

**UNIVERSIDADE NOVE DE JULHO – UNINOVE  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE  
PRODUÇÃO**

**YURI PEREZ**

**SIMULAÇÃO DE INTERRUPÇÕES DE SEMÁFOROS EM SISTEMAS DE  
TRANSPORTE COM O USO DA TEORIA DE REDES COMPLEXAS**

**São Paulo  
2021**

**YURI PEREZ**

**SIMULAÇÃO DE INTERRUPÇÃO DE SEMÁFOROS EM SISTEMAS DE  
TRANSPORTE COM O USO DA TEORIA DE REDES COMPLEXAS**

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Nove de Julho - UNINOVE, como requisito parcial para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia de Produção

Prof. orientador: **Dr. Fabio Henrique Pereira**

**São Paulo  
2021**

**PARECER DA COMISSÃO EXAMINADORA DE DEFESA DE DISSERTAÇÃO**

**DE**

Yuri Perez

Título da Dissertação: Simulação de Interrupções de Semáforos em Sistemas de Transporte com o uso da Teoria de Redes Complexas.

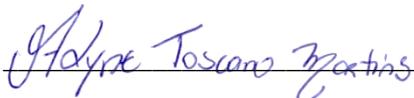
A Comissão examinadora, composta pelos professores abaixo, considera o(a) candidato(a) Yuri Perez **APROVADO**.

São Paulo, 12 de agosto de 2021.

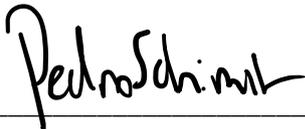
Prof(a). Dr(a).Fabio Henrique Pereira (UNINOVE / PPGE) – Orientador



Prof(a). Dr(a).Alyne Toscano Martins (UFTM /Federal do Triângulo Mineiro) – Membro Externo



Prof(a). Dr(a).Pedro Henrique Triguís Schimit (UNINOVE / PPGI) – Membro Externo



Perez, Yuri.

Simulação de interrupções de semáforos em sistemas de transporte com o uso da teoria de redes complexas. / Yuri Perez. 2021.

78 f.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Nove de Julho - UNINOVE, São Paulo, 2021.

Orientador (a): Prof. Dr. Fabio Henrique Pereira.

1. Redes complexas. 2. Resiliência. 3. Transporte. 4. Semáforo.
- I. Pereira, Fabio Henrique. II. Título

## RESUMO

As redes de transporte são infraestruturas críticas para o bem-estar da sociedade, principalmente em grandes centros urbanos e comerciais. Nestes centros, as redes de ruas e avenidas possibilitam o transporte de pessoas e produtos e a realização de serviços essenciais da área de saúde, segurança pública, comércio, lazer, entre outros. Os sistemas de transporte podem ser considerados sistemas complexos compostos por uma grande variedade de agentes e estruturas interagindo localmente e gerando padrões globais, como por exemplo o desenvolvimento econômico de uma área urbana. O uso de semáforos, placas, sinais, e outros dispositivos de controle de fluxo inteligentes integrados à tecnologia da informação tem se tornado cada vez mais comuns. No entanto, estes dispositivos não são infalíveis, e possuem vulnerabilidades a ataques cibernéticos ou falhas como perda de conectividade ou panes elétricas, o que afeta a robustez de todo o sistema de transporte. O impacto disruptivo de falhas e ataques está relacionado à forma como os sistemas de transporte estão estruturados. A teoria de redes complexas fornece ferramentas importantes para a análise de redundância e robustez de sistemas complexos, como o sistema de transporte. Considerando que a relação entre falhas nas interseções semaforizadas e a estrutura de sistemas de transporte urbano não foi frequentemente abordada na literatura, esta dissertação busca, com o auxílio da teoria de redes complexas, avaliar o impacto da limitação de fluxo em interseções semaforizadas, usando dados sobre a estrutura de redes urbanas reais, e simulando a viagem de agentes em três tipos de cenários disruptivos. A análise foi aplicada em pedaços das redes de São Francisco, São Paulo e Paris. Buscou-se avaliar não apenas impactos sobre os sistemas de transporte, mas também os impactos ocorridos nos padrões de viagem dos agentes. Entre os resultados obtidos, observa-se que sistemas com maior conectividade podem ser mais intensamente afetados por danos em suas interseções semaforizadas, e que a partir de uma certa fração de elementos afetados, os agentes ficam indiferentes entre alterar o trajeto para escapar das interseções afetadas ou usar o mesmo trajeto que utilizariam em condições normais.

**Palavras-Chave:** redes complexas, robustez, transporte, semáforo

## ABSTRACT

Transport networks are critical infrastructures for the well-being of society, especially in large urban and commercial centers. In these centers, the networks of streets and avenues enable the transport of people and products and the realization of essential services in the area of health, public safety, commerce, leisure, among others. Transport systems can be considered complex systems composed of a wide variety of agents and structures interacting locally and generating global standards, such as the economic development of an urban area. The use of traffic lights, signs, signals, and other intelligent flow control devices integrated with information technology has become increasingly common. However, these devices are not foolproof, and have vulnerabilities to cyber-attacks or failures such as loss of connectivity or electrical breakdowns. The disruptive impact of failures and attacks on these devices is related to how transport systems are structured. Complex network theory provides important tools for redundancy analysis and robustness of complex systems such as the transport system. Considering that the relationship between failures in signalized intersections and the structure of urban transport systems was not frequently addressed in the literature, this dissertation seeks, with the aid of complex network theory, to evaluate the impact of flow limitation on signalized intersections, using data on the structure of real urban networks, and simulating the travel of agents in three types of disruptive scenarios. The analysis was applied to pieces of the networks of San Francisco, São Paulo and Paris. The aim is to evaluate not only impacts on transportation systems, but also the impacts that occurred on agents' travel patterns. Among the results obtained, it is observed that systems with greater connectivity can be more intensely affected by damage to their signalized intersections, and that from a certain fraction of affected elements, agents are indifferent between changing the path to escape the affected intersections or using the same path they would use under normal conditions.

**Keywords:** complex network, robustness, transportation, traffic lights

## AGRADECIMENTOS

Agradeço sinceramente à minha mãe pela amizade e pelo amor incondicionais, por cada exemplo de independência e liberdade que dela recebi, por me ensinar a encarar os desafios da vida com humor e me reerguer mais forte depois de um eventual fracasso. Nunca deixo de admirar a resiliência, coragem, alegria e curiosidade dessa mulher. Um espírito livre.

Quero agradecer sinceramente a todos os professores que tive desde a infância. Cada professor deixou uma lembrança e um exemplo que eu procuro guardar e me lembrar em momentos difíceis.

Agradeço ao meu orientador Fabio Henrique Pereira pela dedicação, paciência e generosidade em cada etapa do desenvolvimento do trabalho.

Agradeço ao professor Pedro Henrique Triguís Schimit pela disponibilidade em conversar sobre temas referentes à dissertação e pontuar aspectos interessantes com base nos seus conhecimentos.

Agradeço aos meus colegas de PPGEP Murillo, Thays e Gloria pelo companheirismo nessa jornada.

Agradeço ao meu amigo João Paulo, que mesmo tão longe fisicamente me ofereceu incentivos e palavras sinceras de amizade e que há mais de uma década me permite ser parte da vida dele, algo pelo qual sou grato.

Agradeço ao meu amigo Heitor pelo companheirismo, pelos conselhos, pela paciência e pelos incentivos. Por me ajudar a pensar de forma concreta e objetiva quando eu perdia o foco. Por se fazer presente sempre que dele precisei.

Agradeço ao meu amigo Thiago Hitigo pela amizade constante, fantástica e inspiradora, pela gentileza e pela disponibilidade em ensaiar comigo para as apresentações. Por ser sempre um grande exemplo de superação e de empatia.

Agradeço à UNINOVE pela oferta de um ambiente saudável e estimulante para desenvolver meu trabalho.

Agradeço à CAPES pela bolsa de pesquisa concedida.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - As sete pontes de Königsberg como arestas em um grafo.....	22
Figura 2 - Equivalência entre grafo (à direita) e matriz de adjacência (à esquerda). Os elementos da matriz de adjacência apresentam valor 1 se há uma conexão entre dois nós e 0, caso contrário.....	23
Figura 3 - Comparação entre distância euclidiana e caminho mínimo. A linha tracejada representa a distância euclidiana entre dois pontos, e a linha sólida representa o caminho mínimo (obtido com o uso da ferramenta computacional OSMNx), conforme item c.....	24
Figura 4 - Duas redes com 30 nós cada. Quanto mais escura a cor, maior o grau do nó.....	28
Figura 5 – Representação da rede de transporte em forma de grafo para as três cidades escolhidas.....	39
Figura 6 - Fluxograma : Etapas da simulação.....	44
Figura 7 - Histogramas das distribuições de grau de cada rede.....	47
Figura 8 - Delay total para as combinações de cenário de cada cidade.....	52
Figura 9 - Congestionamento médio (C) observado em São Francisco, São Paulo e Paris. As barras de erro representam intervalo de confiança a 5% de significância.....	54
Figura 10 - Tempo médio de viagem (TMV) e razão de tempos de viagem (RTV) para diferentes valores de $\sigma$ .....	57
Figura 11 - Distância média percorrida (DMC) e Circuidade média (CM) para diferentes valores de $\sigma$ .....	58
Figura 12 - Mudanças do perfil de escolha dos agentes para diferentes valores de $\sigma$ . As linhas laranjas indicam a porcentagem dos agentes que adotaram rotas alternativas. As linhas azuis indicam a porcentagem de agentes que mantiveram as rotas originais.....	60
Figura 13 - Efeitos da variação de $\gamma$ (com N fixo em 50000) e N (com $\gamma$ fixo em 0.1) para escolha dos agentes e circuidade média (CM).....	62
Figura 14 - Volume de artigos publicados por ano com os termos “complex” e “transportation networks”.....	75
Figura 15 - Rede de termos mais citados na pesquisa pelo termo "redes complexas" no Scopus.....	76
Figura 16 - Rede de coautoria: Tamanho dos nomes dos autores é função do volume de citações que receberam.....	77

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Relação entre principais trabalhos relacionados e contribuições acerca do estudo de redes de transporte urbano.....	19
Tabela 2 - Medidas de robustez e redundância em redes complexas.....	34
Tabela 3 - Parâmetros fornecidos à função <code>graph_from_address</code> para obtenção das redes utilizadas no trabalho.....	38
Tabela 4 - Relação entre tipo de via e capacidade de fluxo. Baseado em Zilske et al. (2011).....	40
Tabela 5 - Descrição e contexto das métricas de eficiências.....	41
Tabela 6 - Descrição dos experimentos realizados.....	46
Tabela 7 - Propriedades estruturais e topológicas das redes de transporte.....	48
Tabela 8 - Propriedades dos subgrafos de interseções semaforizadas.....	49
Tabela 9 - Atratividade por rotas com maior capacidade.....	53
Tabela 10 - Intervalos de confiança para as variáveis de saída da simulação.....	78

## SUMÁRIO

<b>1.</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>12</b>
1.1.	PROBLEMA DE PESQUISA .....	13
1.2.	OBJETIVOS GERAIS .....	14
1.3.	OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	14
1.4.	TRABALHOS RELACIONADOS.....	14
1.5.	CONTRIBUIÇÃO .....	19
<b>2.</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....</b>	<b>21</b>
2.1.	CONCEITOS BÁSICOS .....	21
2.2.	REDES COMPLEXAS .....	26
2.3.	MODELAGEM E SIMULAÇÃO DE PROCESSOS EM REDES URBANAS DE TRANSPORTE .....	28
2.4.	CARACTERIZAÇÃO DE REDES DE TRANSPORTE .....	31
2.6.	CENÁRIOS DE DANO EM REDES DE TRANSPORTE .....	32
2.7.	MODELAGEM BASEADA EM AGENTES .....	34
<b>3.</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>	<b>36</b>
3.1.	CARACTERIZAÇÃO METODOLÓGICA DA PESQUISA .....	36
3.2.	OBTENÇÃO DOS DADOS DAS REDES DE TRANSPORTE.....	37
3.3.	ANÁLISE DAS REDES DE TRANSPORTE .....	41
3.4.	CENÁRIOS DISRUPTIVOS.....	42
3.5.	SIMULAÇÃO DE VIAGENS .....	42
3.6.	PLANEJAMENTO DOS EXPERIMENTOS .....	45
<b>4.</b>	<b>RESULTADOS.....</b>	<b>47</b>
4.1.	ANÁLISE DE EFICIÊNCIA .....	47
4.2.	ANÁLISE DOS ELEMENTOS VULNERÁVEIS.....	49
4.3.	RESULTADOS DA SIMULAÇÃO .....	50
<b>5.</b>	<b>DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....</b>	<b>51</b>
5.1.	DELAY TOTAL .....	51
5.2.	CONGESTIONAMENTO .....	53
5.3.	CARACTERÍSTICAS DAS VIAGENS DOS AGENTES.....	55
5.4.	EFEITOS DA VARIAÇÃO DE $\gamma$ E $N$ .....	61
<b>6.</b>	<b>CONCLUSÕES.....</b>	<b>63</b>

<b>7.</b>	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>66</b>
<b>8.</b>	<b>APÊNDICES .....</b>	<b>75</b>
8.1.	APÊNDICE A: INFORMAÇÕES BIBLIOMÉTRICAS .....	75
8.2.	APÊNDICE B: INTERVALOS DE CONFIANÇA PARA RESULTADOS DA SIMULAÇÃO .....	78

## 1. INTRODUÇÃO

A prática de modelar as características de sistemas urbanos e ocupação do solo despertava curiosidade antes mesmo da Revolução Industrial. Economistas como David Ricardo e Thomas Malthus abordaram, respectivamente, a divisão da terra por funções e o crescimento populacional (HUNT e LAUTZENHEISER, 2005).

