph17176175>.
- [3] Mazda Adli, Maximilian Berger, Eva-Lotta Brakemeier, Ludwig Engel, Joerg Fingerhut, Ana Gomez-Carrillo, Rainer Hehl, Andreas Heinz, Juergen Mayer H, Nassim Mehran, Sissel Tolaas, Henrik Walter, Ute Weiland, and Joerg Stollmann. Neurourbanism: towards a new discipline. *The Lancet Psychiatry*, 4(3):183–185, March 2017. ISSN 2215-0366. doi: 10.1016/s2215-0366(16)30371-6. URL [http://dx.doi.org/10.1016/S2215-0366\(16\)30371-6](http://dx.doi.org/10.1016/S2215-0366(16)30371-6).
- [4] Yi Wang, W.Y. Szeto, Ke Han, and Terry L. Friesz. Dynamic traffic assignment: A review of the methodological advances for environmentally sustainable road transportation applications. *Transportation Research Part B: Methodological*, 111:370–394, May 2018. ISSN 0191-2615. doi: 10.1016/j.trb.2018.03.011. URL <http://dx.doi.org/10.1016/j.trb.2018.03.011>.
- [5] Daqing Li, Bowen Fu, Yunpeng Wang, Guangquan Lu, Yehiel Berezin, H. Eugene Stanley, and Shlomo Havlin. Percolation transition in dynamical traffic network with evolving critical bottlenecks. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 112(3):669–672, December 2014. ISSN 1091-6490. doi: 10.1073/pnas.1419185112. URL <http://dx.doi.org/10.1073/pnas.1419185112>.
- [6] Guanwen Zeng, Daqing Li, Shengmin Guo, Liang Gao, Ziyu Gao, H. Eugene Stanley, and Shlomo Havlin. Switch between critical percolation modes in city traffic dynamics. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 116(1):23–28, December 2018. ISSN 1091-6490. doi: 10.1073/pnas.1801545116. URL <http://dx.doi.org/10.1073/pnas.1801545116>.
- [7] Lukas Ambühl, Monica Menendez, and Marta C. González. Understanding congestion propagation by combining percolation theory with the macroscopic fundamental diagram. *Communications Physics*, 6(1), February 2023. ISSN 2399-3650. doi: 10.1038/s42005-023-01144-w. URL <http://dx.doi.org/10.1038/s42005-023-01144-w>.

- [8] Edwin N. Lightfoot R. Byron Bird, Warren E. Stewart. *Transport Phenomena*. Wiley, 2 edition, 2001. ISBN 0471410772; 9780471410775.
- [9] Hyejin Youn, Michael T. Gastner, and Hawoong Jeong. Price of anarchy in transportation networks: Efficiency and optimality control. *Physical Review Letters*, 101(12), September 2008. ISSN 1079-7114. doi: 10.1103/physrevlett.101.128701. URL <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevLett.101.128701>.
- [10] Robert B. Dial. A path-based user-equilibrium traffic assignment algorithm that obviates path storage and enumeration. *Transportation Research Part B: Methodological*, 40(10):917–936, December 2006. ISSN 0191-2615. doi: 10.1016/j.trb.2006.02.008. URL <http://dx.doi.org/10.1016/j.trb.2006.02.008>.
- [11] Filippo Simini, Marta C. González, Amos Maritan, and Albert-László Barabási. A universal model for mobility and migration patterns. *Nature*, 484(7392):96–100, February 2012. ISSN 1476-4687. doi: 10.1038/nature10856. URL <http://dx.doi.org/10.1038/nature10856>.
- [12] Larry J. LeBlanc, Edward K. Morlok, and William P. Pierskalla. An efficient approach to solving the road network equilibrium traffic assignment problem. *Transportation Research*, 9(5):309–318, October 1975. ISSN 0041-1647. doi: 10.1016/0041-1647(75)90030-1. URL [http://dx.doi.org/10.1016/0041-1647\(75\)90030-1](http://dx.doi.org/10.1016/0041-1647(75)90030-1).
- [13] Heinz Spiess. A gradient approach for the od matrix adjustment problem. *Universite de Montreal*, 1:2, 1990.
- [14] Mark Turnquist and Yehuda Gur. *Estimation of trip tables from observed link volumes*. Number 730. 1979.
- [15] Heinz Spiess. A maximum likelihood model for estimating origin-destination matrices. *Transportation Research Part B: Methodological*, 21(5):395–412, 1987.