Portugali (2006) explica que cidades podem ser representadas pelos fluxos de materiais e de energia e pela dimensão comportamental dos cidadãos. Quando a estrutura material (prédios, casas, ruas, parques, energia) emerge da ação das pessoas, elas passam a ter seus comportamentos ativamente modificados pela interação que fazem com a estrutura que elas próprias construíram (seleção de local de moradia, de abertura de comércios). A estrutura que elas desenvolveram deixa de ser uma construção e passa a ser um ampliador de novas. Essas ações modificam a estrutura da cidade, e o processo recomeça. Exemplos desses processos são a formação de favelas e as dinâmicas que contrapõem centros e periferias. As cidades podem ser consideradas sistemas complexos (BETTENCOURT, 2015).

As cidades apresentam diversas redes entrelaçadas por onde fluem energia, pessoas e informação, e uma das mais importantes redes encontradas em cidades é a rede de transporte. A forma pela qual as ruas de uma cidade estão conectadas tem impacto significativo em todos os processos urbanos (BATTY, 2013). A teoria de redes complexas oferece maneiras de se representar e estudar sistemas complexos estruturados em forma de rede assim como os sistemas de transporte.

A rede de transporte pode ser considerada um sistema de infraestrutura crítica. Segundo o anexo do Decreto Nº 9.573, de 22 de novembro de 2018, o governo brasileiro considera infraestrutura crítica toda instalação, serviço ou sistema cuja interrupção ou destruição parcial ou total acarreta sério impacto ambiental, social, econômico ou político. Conforme a cidade cresce e surge uma heterogeneidade maior nas distribuições de empregos, serviços públicos e eventos há uma necessidade maior de deslocamento, realizado por meio da rede de transporte.

As infraestruturas críticas, portanto, precisam apresentar resiliência, uma característica de sistemas capazes de restabelecer seu funcionamento quando sofrem interrupções ou falhas e amortecer o dano causado (GAO; BARZEL; BARABÁSI, 2016). O impacto de um distúrbio na rede de transporte pode ser facilmente sentido pelos usuários e, por mais diferentes que eles sejam uns dos outros, todos sofrem com a interrupção dos serviços de uma infraestrutura crítica. Redes de transporte garantem a mobilidade, rotas de fuga em situações de emergência, e acesso a todas as outras

redes de infraestrutura existentes, como a rede de assistência à saúde e as redes de energia elétrica (LIU e SONG, 2020).

Sistema complexo pode ser definido como um sistema composto de um grande conjunto de elementos cuja dinâmica emerge da interação de seus elementos, e não de um mecanismo de coordenação central (LADYMAN et al., 2013). Entre os comportamentos observados em sistemas complexos estão a presença da formação espontânea de padrões discerníveis formadas pela interação dos componentes, chamada de auto-organização. Exemplos para a formação espontânea de padrões são os processos de extinção em massa, a propagação de memes, e a formação de filas de trânsito.

Dentro do sistema de transporte, o papel do agente é fundamental para a dinâmica observada. O motorista que se desloca, o pedestre, o semáforo, a rua, o estacionamento e qualquer elemento com função e reatividade pode ser considerado um agente. A interação constante entre agente e estrutura pode ser abordada a partir da modelagem de sistemas multiagentes. Modelos de agentes são compostos de unidades com comportamentos de diferentes níveis de complexidade, que podem interagir com o ambiente e uns com os outros por regras bem definidas (MACAU e NORTH, 2005). Segundo Helbing e Balmelli (2012), a modelagem baseada em agentes é adequada para simular sistemas complexos. Os autores ainda citam exemplos bastante pertinentes correlatos aos fluxos de trânsito, como filas, gargalos ou acidentes.

A investigação do comportamento do agente em cenários disruptivos, quando no contexto de redes de transporte é um tópico ativo de pesquisa, mas há lacunas importantes a serem exploradas, como por exemplo o impacto da falha de semáforos sobre a rede e a capacidade de adaptação dos agentes às falhas. Pela perspectiva da teoria de redes complexas, o estudo da organização do sistema a nível global ou a nível local pode fornecer métricas importantes sobre a vulnerabilidade de um sistema de transporte. Em resumo, analisar o papel do comportamento dos agentes diante de diferentes topologias pode auxiliar na gestão dos riscos envolvidos na operação de infraestruturas críticas.

## **1.1. PROBLEMA DE PESQUISA**

Como se pode observar no cotidiano das cidades, as redes de transporte enfrentam processos complexos que restringem suas capacidades de operação, como congestionamentos e enchentes. Recentemente, dispositivos controlados por tecnologia da informação, como painéis, placas e semáforos inteligentes começaram a ser utilizados com mais frequência. Mas estes dispositivos não são totalmente à prova de falhas mecânicas, eletrônicas ou de segurança, podendo inclusive

sofrer ataques cibernéticos ou contaminação por malwares (SAKIZ e SEN, 2017). Considerando que a acessibilidade de dados de rede de transporte está cada vez maior devido ao uso de tecnologias de geolocalização, e que a teoria de redes complexas fornece diversas ferramentas para analisar a vulnerabilidade de redes de transporte, busca-se neste trabalho responder às seguintes questões de pesquisa:

- Considerando a ocorrência de um distúrbio aleatório ou sistemático em uma rede de transporte, como as propriedades de mobilidade da rede se alteram?
- Como o uso da rede pelos usuários se altera em função do distúrbio?
- Como as respostas das perguntas anteriores variam em função da topologia da rede de transporte?

## **1.2. OBJETIVOS GERAIS**

O objetivo geral é mensurar o impacto de cenários disruptivos que incidem sobre a mobilidade urbana, investigando especificamente a influência da resiliência das redes de transporte no comportamento de agentes.

## **1.3. OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

Construir representações em forma de grafo de três redes urbanas, analisando suas propriedades básicas usando a teoria de redes complexas. As redes urbanas são São Francisco, São Paulo e Paris.

- Analisar as propriedades geográficas, de conectividade e de resiliência.
- Simular o processo de falha aleatória e ataque direcionado aos elementos da rede, mas restringindo-o às interseções semaforizadas.
- Analisar a variação de atrasos provocada pelo processo disruptivo.
- Analisar as variações de comprimento de percurso e de tempo de espera dos agentes.
- Investigar as similaridades e diferenças obtidas em função das topologias das redes.

## **1.4. TRABALHOS RELACIONADOS**

Esta seção revisa trabalhos cujos temas estão relacionados ao que foi desenvolvido nesta dissertação. Os estudos são descritos de forma sucinta. Quando possível, as lacunas de pesquisa serão evidenciadas.

Segundo Boccara (2010), redes complexas são sistemas de elementos interagentes que apresentam uma estrutura irregular e dinâmica, podendo evoluir no tempo e no espaço a partir de uma diversidade de mecanismos. A abordagem baseada em redes complexas possui alta aplicabilidade na modelagem de processos dinâmicos. Redes complexas podem ser utilizadas para modelar processos difusivos, como epidemias e congestionamentos (ZENG et al., 2019; FENG et al., 2017; DING et al., 2019). Em sistemas de comportamento periódico, pode-se estudar os processos de sincronia dos períodos dos elementos da rede quando eles interagem entre si por meio das ligações que possuem uns com os outros (RODRIGUES et al., 2016).

Os modelos clássicos de redes complexas podem se aproximar eficientemente de redes reais. As redes mundo pequeno, por exemplo, modelam situações em que os elementos estão a uma distância relativamente pequena uns dos outros, apesar de pertencerem a sistemas de grandes dimensões. As características das redes mundo pequeno podem ser encontradas em sistemas de transporte, conforme constatado em Dong et al. (2020) e Sienkiewicz e Hołyst (2005).

Redes de transporte têm profunda relevância para o bom funcionamento da sociedade e são limitadas por restrições espaciais, políticas e geográficas. Essas restrições são mais facilmente observadas quando analisa-se a distribuição de conectividade local das redes de transporte. Strano et al. (2013) realiza um estudo comparativo de dez cidades europeias, e encontra nelas resultados semelhantes aos de Boeing (2020), que analisou as características de redes de transporte de cidades dos Estados Unidos. Segundo esses estudos, as redes urbanas, em média, apresentam distribuição de conectividade local com média em torno de valores baixos. Cada cruzamento tem, em média, de 3 a 5 vias, enquanto o comprimento das vias apresenta elevada variabilidade.

As redes de transporte sofrem modificação ao longo do tempo de uma forma bem mais lenta do que outros exemplos de redes complexas, como redes sinápticas, ou a Internet. Elas tendem a crescer e se modificar ao longo de muitos séculos e de forma desigual. Os padrões de crescimento de uma rede de transporte podem ser observados a partir da variação do número de elementos, além da forma como eles estão ligados uns aos outros, como em Saberi et al. (2018) que estudou modificações causadas no volume de tráfego causadas pelo aumento do uso de bicicletas. Os padrões mais comuns de crescimento, observados em um contexto geral, foram analisados, por exemplo, em Albert e Barabási (2002), Dorogovtsev e Mendes (2002) e Fajgelbaum e Schaal (2020). É comum que ao simular esses padrões, busque-se monitorar variáveis relacionadas à conectividade

entre os elementos a fim de tentar estimar sob quais condições a rede sofre modificações qualitativas na sua estrutura, como em Bitner et al. (2009) que avalia as mudanças na distribuição espacial da ocupação do solo em cidades a partir da teoria de redes complexas para investigar a formação de centros urbanos.

Os processos de fluxo em redes de transporte podem ser simulados a partir de vários mecanismos. Os modelos de alocação de trânsito em redes de transporte reais, por exemplo, foram estudados por Ben-Akiva et al. (2012) e Merchan et al. (2020). O mecanismo de passeio aleatório é analisado em Blanchard e Volchenkov (2008), Valdeolivas et al. (2019), Akbarzadeh, Reihani e Samani (2019). Zeng e Li (2018) analisaram um modelo de congestionamento baseado em um modelo epidemiológico de propagação de doenças, considerando que os processos de congestionamento em um ponto se espalham e contaminam os pontos vizinhos. Os processos associados ao tráfego em redes também podem ser abordados a partir da teoria de jogos em redes complexas. Klein e Ben-Elia (2016) usaram teoria dos jogos para avaliar o impacto de tecnologias da informação no alívio de congestionamentos e na cooperação entre usuários de estradas.

O problema de avaliar a resiliência de redes de transporte usando a teoria de redes complexas foi geralmente abordado usando a teoria da percolação, como em Ganin et al. (2017) que exploraram a resiliência das redes de transporte de cidades norte-americanas, simulando interrupções genéricas. Os conceitos de resiliência e percolação são explorados nas seções 2.6 e 2.7 deste trabalho. Embora a afirmação de que a redundância e a disponibilidade de rotas sejam fundamentais para reduzir o impacto de eventos disruptivos graves, o estudo não fornece uma análise aprofundada das diferenças topológicas e estruturais entre as redes de transporte de cada cidade, assumindo que essas diferenças são capturadas por uma medida global.

A simulação de processos dinâmicos em redes complexas é frequentemente utilizada para avaliar a resiliência do sistema diante de eventos disruptivos (GAO et al., 2013), confiabilidade e otimização de design ou operação (ELLEUCH et al., 2020). A resiliência, confiabilidade, robustez, etc., são termos usados pela teoria de redes complexas quase que como sinônimos em alguns trabalhos, mas há autores que os diferenciam. Hu e Verma (2011) entendem resiliência como a variação da mobilidade ou fluxo no interior da rede quando da ocorrência de falhas de seus elementos. Já Zhou e Wang (2018) a associam com a variação da eficiência, uma propriedade global da rede que se relaciona à média dos caminhos mais curtos entre cada ponto.

A resiliência de redes de transporte foi explorada usando diversas técnicas, e em diversos contextos. Sharifi (2019) analisa como a resiliência das redes urbanas foi explorada na literatura, apontando que interrupções tecnológicas, ataques e terrorismo são aspectos de redes de transporte complexas que precisam ser mais exploradas em pesquisas futuras. Mohseni-Kabir et al. (2020) estuda as características de resiliência dos subgrafos que se formam em processos de percolação a partir de algumas métricas de conectividade baseadas no número de caminhos disjuntos (que indicam redundância e robustez de uma rede de transporte). A maneira pela qual se faz esse tipo de controle é relacionada aos mecanismos de falha e ataque.

Crucitti et al. (2004) estudaram uma variação deste modelo de falhas em cascata em uma rede similar à de energia elétrica dos Estados Unidos. Mostraram que mesmo a falha de um único elemento pode levar a uma cascata que destruirá todo o sistema. Uma análise da vulnerabilidade de redes em que as arestas são valoradas é realizada em Wang e Chen (2008).

Ghanbari et al. (2018) estudaram como diversas medidas de classificação da importância de nós se relacionam com a profundidade da falha em cascata, e encontraram que, para várias estruturas, nós de alto grau, ao serem removidos, atuam como fusíveis, impedindo a propagação de falhas. Já os nós com alta centralidade de intermediação ao serem removidos geram a sobrecarga de outros elementos, aprofundando a severidade da cascata.

Jia et al. (2020) construíram um modelo de falha em cascata baseado em dados coletados em um pequeno pedaço da rede de transporte de Changchun. Qian et al. (2015) usou a abordagem dual para simular processos de falha em redes de transporte, usando a centralidade de intermediação como medida de importância para os elementos da rede. Gao et al. (2016) buscaram padrões universais de resiliência em redes complexas quando da ocorrência de falhas em cascata. Heide et al. (2008) estudaram o efeito de falhas em cascata quando a sobrecarga dos nós da rede são dados aleatoriamente por uma distribuição de Poisson.

Ganin et al. (2019) estudaram a resiliência de redes de transporte contra a interrupção do funcionamento de semáforos, sugerindo como possíveis melhorias para o estudo a especificação de locais de semáforos, número de faixas em cada borda, limites de velocidade e informações adicionais sobre segmentos rodoviários. Ou seja, sugere que os dados utilizados tenham maior granularidade, maior nível de detalhes. Isso pode exigir, entre outras coisas, mais recursos computacionais.

Casali e Heinemann (2020) avaliaram a resiliência da malha rodoviária de Zurique abstraindo da rede de transporte a sua estrutura de grafo. Os processos de interrupção foram baseados na teoria da percolação. O tempo de viagem e o congestionamento não foram incorporados às análises dos elementos dos grafos. As diferenças específicas entre tipos de estradas e ruas não foram incorporadas à análise de resiliência, o que poderia trazer informações valiosas, uma vez que diferentes tipos de estradas fornecem diferentes capacidades de fluxo e suas perdas, portanto, teriam diferentes implicações para o sistema e para os usuários.

Sohouenou et al. (2020) estudaram as diferenças na robustez de múltiplas estruturas de redes de transporte simulando falhas aleatórias e ataques direcionados as arestas. Embora a remoção de arestas seja intuitivamente fácil de compreender no contexto de redes de transporte (por exemplo, o bloqueio de uma via por uma enchente ou por um acidente de trânsito), o estudo não considerou a possibilidade de falhas parciais, o que pode ser mais realista em alguns casos. As falhas, neste estudo, também não eram direcionadas de forma específica a elementos da engenharia de tráfego, como pontes, semáforos e etc.

Estudos que avaliam a acessibilidade ou a robustez de redes de transporte nem sempre simulam a interrupção de serviços. Merchan et al. (2020) avaliaram o papel da estrutura de rede sobre as características das viagens curtas utilizando a variável circuidade como medida de eficiência do transporte. Verificou-se que medidas de centralidade apresentam correlação significativa com a circuidade. O conceito de centralidade é melhor explorado na seção 2.1. Os autores do estudo não consideraram o impacto de falhas ou congestionamentos na distribuição das medidas de centralidade ou da circuidade. Boeing (2019) usou a simulação de viagens com origem e destino aleatórios como forma de descobrir se há uma diferença significativa na circuidade de redes usadas para deslocamento a pé e deslocamento motorizado (ônibus, carro, motocicleta e afins). Uma oportunidade encontrada de ampliar os estudos iniciados neste trabalho é avaliar redes que estão fora dos EUA, ou seja, que se desenvolveram sob outros regimes econômicos e outras expectativas de urbanismo.

Embora trabalhos anteriores usem análise de redes complexas para avaliar robustez ou eficiência, eles não realizaram uma análise aprofundada da robustez e vulnerabilidade das redes viárias (compostas por ruas e avenidas) em relação a interrupção de semáforos, nem realizaram uma análise do impacto no tempo de viagem dos usuários ou na seleção dos trajetos, considerando tanto as mudanças no tempo de viagem, no tempo de viagem e na escolha do caminho. As lacunas

abordadas neste estudo são: a análise do papel da estrutura da rede de rua contra interrupções de semáforos e a análise da escolha do caminho pelos agentes em cenários de interrupção do semáforo.

Na Tabela 1, estão organizados os trabalhos usados para delimitar as lacunas e os aspectos considerados por eles na análise de redes de transporte urbano.

Tabela 1 – Relação entre principais trabalhos relacionados e contribuições acerca do estudo de redes de transporte urbano.

<b>Trabalho</b>	<b>Robustez/ Resiliên- cia</b>	<b>Estudo da topolo- gia do sistema</b>	<b>Comporta- mento dos agentes</b>	<b>Interrupção de semá- foros em redes com- plexas</b>
Qian et al. (2015)	✓			
Gao et al. (2016)	✓			
Ganin et al. (2017)	✓	✓		
Ghanbari et al. (2018)	✓	✓		
Boeing (2019)		✓	✓	
Ganin et al. (2019)	✓	✓		✓
Casali e Heinemann (2020)	✓	✓		
Jia et al. (2020)	✓			
Merchan et al. (2020)		✓	✓	
Mohseni-Kabir et al. (2020)	✓	✓		
Sohouenou et al. (2020)	✓	✓		

É possível perceber que nenhum trabalho na Tabela 1 aborda todos os aspectos de forma conjunta, tal como pretende-se fazer neste trabalho.

## 1.5. CONTRIBUIÇÃO

As lacunas de pesquisa indicam que, ao representar sistemas de transporte com o uso da teoria de redes complexas, tende-se a simplificar aspectos importantes como a orientação e o peso dos elementos da rede, bem como a hierarquia de tipos de via em relação às suas capacidades de fluxo. Em tratando-se do fluxo de veículos, essas simplificações podem superestimar a conectividade do sistema.

Além disso, as informações obtidas por meio da análise topológica podem não ser suficientes para compreender os processos de mobilidade urbana, pois a reação dos agentes aos processos

disruptivos pode agravar ou amenizar os efeitos das falhas. Analisar o impacto de processos disruptivos em redes urbanas com características reais e avaliar, de forma conjunta, variáveis concernentes aos agentes e à rede torna-se necessário. Além disso, a literatura apresenta poucos estudos relacionados às falhas de elementos tecnológicos em redes de transporte, como semáforos, sensores, pontes ou túneis. Sabe-se, ainda, que as características das viagens individuais podem apresentar resultados que as propriedades globais ou estruturais não capturam.

Nesse contexto, essa dissertação contribui ao apresentar um modelo de simulação computacional de seleção de trajetos em cenários disruptivos direcionados aos semáforos, utilizando a teoria de redes complexas para analisar a resiliência dos sistemas de transporte.

## 2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo são definidos e revisados os conceitos básicos, características de modelagem e simulação de processos de mobilidade em redes complexas, algumas propriedades especiais características de redes espaciais, métodos e medidas normalmente empregados na análise de resiliência de redes complexas, cenários típicos de dano em redes de transporte e conceitos de modelagem baseada em agentes.

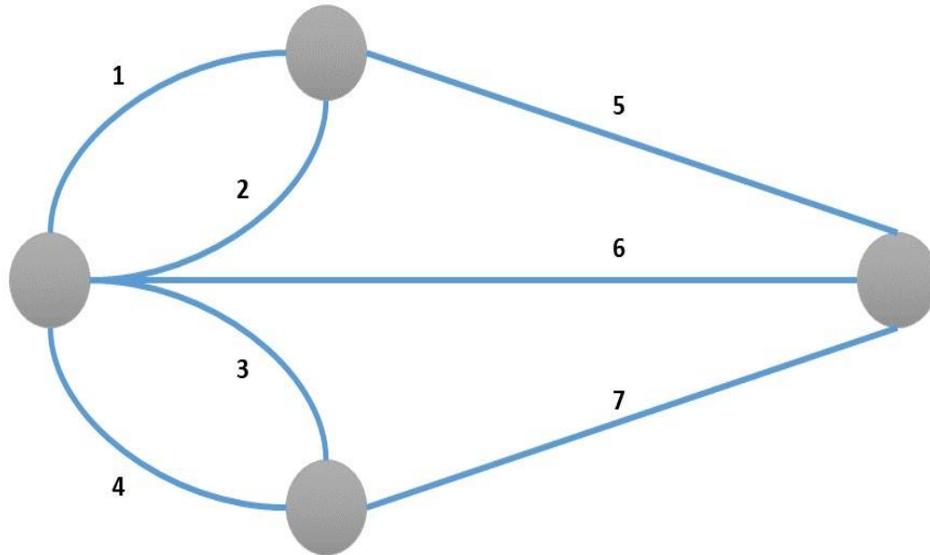
### 2.1. CONCEITOS BÁSICOS

Um grafo é um objeto matemático que descreve um conjunto de elementos ligados entre si. Segundo Barrat et al. (2008) um grafo é definido por um par de conjuntos  $G = (V, E)$ , em que  $V$  é um conjunto de elementos denominado nós ou vértices e  $E$  é um conjunto de pares chamados arcos ou arestas. Se os pares do conjunto  $E$  forem não ordenados, o grafo é dito não direcionado. Caso contrário, o grafo é direcionado. Se uma aresta  $(i, j)$  ligar os nós  $i$  e  $j$ , estes nós são adjacentes ou vizinhos. A topologia de um grafo é a maneira pela qual os nós estão ligados entre si pelas arestas.

Um grafo também pode ser representado em forma de diagrama, a qual é muito útil para representar modelos físicos como, por exemplo, o problema clássico das pontes de Königsberg usado neste trabalho para ilustrar a aplicação de grafos na modelagem de problemas reais.

O problema das pontes de Königsberg é um problema clássico da teoria dos grafos estudado por Leonard Euler é conhecido hoje como “As pontes de Königsberg”. Neste problema, era preciso atravessar todas as pontes da cidade, passando apenas uma vez em cada uma. Euler descobriu que esse problema não tinha solução, e que isso se devia à forma como as pontes estavam posicionadas, ou seja, o arranjo das pontes. Uma ilustração das pontes de Königsberg daquela época e sua representação em forma de grafo aparecem na Figura 1. Os traços nomeados com letras minúsculas são as arestas, e os pontos nomeados com letras maiúsculas são os vértices.

Figura 1 - As sete pontes de Königsberg como arestas de um grafo.



Fonte: dos autores

A partir dos conceitos de nós e arestas é possível estudar uma série de outros conceitos também importantes para compreender as estruturas dos grafos. Alguns deles são explicados a seguir, com base nos textos introdutórios de Boccaletti et al. (2006) e Barrat et al. (2008):

- a. Grau: o grau de um nó de um grafo é o número de conexões que ele faz com outros nós. Caso o grafo seja direcionado, o grau de entrada de um nó é o número de conexões que vem de outros nós, o grau de saída é o número de conexões que saem desse nó até outros nós.
- b. Grau valorado: considerando que as arestas que chegam ao nó representam alguma grandeza, o grau valorado de um nó é a soma dos valores das arestas que se ligam ao nó. Em alguns trabalhos, o termo grau valorado é substituído por “força”.
- c. Caminho: um caminho entre dois nós  $i$  e  $j$  é uma sequência de nós não repetidos em que o primeiro nó é  $i$  e o último é  $j$ . O caminho mínimo é o menor caminho entre dois nós quaisquer. Considerando que há mais de um caminho entre os nós  $i$  e  $j$ , os caminhos serão disjuntos se os únicos nós iguais nos caminhos forem  $i$  e  $j$ , ou seja, o primeiro e o último nó. O caminho mínimo topológico é aquele caminho cuja sequência de nós é a menor possível. O caminho mínimo valorado é aquele caminho cuja soma dos valores das arestas que ligam uma sequência de nós é a menor possível.
- d. Menor caminho médio: é a média dos valores dos menores caminhos, dada pela equação (1)

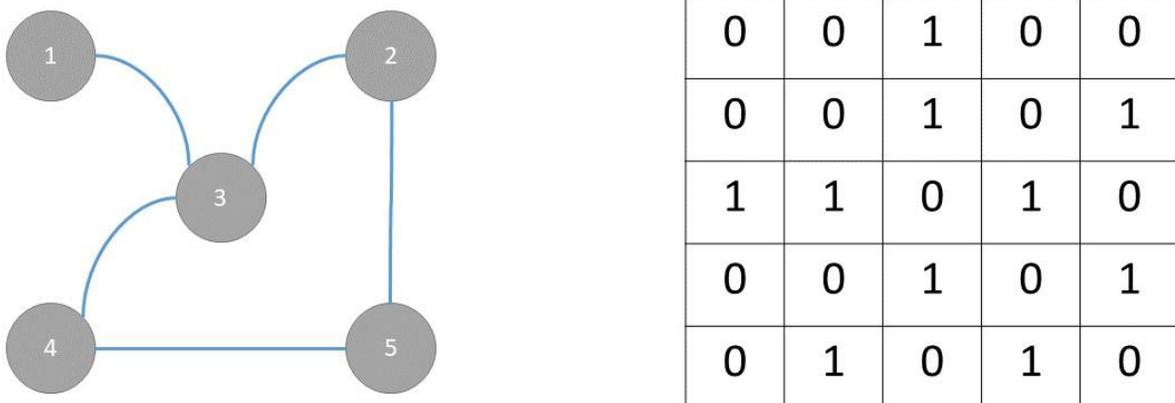
$$l_G = \frac{1}{N(N-1)} \sum_{i \neq j} d_{ij} \quad (1)$$

em que  $N$  é o número de nós e  $d_{ij}$  é a distância entre os nós  $i$  e  $j$ . Caso não haja caminho entre  $i$  e  $j$ , o valor de  $d$  tende ao infinito, o que pode tornar a medida incalculável. Para sanar essa dificuldade, existe a medida denominada eficiência  $E$ , dada pela equação (2).

$$E(G) = \frac{1}{N(N-1)} \sum_{i \neq j \in G} \frac{1}{d_{ij}} \quad (2)$$

- e. Adjacência: as relações de adjacência podem ser representadas como uma matriz, denominada matriz de adjacência. Quando há uma aresta entre dois nós  $i$  e  $j$ , o elemento  $(i,j)$  da matriz será 1. As arestas podem ser valoradas, indicando algo sobre a natureza da relação. Se as arestas são valoradas, o elemento  $(i,j)$  da matriz será igual ao valor da aresta, caso contrário será 0. É possível obter da matriz de adjacência uma série de propriedades importantes. Os conceitos de grafo e matriz de adjacência são ilustrados na Figura 2.

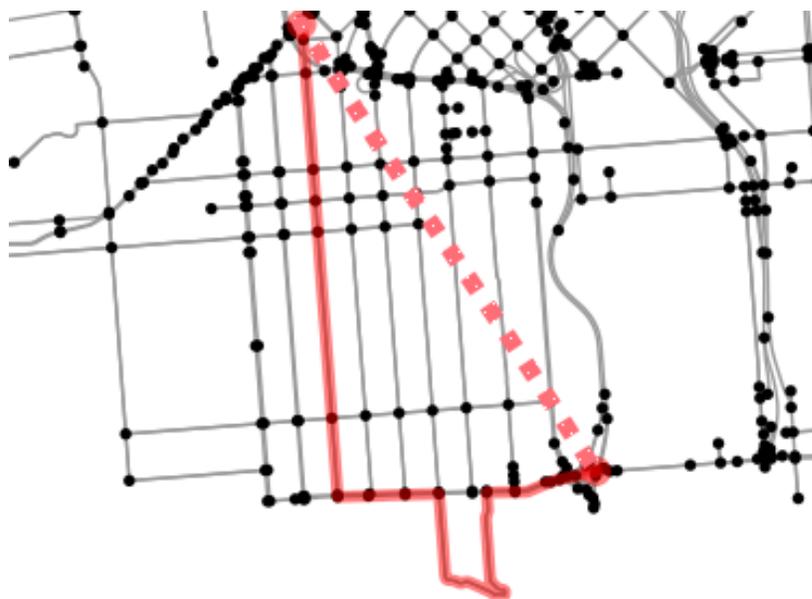
Figura 2: Equivalência entre grafo (à direita) e matriz de adjacência (à esquerda). Os elementos da matriz de adjacência apresentam valor 1 se há uma conexão entre dois nós e 0, caso contrário.



Fonte: dos autores.

- f. Conectividade e componente: o grafo  $G$  é dito conexo se há um caminho entre qualquer par de nós. Um componente conectado é um subgrafo (um subconjunto de  $G$ ) conectado. Para grafos direcionados, o fato de haver um caminho entre um nó e outro não garante que há um caminho inverso. Para esses casos, a conectividade pode ser “forte” (sempre haverá um caminho entre dois nós quaisquer) ou “fraca” (a versão não direcionada do grafo é conectada).
- g. Componente gigante: é um componente de um grafo  $G$  que possui tantos nós quanto  $G$  mas que não necessariamente terá a mesma quantidade de arestas.
- h. Coeficiente de aglomeração: é a razão entre o número de arranjos de nós ligados em estrutura triangular e o número total de estruturas triangulares possíveis em um grafo  $G$  com  $N$  nós.
- i. Circuidade: Em uma rede na qual as arestas são valoradas com valores de comprimento, a circuidade de um trajeto entre os pontos  $i$  e  $j$  representa a razão entre a distância do caminho mínimo valorado sobre a distância euclidiana, ou seja, a distância de uma linha reta traçada entre os pontos  $i$  e  $j$ . Na Figura 3 é possível observar um exemplo da propriedade em um grafo usado para representar uma pequena parte das ruas da cidade de São Francisco.

Figura 3 - Comparação entre distância euclidiana e caminho mínimo. A linha tracejada representa a distância euclidiana entre dois pontos, e a linha sólida representa o caminho mínimo (obtido com o uso da ferramenta computacional OSMNx), conforme item c.



j. Medidas de Centralidade: A centralidade ajuda a classificar os nós de acordo com algum critério e podem ser aplicadas como uma medida de importância desses elementos em relação ao resto da rede. As quatro medidas de centralidade que costumam servir de base para todas as outras são:

- I. Centralidade de grau: estabelece a importância dos nós de acordo com o número de conexões que ele possui. É considerada a medida mais simples, além de ser computacionalmente rápida de se obter em sistemas de grande dimensão.
- II. Centralidade de intermediação: estabelece a importância dos nós de acordo com o número de rotas mínimas de um ponto até outro que passam por esses nós. Pode-se dizer que a partir da centralidade de intermediação surgiu uma família de medidas de centralidade que de uma forma ou de outra consideram a natureza das rotas mínimas para definir a importância de um elemento. Em redes de fluxo de dados, a centralidade de intermediação é eficaz na avaliação dos pontos de congestionamento (ZHAO et al., 2005). Em redes urbanas, várias modificações já foram sugeridas para tornar a centralidade de intermediação um preditor mais apurado do volume de tráfego (GAO et al., 2013; KIRKLEY et al., 2018). Para calcular o valor da centralidade de intermediação de um elemento é utilizada a equação (3), em que  $\sigma_{jk}(i)$  é a quantidade de caminhos mínimos que vão de  $j$  até  $k$  e passam por  $i$ , e  $\sigma_{jk}$  é a totalidade de caminhos mínimos que vão de  $j$  até  $k$ .

$$C_{intermediação}(i) = \sum_{i \neq j \neq k} \frac{\sigma_{jk}(i)}{\sigma_{jk}} \quad (3)$$

- III. Centralidade de proximidade: indica o quão próximo um elemento  $i$  está dos demais com base na soma da distância  $d$  do caminho mais curto entre esse elemento e todos os outros. Para calcular a centralidade de proximidade utiliza-se a equação (4).

$$C_{proximidade}(i) = \frac{1}{\sum_{j \neq i}^N d_{ij}} \quad (4)$$

Há propriedades algébricas importantes obtidas pela análise dos autovetores das matrizes de adjacência (JAMAKOVIC e UHLIG, 2007). No entanto, o uso dessas propriedades possui uma desvantagem significativa no estudo de sistemas de transporte pelo fato de exigirem que o grafo analisado seja não-direcionado.

Todos os conceitos definidos nesta seção podem ser aplicados em qualquer tipo de grafo. As redes complexas são grafos com propriedades e origens específicas. A seção seguinte explica quais as principais características de uma rede complexa.

## 2.2. REDES COMPLEXAS

Segundo Barrat et al. (2008) uma rede é todo sistema que admite uma representação em forma de grafo. Mas para que seja adjetivada como rede complexa, é preciso que o sistema que ela representa surja a partir da lógica presente na interação de seus elementos, de forma espontânea. Ou seja, ao contrário de um avião, composto de diversos elementos conectados a partir de um projeto cuidadosamente planejado, uma rede complexa não estabelece suas conexões a partir de um plano geral. O Facebook, por exemplo, é uma rede social onde pessoas (os nós), formam amizades (arestas) de acordo com a decisão individual de cada usuário, possuindo, portanto, as características de uma rede complexa.

A teoria de sistemas complexos encontrou nas redes complexas um esquema teórico geral para analisar formação de padrões e relacionamentos em estruturas que não podem ser compreendidas pela análise isolada de seus componentes. Une-se então métodos matemáticos da física estatística, o formalismo da teoria dos grafos e a teoria de sistemas complexos.

Além dos exemplos já mencionados, Albert e Barabási (2002) reúne diversos exemplos adicionais, além de ressaltar quais as características estruturais mais frequentes observadas em redes complexas. A análise de redes complexas também se estende para os processos dinâmicos que ocorrem em seus interiores.

As redes livres de escala são redes cuja distribuição estatística de graus dos seus nós segue uma lei de potência. A probabilidade  $p$  de um nó ter grau  $k$  em uma rede livre de escala pode ser expressa pela equação (5).

$$p(k) = k^{-\gamma} \quad (5)$$

em que  $\gamma$  é uma constante.

Segundo Broido e Clauset (2019) a classificação de uma rede como livre de escala apresenta algumas dificuldades, já que as condições para classificar uma rede sem escala não são consensuais. Para eles, uma condição forte para a classificação de uma estrutura como livre de escala é que  $\gamma$  deve ficar entre 2 e 3 e que as ligações surjam por meio do mecanismo de ligação preferencial.

A ligação preferencial é um mecanismo pelo qual um elemento é selecionado para realizar ligações com uma probabilidade proporcional ao número de conexões que já possui. Broido e Clauset (2019) dizem que apenas a ligação preferencial não vai necessariamente gerar uma distribuição de lei de potência. Outro detalhe importante é que a lei de potência pode não estar presente em toda a rede, apenas em uma determinada fração dela. Isso causa uma complicação adicional na definição do que seria uma rede sem escala. De qualquer maneira, a presença de leis de potência em redes complexas já foi verificada em sistemas socioeconômicos (GUALDI e MANDEL, 2016) e biológicos (RAJULA; MAURI; FANOS, 2018).

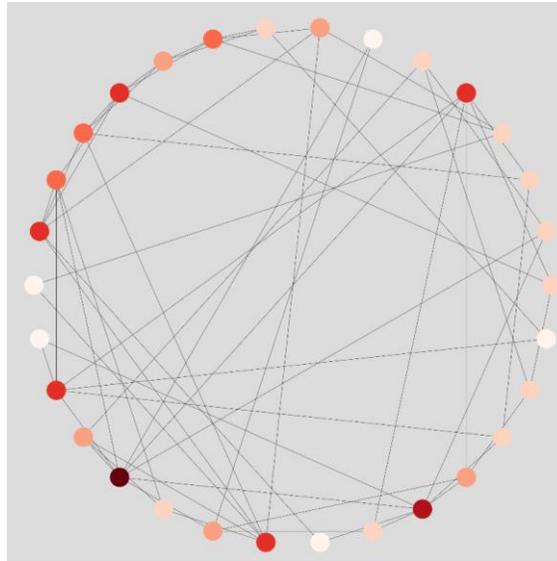
Redes livres de escala são paradoxais no que diz respeito à resiliência. São frágeis e robustas ao mesmo tempo. Em alguns contextos, redes sem escala, justamente por possuírem pontos de altíssima conectividade, são vulneráveis a ataques direcionados. Falhas que ocorrem aleatoriamente e que não dependem da natureza do elemento da rede tendem a ser menos severas, já que a maioria desses elementos tem conectividade muito reduzida. Esse resultado é analisado e discutido por Albert, Jeong e Barabási (2000).

As redes mundo pequeno são redes caracterizadas por apresentarem um coeficiente de aglomeração alto e um comprimento de caminho médio baixo em relação a outras topologias.

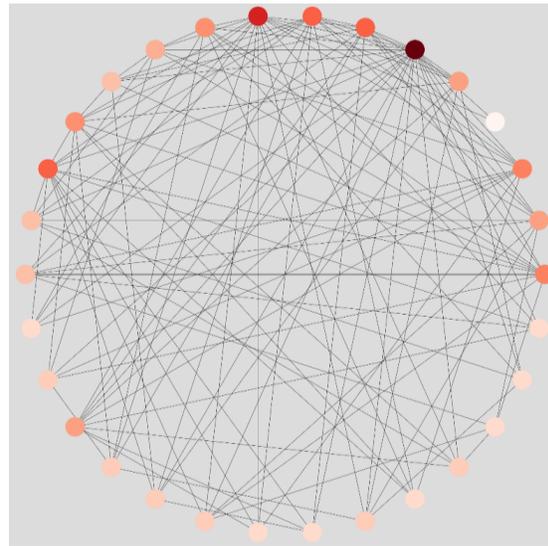
Um mecanismo comum a partir do qual se pode obter redes mundo pequeno é substituindo uma ligação regular por uma ligação aleatória em um grafo regular, como por exemplo um grafo em forma de anel. O conceito de rede mundo pequeno e o mecanismo de geração desse tipo de rede foram originalmente propostos por Watts e Strogatz (1998).

Exemplos de rede mundo pequeno e rede livre de escala são apresentados na Figura 4.

Figura 4 - Duas redes com 30 nós cada. Quanto mais escura a cor, maior o grau do nó a) Rede mundo pequeno b) Rede livre de escala.



a)



b)

Fonte: dos autores.

### 2.3. MODELAGEM E SIMULAÇÃO DE PROCESSOS EM REDES URBANAS DE TRANSPORTE

Há diferentes formas de modelar redes urbanas de transporte, modificando o significado dos nós e arestas da rede complexa a depender do fenômeno que está sendo modelado e para atender a uma necessidade específica.

Nesse sentido, redes de transporte urbano podem ser representadas de forma primal ou de forma dual. Segundo Porta et al. (2006):

- Representação primal: os nós são interseções entre segmentos. Arestas são as ruas e avenidas ligadas pelas interseções. A partir da representação primal é possível realizar a avaliação de múltiplas centralidades (*multiple centrality assessment* ou MCA) que busca associar a cada interseção uma geolocalização, tal que a distância métrica entre os elementos é incorporada à análise.
- Representação dual: O inverso da primal. Arestas são interseções, e nós são segmentos. Segundo Porta et al., (2006), é uma maneira eficaz de apreender a presença de distribuições estatísticas atípicas na configuração espacial das cidades. Ela é usada, principalmente, quando o estudo usa as técnicas da sintaxe espacial. Segundo Koohsari et al. (2019) a sintaxe espacial é um método para caracterizar ou quantificar espaços urbanos a partir de aspectos puramente topológicos. Considera-se, para estes casos, que o uso do espaço urbano é função da informação topológica e não de aspectos físicos ou geográficos. Também se diz que a representação dual tem relação com a representação cognitiva dos usuários que circulam pela rede.

Independentemente da representação utilizada, os segmentos e interseções podem armazenar uma série de propriedades importantes. Os segmentos podem ter uma direção específica, indicando por exemplo uma via de mão única ou dupla, o número de pistas, o nome do logradouro ao qual o segmento pertence, a largura, o comprimento, a velocidade máxima permitida, entre outros. Os segmentos nas redes de transporte possuem, sob a perspectiva da engenharia de transporte, uma função específica. Vias com diferentes funções possuem em geral diferentes comprimentos, capacidades de fluxo, número de acessos a transporte público, ou outras características necessárias ao modelo em questão.

Uma interseção pode representar uma rampa, um semáforo, um trevo, etc. Por exemplo, para definir a capacidade de fluxo de um segmento, é comum que se utilize ao menos três informações: a velocidade máxima permitida, o número de faixas e a função da via (rodovia, avenida, rampa, etc).

Wang et al. (2017) sugerem que a análise das redes urbanas deve considerar características como o número de pistas que cada segmento possui, a capacidade de fluxo por unidade de tempo,

a largura, etc. Incorporar essas informações enriqueceria a discussão sobre as similaridades e diferenças entre as redes em diferentes regiões.

Há diversos processos dinâmicos ocorrendo em sistemas de transporte, seja devido a ação descentralizada de agentes ou devido a mecanismos centrais de controle. A sincronização de semáforos é utilizada em sistemas de sinalização inteligente para melhorar a eficiência de fluxo e reduzir congestionamentos. Um modelo de sincronização de rede de transporte com múltiplos pesos foi estudado por An et al. (2014) e Al Khafafi e Jalili (2019), já a otimização da sincronizabilidade de tráfego em redes complexas de transporte (DONNER, 2009).

A dinâmica de mobilidade é um processo complexo, dependente da estrutura da rede, do comportamento do usuário e até mesmo das condições ambientais. A probabilidade de ocorrência de congestionamento quando processos disruptivos ocorrem em uma rede pode fornecer informações sobre o quão robusta a rede é quando determinadas vias são desativadas. Uma aproximação inicial para modelos de mobilidade parte do princípio de que os agentes buscam minimizar o tempo de viagem. Assim, é mais provável que o congestionamento aconteça em um nó que concentra um fração maior de todos os caminhos mais rápidos entre qualquer par de nós. A participação de um nó em caminhos mais rápidos pode ser representada pela centralidade de intermediação, abordada na seção 2.1. Barthelemy (2018) revisou importantes achados acerca da centralidade da intermediação, por exemplo, correlações positivas com: distribuição de lojas de varejo, volume de fluxo de tráfego, distribuição de densidade urbana e robustez. Assim, a dinâmica de mobilidade possui uma complexa interação com outros aspectos característicos dos sistemas urbanos.

Uma métrica comum aplicada na mensuração de congestionamentos é a razão volume capacidade, Scott et al. (2006) pontua que esta é uma métrica local que pode ser enriquecida com informações topológicas da rede de transporte.

A simulação também permite acoplar diversos processos dinâmicos de forma simultânea, gerando comportamentos ainda mais complexos. Por exemplo, a dinâmica de mobilidade pode ser acoplada à dinâmica de contágio por contato característica de modelos epidemiológicos, possibilitando estudar como padrões de mobilidade específicos afetam a propagação de doenças contagiosas (PU et al., 2016).

## 2.4. CARACTERIZAÇÃO DE REDES DE TRANSPORTE

As redes de transporte, que são o foco deste trabalho, possuem algumas características peculiares. Elas têm uma restrição de crescimento diretamente relacionada ao espaço tridimensional na qual são construídas além de restrições de ordem política, geográfica ou econômica que podem resultar em um grafo planar. Um grafo planar é aquele que pode ser representado por um modelo de duas dimensões, ou seja, é um grafo cujos elementos ocupam posições em um plano bidimensional. Em uma rede de ruas, isto significaria ausência de túneis subterrâneos ou viadutos. Como estes elementos não são raros na maioria das vezes, pode-se dizer que a planaridade é uma aproximação. Chan et al. (2011) consideram que a aproximação é adequada e que não há perda de informação ao assumir que as redes urbanas são planares, já Boeing (2020) sugere que talvez a hipótese de planaridade seja prejudicial para a avaliação de redes urbanas e que o impacto dessa simplificação precisa ser melhor analisado.

Maggi e Vallino (2016) avaliam que incorporar o comportamento dos agentes em modelos de mobilidade urbana pode apresentar vantagens importantes, já que abordagens bottom-up seriam apropriadas para entender o comportamento emergente de sistemas complexos tais como os sistemas de transporte. Embora sistemas possam ser analisados algebricamente ou qualitativamente, o uso de simulação computacional e análise estatística é mais comum para avaliar sistemas complexos heterogêneos. Exemplo que caracteriza a influência de aspectos sociopolíticos em sistemas de transporte pode ser encontrado em Junior e De Souza Vieira (2017) em que foi avaliada a criação de vagões exclusivos para mulheres em algumas cidades brasileiras. Devido à interação de fenômenos econômicos, sociais e ambientais, sistemas urbanos podem ser difíceis de administrar, já que mesmo uma pequena mudança pode gerar resultados imprevisíveis. (FORRESTER, 2016).

Segundo Wu, Gao, e Sun (2004), redes de trânsito possuem três características aparentemente comuns às redes livres de escala, como a presença de nós altamente conectados ou hubs, a existência do mecanismo de ligação preferencial, e valores elevados de coeficiente de aglomeração, que é uma medida que define o quão conectados entre si estão os elementos de uma rede em relação a um grafo completo, em que todos os nós possuem arestas entre si. Em muitos trabalhos, foram encontradas evidências de propriedades livres de escala em redes urbanas, conforme apontado por Benoit e Jabari (2019).

Lobsang et al. (2019) avaliam que a análise de redes de transporte como redes complexas fornece indicadores que ajudam a avaliar processos sociais e econômicos importantes na formação

da cidade. Crucitti et al. (2006) estudaram medidas de centralidade de diversas redes de ruas e avenidas, tecendo considerações sobre os processos históricos que as levaram a ter as estruturas que têm. Dividiram as cidades em duas classificações, aquelas que possuem um design planejado baseado em uma perspectiva racional e funcionalista de construção do espaço urbano e aquelas que possuem design auto organizado, formado pela interação das comunidades com o meio ambiente e com o governo ao longo da história e em que não havia as pressões de um planejamento central. Os autores sugerem que as medidas de centralidade evidenciam diferentes processos e níveis de urbanização.

As falhas em sistemas de transporte podem variar de congestionamentos pontuais a total inviabilização do fluxo por uma área significativa. Esse aspecto dos sistemas de transporte será discutido na próxima seção.

## **2.6. CENÁRIOS DE DANO EM REDES DE TRANSPORTE**

Os danos ocorridos em redes de transporte podem ser avaliados a luz da teoria de redes complexas por meio da análise topológica ou da simulação de falhas. Muitos modelos de análise de resiliência e tolerância a falhas baseiam-se na teoria da percolação, que por sua vez baseia-se na física estatística (CALLAWAY et al., 2000; LI et al., 2021). Utilizando os conceitos da teoria da percolação, define-se os nós de um grafo como possuindo dois possíveis estados: funcional e não funcional. A atribuição de estados dependerá de um processo estocástico, que, por sua vez, dependerá das propriedades do grafo.

A análise do que faz uma rede de infraestrutura percolar, ou transicionar de um estágio de integridade (degradação) para um estágio de degradação (integridade) permite obter informações acerca da resiliência dessa estrutura. Se, em uma rede complexa, os nós possuem dois estados possíveis, afetado e não-afetado, pode-se definir dois conjuntos e avaliar o subgrafo formado por cada conjunto. Se a maneira pela qual se faz um nó pertencer a cada conjunto pode ser controlada, pode-se analisar a partir de qual ponto um dos conjuntos passa a ser de um tamanho comparável ao da rede como um todo, ou seja, a partir de qual ponto surge o componente gigante (MOHSENI-KABIR et al., 2021).

Os mecanismos de falha e ataque podem ser definidos da seguinte maneira: quando não há qualquer tipo de padrão discernível ou critério para a ocorrência desses eventos, eles são chamados

de falhas, mas, se esses eventos ocorrem apenas em pontos da rede que apresentem propriedades específicas (grau elevado, por exemplo), chama-se os eventos de ataques (ALBERT et al., 2000).

Falhas e ataques podem forçar a rede a trabalhar com menos recursos, sobrecarregando o resto dos elementos. Isso pode amplificar o efeito do problema para outros elementos da rede, gerando uma propagação de falhas (MOTTER e LAI, 2002). Um exemplo básico de modelo de falha em cascata em um grafo não direcionado é apresentado em Crucitti et al. (2004). Em redes de transporte, panes de semáforos, acidentes e catástrofes naturais podem ser modelados a partir do uso de falhas e ataques ou a partir dos modelos de falhas em cascata.

Resiliência é a capacidade de um sistema de manter-se funcional quando sujeito a algum tipo de distúrbio. Wang et al. (2019) define quatro possíveis olhares para a resiliência: robustez, redundância, recursos e agilidade, descritas a seguir:

- Robustez se refere à invariância de uma propriedade quando o sistema sofre algum tipo de distúrbio. Um exemplo de robustez pode ser observado quando um conjunto de arestas são removidas, mas ainda há um caminho possível para qualquer par de nós escolhidos ao acaso.
- Redundância se refere à disponibilidade de elementos que substituem aquele que se danificou (presença de rotas alternativas em redes de transporte).
- Recurso é o tipo de propriedade que quando mobilizada pelos elementos da rede conseguem agir de forma contundente para solucionar um problema (capacidade de fluxo de veículos nos segmentos).
- Agilidade é o tempo que se leva para que o impacto dos distúrbios desapareça.

Sharifi (2019) menciona que, em relação ao estudo da resiliência de sistemas urbanos, o dano causado por ataques terroristas e por falhas tecnológicas (falta de energia, deterioração, ataques cibernéticos e etc.) são aspectos que precisam ser melhor avaliados pela literatura. Algumas das medidas de robustez e de redundância que serão utilizadas neste trabalho podem ser consultadas na Tabela 2.

Tabela 2 - Medidas de robustez e redundância em redes complexas.

Nome	Definição	Significado
Coeficiente de malhagem	$\alpha = \frac{E - N + 1}{2N - 5}$	Em que $E$ e $N$ são os números de arestas e nós, respectivamente. O índice é igual a 0 para uma árvore e igual a 1 para um grafo planar. Também é considerado um índice de redundância e diversidade de padrões de conexão, ou seja, um índice de complexidade estrutural. (CARDILLO et al., 2006; DI NARDO et al., 2017).
Conectividade média de nós	$\mu(\kappa) = \frac{\sum_{i,j} \kappa_G(i,j)}{\binom{p}{2}}$	Em que $\kappa_G(i,j)$ é o número mínimo de nós que precisam ser removidos para que não exista mais caminho entre os nós $i$ e $j$ e $p$ é o número de nós do grafo $G$ . (BEINEKE et al., 2002).
Centralidade de intermediação	$C_i = \sum_{i \neq j \neq k} \frac{\sigma_{jk}(i)}{\sigma_{jk}}$	Em que $\sigma_{jk}(i)$ é o número de caminhos mínimos de um nó $j$ até um nó $k$ que passam pelo nó $i$ e $\sigma_{jk}$ é o número total de caminhos mínimos entre $j$ e $k$ . Danos sobre nós com alto valor de centralidade de intermediação pode gerar a ruptura da rede em casos severos, ou a perda de eficiência em processos de transporte, já que os caminhos mínimos são redistribuídos (BARTHELEMY, 2018).

Fonte: dos autores

A resiliência pode ser afetada pela estrutura da rede complexa, pelos processos dinâmicos de seus componentes, ou ambos. Há uma série de propriedades em redes complexas utilizadas como medida de robustez e de redundância de uma forma geral. Já recurso e agilidade são propriedades mais específicas do fenômeno que está sendo modelado.

## 2.7. MODELAGEM BASEADA EM AGENTES

Macal e North (2010) afirmam que sistemas complexos se auto organizam a partir da interação de seus elementos. A modelagem baseada em agentes é uma forma de analisar processos nos quais a decisão individual dos elementos de um sistema complexo é relevante para a dinâmica global. Ou seja, processos cujas arquiteturas são bottom-up, e não top-down. Exemplos desse tipo de processo em redes urbanas são a formação de subúrbios, os congestionamentos e o desenvolvimento de centros comerciais.

É possível obter da literatura algum consenso em relação às características que um agente pode possuir, a saber (CROOKS e HEPPENSTALL, 2012):

- Autonomia: capacidade de tomar decisões;
- Heterogeneidade: os agentes possuem comportamentos diferentes uns dos outros;

- Proatividade: os agentes não precisam ter suas atitudes reguladas por algum tipo de módulo central;
- Reatividade: as características do ambiente modificam as decisões dos agentes;
- Mobilidade: agentes se deslocam pelo ambiente;
- Adaptação e aprendizado: os agentes podem, ao longo do tempo, modificar seus comportamentos de acordo com experiências anteriores ou de acordo com mudanças no ambiente em que eles estão.

A modelagem baseada em agentes pode ser utilizada para modelar a mobilidade urbana. Exemplos da literatura são os trabalhos de Naiem et al. (2010), Huynh et al. (2014), Levy e Ben-Elia (2016) e Barthélemy e Carletti, (2017). A estrutura da rede de transporte é fundamental para a performance dos agentes, tal que até mesmo modificações muito pequenas afastam um sistema em regime estacionário de tráfego de seu estado de equilíbrio (PAUL, 2015).

### 3. MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo são descritos os materiais e métodos adotados neste trabalho, o detalhamento de cada etapa dos processos de análise e simulação, bem como a descrição dos experimentos que foram realizados.

#### 3.1. CARACTERIZAÇÃO METODOLÓGICA DA PESQUISA

Esta pesquisa pode ser classificada como pesquisa quantitativa axiomática. Segundo Morabito e Pureza (2012), a pesquisa quantitativa axiomática aborda problemas idealizados em modelos quantitativos, produzindo conhecimento acerca das variáveis e de como manipulá-las de forma a obter comportamentos desejados do modelo.

A pesquisa quantitativa axiomática pode ser dividida em descritiva e normativa. A pesquisa quantitativa axiomática normativa busca propor ou estabelecer estratégias, ações ou rotinas com base em um modelo, enquanto a descritiva busca fundamentalmente analisar e explicar as características de um modelo (BERTRAND e FRANSOO, 2002). Morabito e Pureza (2012) dizem que a pesquisa quantitativa axiomática descritiva auxilia na compreensão de relacionamentos funcionais do ambiente que o modelo descreve.

A construção de um modelo envolve pelo menos duas etapas, sendo a primeira um modelo conceitual, ou uma descrição verbal em que apenas algumas das variáveis importantes no funcionamento do modelo são consideradas, e a segunda a construção de um modelo analítico (em que as funções matemáticas são expressas) ou experimental de simulação (relações lógicas ou algoritmos) a partir do modelo conceitual (MORABITO e PUREZA, 2012). Uma segunda classificação de modelos é a de modelos determinísticos, estocásticos e modelos de simulação. Segundo Morabito e Pureza (2012), os modelos de simulação podem ser divididos em discretos (mudanças ocorrem em pontos discretos no tempo) ou contínuo (mudanças cujo comportamento muda continuamente).

Neste trabalho, buscou-se realizar uma pesquisa quantitativa axiomática descritiva, efetuando a construção de um modelo de simulação discreto.

O método de análise do impacto de simulação de falhas em semáforos aplicado neste trabalho foi dividido em cinco etapas: 1) obtenção e coleta de dados das redes de transporte 2) definição das medidas de análise 3) análise dos modelos de redes complexas 4) simulação de viagens 5) análise dos resultados da simulação.

### 3.2.OBTENÇÃO DOS DADOS DAS REDES DE TRANSPORTE

A escolha das redes de São Francisco, São Paulo e Paris para o estudo é justificada pelas seguintes razões: São Francisco apresenta uma estrutura análoga a de uma malha regular, o que caracteriza um design planejado e traz um contraponto interessante à cidade de São Paulo. São Paulo apresenta baixa redundância em sua estrutura e há uma quantidade relativamente baixa de aplicações da teoria de redes complexas na rede de transporte urbano de São Paulo, apesar da importância econômica da cidade na América Latina. Paris e São Francisco possuem topologias semelhantes, mas a rede de Paris foi escolhida por ser uma rede com menor capacidade de fluxo, o que possibilita comparar o impacto do congestionamento mais facilmente.

Os dados geográficos foram obtidos da base de dados aberta OpenStreetMap (OSM). O OSM é uma base de dados geográficos contendo informações sobre a morfologia de milhares de cidades ao redor do globo. As informações geográficas sobre a posição dos cruzamentos e interseções semaforizadas, os tipos de vias de transporte, a localização de pontos de interesse social (como, por exemplo, escolas e hospitais), o uso do solo (residencial, industrial, etc.), a presença de pontos de ônibus e estações de metrô, e outras informações correlatas são destacadas no OSM com o uso de tags, que são anexadas em elementos geográficos (áreas, linhas ou pontos representados por conjuntos de coordenadas geográficas).

Os dados são baixados do servidor do OSM com o uso da ferramenta OSMNx, módulo disponível para a linguagem Python. O OSMNx é uma ferramenta que permite baixar os dados geográficos do OSM e convertê-los em estruturas de grafo. No processo de conversão, é automaticamente realizado um tratamento inicial de modo a eliminar possíveis redundâncias e impurezas nos dados da base, como a presença de elementos isolados do resto da rede, elementos duplicados ou elementos em que as tags estão preenchidas de modo dubio ou indevido. As redes obtidas vem no formato primal.

Para obter as redes de acordo com as necessidades deste trabalho, foi preciso utilizar a função *graph\_from\_address*. Esta opção permite controlar o tamanho da rede obtida em uma cidade específica. Os parâmetros fornecidos à função são dados na Tabela 3.

Com isso, foi possível obter os dados das redes de transporte em forma de multidígrafo e salvá-las em arquivos. Cada nó e aresta têm dígitos identificadores que possibilitam acessar suas

propriedades individuais facilmente. O OSMNx também permite ilustrar as redes obtidas, preservando as posições de latitude e longitude de cada elemento. A ilustração pode ser observada na Figura 5.

Tabela 3 - Parâmetros fornecidos à função *graph\_from\_address* para obtenção das redes utilizadas no trabalho.

Parâmetro	Descrição	Valor fornecido
address (cadeia de caracteres)	Nome da cidade, rua, ponto de referência, etc.	San Francisco - US, São Paulo - BR, Paris - France
dist (número real)	Retém os nós que estão a uma distância fixa do centroide correspondente à tag fornecida no endereço.	3500 metros
network_type (string)	Define o tipo de rede a ser baixado. Uma rede “drive” é usada por veículos. Uma rede “walk” é usada por pedestres. Para mais opções deve-se consultar a documentação do OSMNx.	drive
custom_filter (cadeia de caracteres)	Mantém na rede obtida apenas os elementos fornecidos no filtro.	["highway"~" motorway  motorway_link  trunk trunk_link  primary  primary_link  secondary  secondary_link  tertiary  tertiary_link  road  road_link  unclassified  unclassified_link"]'

Fonte: dos autores.

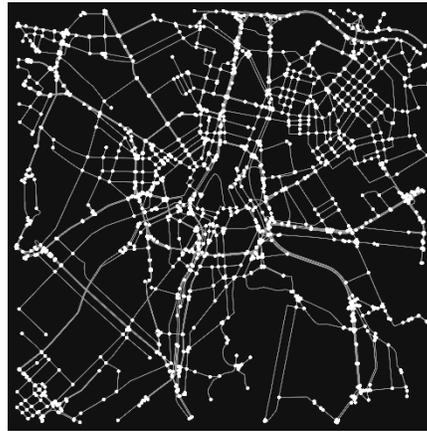
O OSMNx também permite destacar na rede quais nós são interseções semaforizadas, e esta funcionalidade será essencial para a simulação do processo disruptivo. Para realizar o destaque foi utilizada, conjuntamente, a ferramenta Networkx.

O Networkx é um módulo disponível na linguagem Python que permite manipular a estrutura de dados fornecida pelo OSMNx e analisá-la usando conceitos da teoria dos grafos e da teoria de redes complexas.

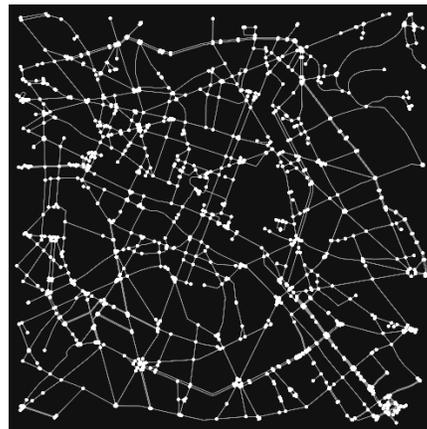
Figura 5 - Representação da rede de transporte em forma de grafo para as três cidades escolhidas.



a) São Francisco



b) São Paulo



c) Paris

Fonte: dos autores.

O Networkx permite aplicar algoritmos de otimização para a solução de problemas tradicionais, como o problema do fluxo máximo, o problema do caminho mínimo, o problema da árvore geradora mínima, entre outros.

Com o uso da opção *get\_node\_attributes*, e fornecendo o parâmetro “highway”, o Networkx converte os dados dos nós em uma estrutura de dicionário e permite saber em quais deles está presente a tag *traffic\_signal*.

O uso das tags correspondentes aos tipos de via e aos números de pistas das arestas da rede gerada pelo OSMNx foi necessário para definir a capacidade de fluxo de cada via. Utiliza-se o Networkx para converter os dados das arestas em uma estrutura de dicionário usando a função *get\_edge\_attributes* e fornecendo o parâmetro “highway” para os tipos de via e o parâmetro “lanes” para o número de pistas. A capacidade de fluxo é definida de acordo com o esquema proposto por Zilske et al. (2011) e pode ser consultado na Tabela 4.

Tabela 4 - Relação entre tipo de via e capacidade de fluxo. Baseado em Zilske et al. (2011)

<b>Tipo</b>	<b>Definição (OpenStreetMap)</b>	<b>Capacidade de fluxo (veículos por hora por pista)</b>
Auto-estrada	Via de acesso restrito, normalmente com duas ou mais pistas e um encostamento de emergência.	2200
Estrada principal	As mais importantes estradas de um país (depois das auto-estradas).	2000
Primária	Normalmente ligam grandes centros urbanos.	1000
Secundária	Ligam centros urbanos de grande densidade a centros residenciais.	1000
Terciária	Ligam bairros entre si.	900
Não-classificada	Ligam bairros a pequenos assentamentos e ocupações.	800

Fonte: dos autores.

Após obter a rede de transporte e a posição de cada interseção semaforizada e atribuir a capacidade de fluxo de cada via, resta atribuir à cada aresta os tempos de viagem e as velocidades máximas permitidas usando as funções *add\_edge\_speeds* e *add\_edge\_travel\_times* do OSMNx, que fará as atribuições utilizando as informações do OSM. Essas informações podem ser convertidas em dicionários posteriormente com o uso do Networkx e utilizadas na simulação.

Por fim, as redes são armazenadas em um arquivo para posterior reutilização usando a função *save\_graphml* do OSMNx.

### 3.3. ANÁLISE DAS REDES DE TRANSPORTE

Com o auxílio do módulo Networkx, um conjunto de medidas acerca da eficiência do sistema de transporte foi obtido, além de informações básicas como o número de nós e arestas.

Na Tabela 5, as medidas de eficiência são contextualizadas em relação a este trabalho. Para uma descrição mais formal das métricas, deve-se consultar a seção 2.1.

Tabela 5 - Descrição e contexto das métricas de eficiência

<b>Métrica</b>	<b>Descrição e contexto</b>
Grau médio	Medida de conectividade local. Indica a quantos nós, em média, um nó está ligado.
Circuidade	Medida de eficiência do sistema de transporte. Indica a média da razão entre a distância efetiva e a distância euclidiana entre dois pontos quaisquer da rede.
Coefficiente de malhagem	Medida de redundância do sistema de transporte. Quanto maior o coeficiente de malhagem, mais redundante é a estrutura da rede.
Número médio de caminhos disjuntos	Medida de redundância e de robustez. Quanto maior o valor desta métrica, mais caminhos alternativos existem entre dois pontos.
Capacidade de fluxo (veículos/hora)	Medida de robustez. Quanto maior a capacidade de fluxo, mais tráfego a rede pode suportar.

Fonte: dos autores.

A vulnerabilidade do sistema foi associada ao número de elementos vulneráveis disponíveis na rede de transporte, isto é, as interseções semaforizadas.

Foram obtidos os subgrafos induzidos formados por todas as interseções semaforizadas de cada rede com o uso do Networkx. As dimensões dos subgrafos foram comparadas com as dimensões das redes originais. Também foram calculados os números de componentes fracamente conectados dos subgrafos. O número de componentes fracamente conectados, quando avaliado em conjunto com o tamanho dos subgrafos, permite averiguar a coesão dos subgrafos dentro das redes originais, isto é, o quão próximo o maior componente fracamente conectado está de formar um componente gigante.

### 3.4. CENÁRIOS DISRUPTIVOS

Antes da simulação de viagens, um cenário disruptivo afeta uma fração das interseções semaforizadas que será chamada de  $\sigma$ , tal que a velocidade de circulação nas arestas de entrada fique reduzida à metade da velocidade máxima permitida. O Networkx permite discriminar as arestas de entrada com o uso da função `in_edges()` que toma como parâmetro o dígito identificador da interseção semaforizada.

A simulação testou três cenários de falha que podem ser distinguidos um do outro pela característica que foi usada para discriminar cada interseção.

- Cenário A: uma fração  $\sigma$  de interseções escolhidas aleatoriamente são afetadas. Falhas aleatórias podem representar panes por curto-circuito ou por falta de manutenção regular.
- Cenário B: As interseções são listadas em ordem decrescente de centralidade de intermediação e uma fração  $\sigma$  das interseções que estão no topo da lista são afetadas primeiro. Importante destacar que a centralidade de intermediação deve ter o tempo de viagem como peso para cada aresta. A centralidade de intermediação é uma propriedade importante em sistemas de transporte, apresentando correlações significativas com fluxo de tráfego, densidade urbana e distribuição de zonas comerciais (BARTHELEMY, 2018). A centralidade de intermediação também é frequentemente utilizada como critério em estratégias de ataque na literatura, por exemplo em Sun, Gollnick e Wandelt (2017).
- Cenário C: As interseções são listadas em ordem decrescente de grau valorado por comprimento e uma fração  $\sigma$  das interseções que estão no topo da lista são afetadas primeiro. Um exemplo de aplicação de ataque similar foi aplicado em Ganin et al. (2017).

A centralidade de intermediação e o grau valorado podem ser facilmente obtidos usando o Networkx.

### 3.5. SIMULAÇÃO DE VIAGENS

Antes do início da simulação, a rede é selecionada, o valor de  $\sigma$  e o tipo de cenário disruptivo são selecionados e cada aresta tem atribuída a si um volume de fluxo igual a 0.

São criados três dicionários com informações sobre tempos de viagem. O primeiro se refere aos tempos de viagem originais (fluxo nulo e ausência de cenários disruptivos), o segundo se refere

ao tempo efetivo (fluxo e cenário disruptivo presentes) e o terceiro ao tempo percebido pelos agentes, que no início da simulação de viagem são equivalentes aos tempos efetivos.

Cada agente é gerado com uma origem e destino aleatórios. O agente seleciona o trajeto mais rápido usando o algoritmo de Dijkstra, usando como peso o tempo percebido.

São gerados  $N$  agentes e para uma fração  $\gamma$  de agentes gerados, os tempos percebidos são atualizados e equiparados aos tempos efetivos. Este mecanismo possibilita investigar como diferentes níveis de adaptação às mudanças no ambiente afetam os resultados da simulação. O parâmetro  $\gamma$  representa, portanto, a taxa de atualização das informações dos agentes.

Quando  $\gamma = 1$ , ou seja, quando o tempo percebido pelos agentes não se modifica ao longo da simulação, este modelo apresenta resultados similares ao apresentado por Guimerà et al. (2002) em que as arestas pertencentes aos nós com maior centralidade de intermediação possuem maior volume de fluxo.

Após a simulação, as seguintes saídas são armazenadas:

- Delay Total: a diferença entre tempos de viagem efetivos e tempos de viagem originais em cada aresta.
- Congestionamento médio: a média das razões entre volume de fluxo e capacidade em cada aresta.
- Distância média percorrida (DMC): a média do comprimento dos trajetos escolhidos pelos agentes.
- Tempo médio de viagem (TMV): tempo (em horas) das viagens dos agentes.
- Circuitidade média (CM): a média das razões entre distância percorrida e distância euclidiana dos trajetos escolhidos pelos agentes.
- Média da razão de tempos de viagem (RTV): a média das razões entre tempo de viagem efetivo e tempo de viagem original dos trajetos selecionados pelos agentes.

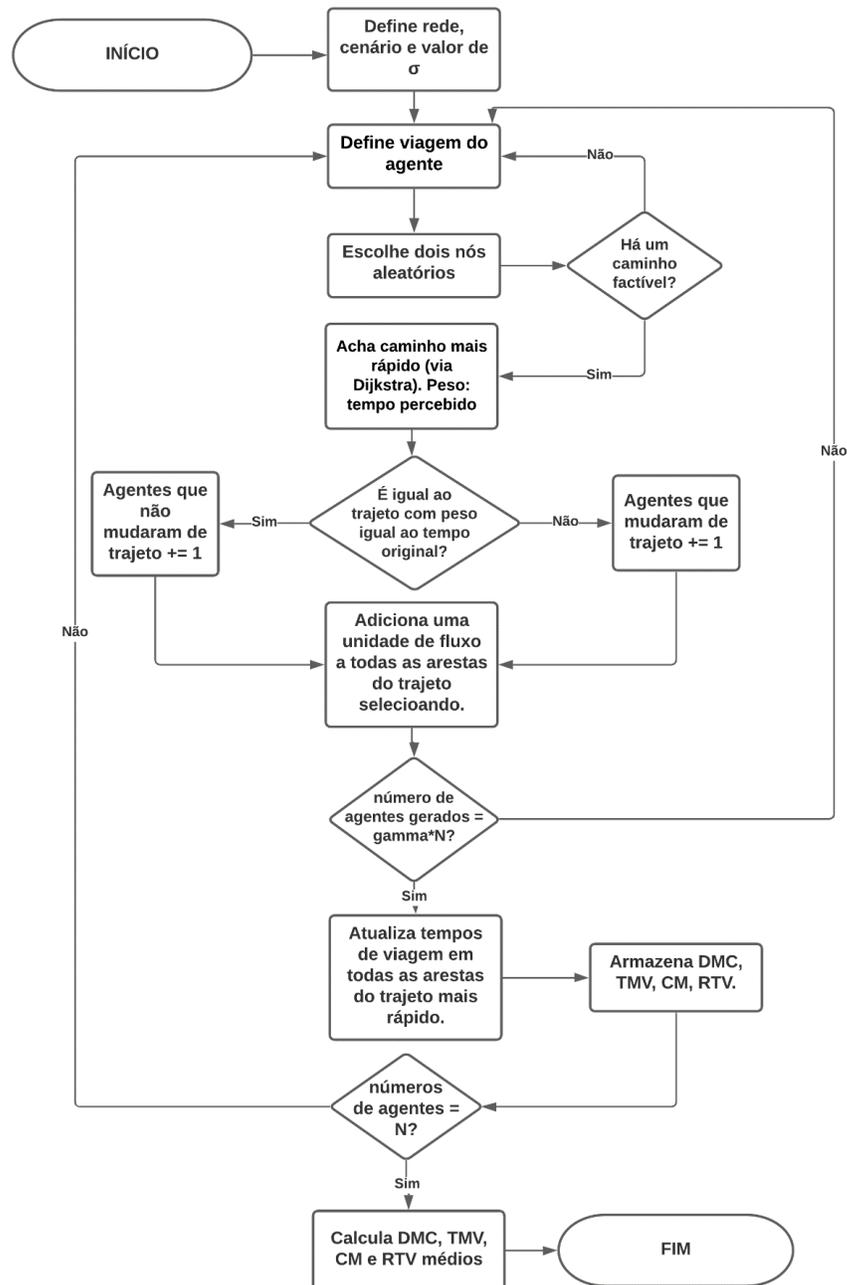
Não se busca neste trabalho reproduzir a distribuição ou volume de tráfego real das redes analisadas, mas sim investigar aspectos concernentes à estrutura e ao impacto de eventos disruptivos de forma controlada, tal que seja possível associar propriedades das redes à magnitude dos impactos observados nos cenários de falha. Uma abordagem semelhante pode ser encontrada em Boeing (2019).

O algoritmo de Dijkstra, usado para calcular os caminhos mais rápidos, é um algoritmo tradicionalmente aplicado para resolver o problema do caminho mais curto em um gráfico com

pesos. Mais detalhes sobre o algoritmo e suas formulações alternativas podem ser encontrados em Fan e Shi (2010) ou Zhang et al. (2016).

Para facilitar o entendimento dos processos descritos nesta seção, é apresentado um fluxograma na Figura 6.

Figura 6 - Fluxograma : Etapas da simulação.



O tempo de viagem nas arestas é função do comprimento da aresta, da velocidade máxima permitida, do volume de agentes que passam por ela e da capacidade de fluxo, e a função escolhida que permite incorporar estes elementos é a *bureau of public roads function*, ou *BPR Function*. Esta função foi selecionada devido ao fato de ser adotada na literatura com relativa frequência, portanto sendo mais familiar nos estudos envolvendo problemas de alocação de tráfego e dimensionamento de capacidade de vias de transporte. Para mais detalhes sobre o uso desta função na literatura, verificar Manzo (2013). A função BPR está apresentada na equação (6).

$$t(f, d, v) = \frac{d}{v} \left( 1 + \alpha \left( \frac{f}{c} \right)^\beta \right) \quad (6)$$

em que  $f$  é o número de veículos que passam por hora pelo segmento,  $c$  é a capacidade de fluxo permitida pelo segmento,  $d$  é o comprimento da aresta,  $v$  é a velocidade máxima permitida na aresta,  $\alpha$  e  $\beta$  são parâmetros. Os valores dos parâmetros  $\alpha$  e  $\beta$  foram fixados em 0,15 e 4 respectivamente, por serem valores frequentemente adotados na literatura (MTOI e MOSES, 2014).

### 3.6. PLANEJAMENTO DOS EXPERIMENTOS

Neste trabalho, três cidades foram usadas para simular o processo de falhas de semáforo. Em cada uma das três cidades, três cenários disruptivos foram aplicados. Em cada cenário,  $\sigma$  variou de 0 a 1 em intervalos de 0,10, totalizando 11 valores de  $\sigma$  testados. Para cada cidade existem portanto 33 combinações de cenário e valores de  $\sigma$ . Para os 33 cenários possíveis de cada cidade o mesmo conjunto de origens e destinos aleatoriamente escolhidos pelos agentes é mantido. Como existem três cidades, o total de combinações possíveis é 99. É importante salientar que o número de agentes e a taxa de atualização impactam diretamente no tempo de simulação, portanto, considerando a estabilidade dos padrões obtidos e a factibilidade do tempo computacional, chegou-se à conclusão de que os valores de  $N$  e  $\gamma$ , número de agentes e taxa de atualização das informações dos agentes, respectivamente, serão fixados em 50000 e 0,1, pois com estes valores é possível obter um volume considerável de replicações cuja informação é adequada ao propósito do trabalho. No entanto, as implicações da variação de ambos serão brevemente discutidas na seção 5.4.

Cada um dos 99 casos é repetido 20 vezes. A cada repetição, um novo conjunto de origens e destinos aleatórios é gerado para cada cidade. A Tabela 6 apresenta a descrição dos experimentos.

Tabela 6 - Descrição dos experimentos realizados

<b>Experimento</b>	<b>Descrição</b>	<b>Variação</b>
Variação da rede	Avalia como diferentes topologias de rede se comportam em diferentes cenários da simulação.	São Francisco, São Paulo e Paris.
Variação da fração da quantidade de interseções semaforizadas com falha	Avaliar os efeitos da falha de semáforo nas variáveis de saída da simulação.	A fração varia de 0 até 1 em intervalos de 0,1.
Variação de cenário de falha	Avaliar como as estratégias de ataque afetam o comportamento do modelo. A quantidade de arestas afetadas também será afetada pela escolha do cenário.	Cenários A, B e C (ver Seção 3.2.3).
Variação do tamanho de população de agentes	Avalia como o número de agentes impacta na população e no tempo de simulação. Será avaliado apenas para São Francisco.	Varia de 50000 a 200000 em intervalos de 50000.
Variação do parâmetro de ajuste dos tempos percebidos e efetivos.	Avalia como a diferença entre tempo percebido pelos agentes e o tempo efetivo de trajeto impacta nas variáveis de saída da simulação. Avaliado apenas para São Francisco.	Valores testados: 0,002, 0,1, 0,5.

Fonte: dos autores

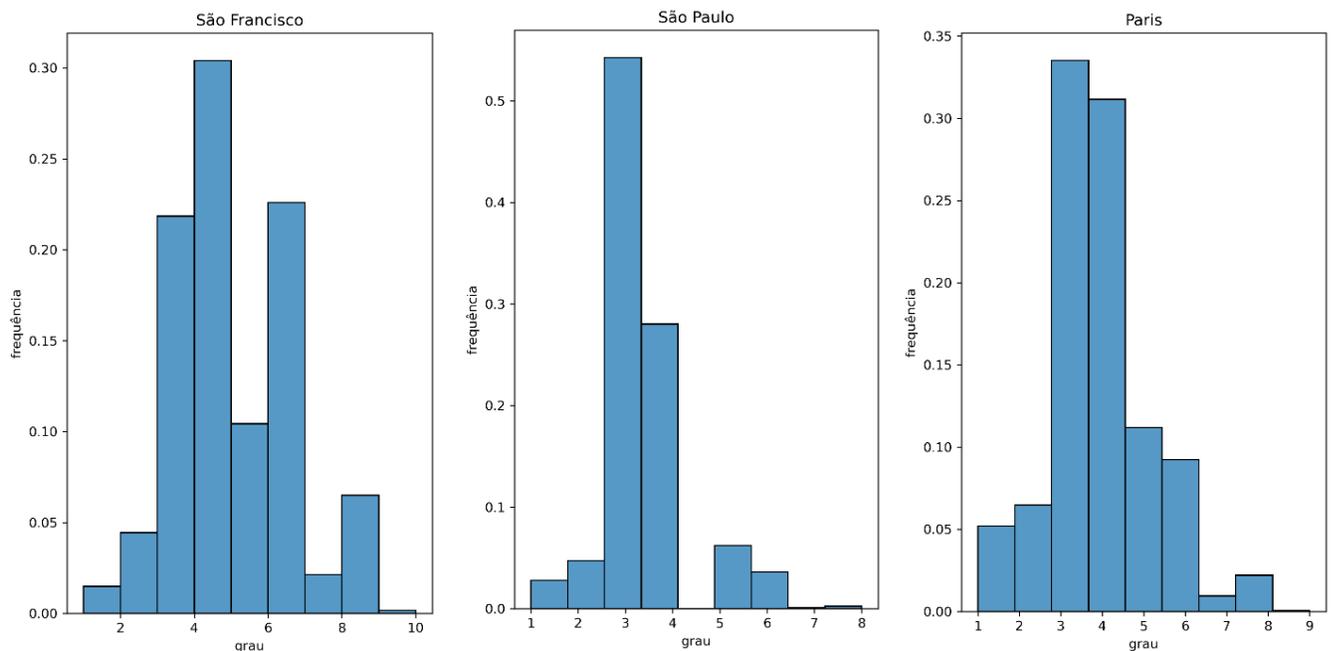
## 4. RESULTADOS

Nesta seção, são apresentados os resultados das análises de eficiência e de vulnerabilidade, bem como o resultado da simulação de viagens em cenários disruptivos.

### 4.1. ANÁLISE DE EFICIÊNCIA

Pode-se observar que São Francisco possui uma maior conectividade local média do que São Paulo e Paris, característica capturada pelo grau médio. Para complementar esta informação, a Figura 7 traz a distribuição de grau de cada rede, onde é possível observar que todas as redes têm médias próximas a 4, mas São Francisco possui maior abundância relativa de elementos com grau superior a este valor, sendo que o grau máximo observado na rede é 10, o maior grau máximo entre as três. Mais de 50% dos nós em São Paulo possui grau 3 e a cidade possui o menor grau médio máximo. Mais de 60% dos nós em Paris possui grau 3 ou 4. O grau pode ser considerado uma medida de conectividade local. Neste quesito, São Francisco é a rede com maior conectividade.

Figura 7 - Histogramas das distribuições de grau de cada rede.



Fonte: dos autores.

A circuidade é uma medida de eficiência da estrutura da rede de transporte. Segundo Boeing (2019) a circuidade é a média da razão entre a distância entre dois pontos em uma rede de transporte

e a distância euclidiana, que é a menor distância possível (uma reta). A circuidade também está relacionada ao nível de carga cognitiva sofrida pelos usuários ao utilizar a rede, já que trajetos retilíneos exigem menos atenção e habilidade dos usuários. A presença de curvaturas é, portanto, um sinal de ineficiência, segundo o critério da circuidade. Os valores de circuidade são menores em Paris e maiores em São Paulo.

O coeficiente de malhagem e o número médio de caminhos disjuntos são medidas de redundância. Conforme explicado na seção 2.7, um coeficiente de malhagem igual a 0 indica um grafo do tipo árvore, e caso seja igual a 1 indica um grafo maximal planar. A rede de São Paulo apresenta um valor de 0,36, o que é considerado um valor comparável ao da maioria das grandes metrópoles (COURTAT et al., 2011). São Francisco apresenta o maior valor entre as redes. O valor do número médio de caminhos disjuntos é maior em São Francisco, indicando que a rede possui maior redundância e robustez, enquanto São Paulo possui o menor valor. São Francisco, portanto, possui a rede mais redundante.

A capacidade média de veículos por hora é a média das capacidades de cada aresta, calculadas conforme Tabela 4. A rede de São Paulo possui maior capacidade média, enquanto Paris possui pouco mais de 50% da capacidade das outras duas redes, sendo, portanto, a rede com menor capacidade média e, logo, estando mais sujeita à congestionamentos.

A Tabela 7 apresenta cada uma das propriedades métricas e topológicas calculadas.

Tabela 7 - Propriedades estruturais e topológicas das redes de transporte.

<b>Propriedade</b>	<b>São Francisco</b>	<b>São Paulo</b>	<b>Paris</b>
Nós	1214	1616	1274
Arestas	2755	2770	2413
Grau médio	4,5387	3,4282	3,7881
Circuidade	1,0264	1,0330	1,0167
Coeficiente de malhagem	0,6239	0,3628	0,4459
Número médio de caminhos disjuntos	1,7356	1,3448	1,4410
Capacidade de fluxo (veículos/hora)	2268	2339	1440

Fonte: dos autores.

## 4.2. ANÁLISE DOS ELEMENTOS VULNERÁVEIS

Para avaliar o impacto de um processo disruptivo sobre os semáforos de redes de transporte, é importante observar como os semáforos estão distribuídos nestas redes, e para isso foi realizada a extração do subgrafo de cada rede que contém todas aquelas interseções que são semaforizadas. A extração do subgrafo implica em gerar, a partir do grafo das redes originais, novas redes que contenham apenas aqueles nós representando interseções com semáforo e as arestas que ligam essas interseções entre si. Quanto maior e mais robusto o subgrafo, mais abrangente será o processo disruptivo.

Para tornar mais evidente a importância do subgrafo para a mobilidade e a resiliência da rede como um todo, optou-se por usar a razão entre a propriedade do subgrafo e a propriedade da rede original. As propriedades avaliadas são:

- Fração de nós: razão entre o número de nós do subgrafo e o número de nós da rede.
- Fração de arestas: razão entre o número de arestas do subgrafo e o número de arestas da rede.
- Número de componentes fracamente conectadas: número de componentes dos subgrafos cuja versão não direcionada é conectada.

Na Tabela 8 estão resumidas as propriedades dos subgrafos.

Tabela 8 - Propriedades dos subgrafos de interseções semaforizadas.

<b>Propriedade</b>	<b>São Francisco</b>	<b>São Paulo</b>	<b>Paris</b>
Fração de nós	0,5379	0,3589	0,3328
Fração de arestas	0,4763	0,2376	0,2112
Componentes fracamente conectadas	30	85	102

Fomte: dos autores.

O subgrafo de São Francisco representa mais de 50% dos nós e mais de 45% das arestas da sua rede original. Todos os subgrafos possuem mais de uma componente fracamente conectada, então todos os subgrafos possuem conjuntos de elementos incomunicáveis entre si. O subgrafo que permanece mais coeso, pelo critério do número de componentes fracamente conectados é o de São Francisco.

Considerando que o processo disruptivo a ser simulado neste trabalho incide justamente sobre os subgrafos analisados nesta seção, e considerando as informações obtidas com a análise dos subgrafos, é possível inferir que a danificação do subgrafo de interseções semaforizadas em

São Francisco causaria impactos mais perceptíveis na dinâmica dos processos de mobilidade. Devido ao fato do subgrafo representar uma fração maior da rede e ser mais coeso, a sua perda afetaria mais significativamente a coesão da rede original.

### **4.3. RESULTADOS DA SIMULAÇÃO**

Para São Francisco (SF), São Paulo (SP) e Paris (PA) foram simulados três cenários descritos na seção 3.2.3, a saber, cenário A (falhas aleatórias), cenário B (ataques direcionados aos semáforos com maior valor de centralidade de intermediação), cenário C (ataques direcionados aos semáforos com maior grau valorado por comprimento). Depois, foram avaliados os valores médios das variáveis para cada valor de  $\sigma$ , e para cada cenário. Intervalos de confiança a 5% de significância foram avaliados para cada cenário e cada variável de saída, para valores de  $\sigma$  de 0,1 e 0,5 e podem ser consultados no apêndice B.

## 5. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Nesta seção discute-se as relações entre as informações obtidas através da análise das redes de transporte e os resultados da simulação.

### 5.1. DELAY TOTAL

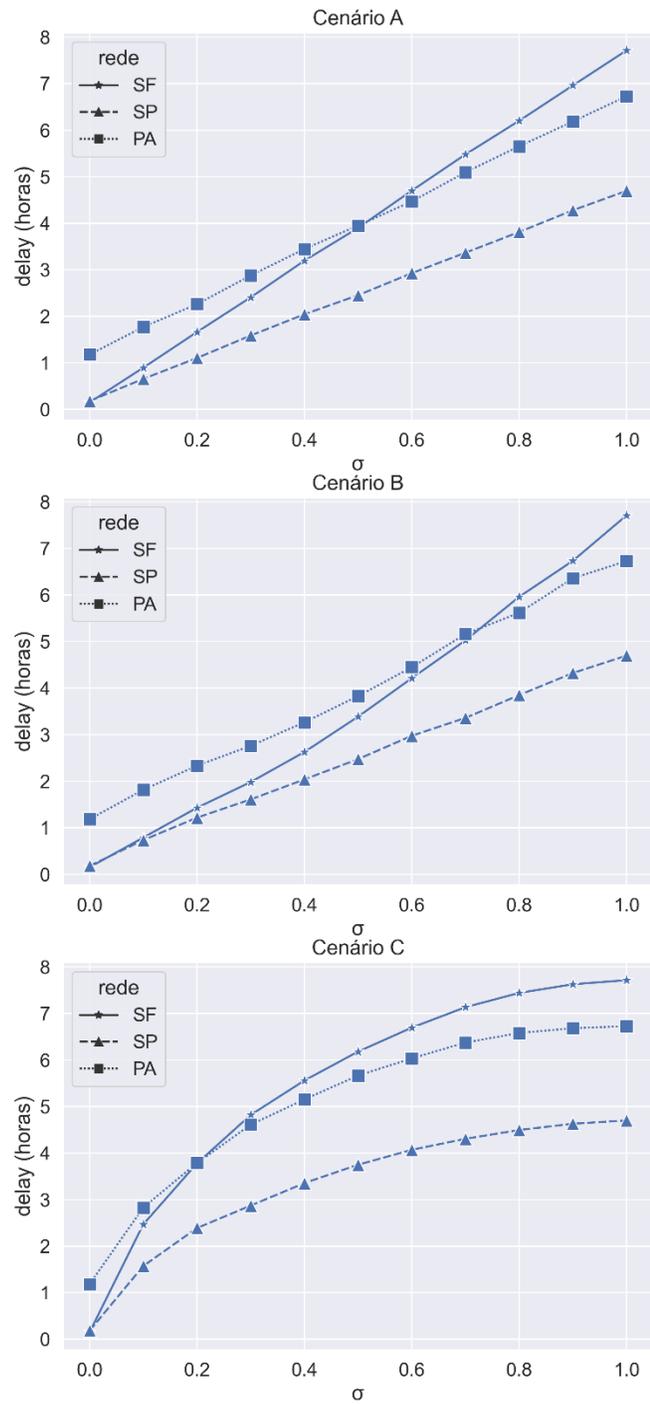
Para cada fração de semáforos afetados, uma quantidade de arestas que se ligam a esses semáforos tem sua velocidade de circulação reduzida para metade da velocidade de circulação habitual. Na Figura 8 são exibidos os valores de delay total obtidos em função da fração de semáforos afetados.

É possível notar que para o caso C, obtém-se curvas côncavas cujos valores de atraso são sempre mais elevados do que nos outros casos. Conforme observado em Ganin et al. (2019), as diferenças entre os valores de atraso total e de número de arestas afetadas entre os casos A e B para as cidades analisadas é pequena se comparada com a diferença que existe entre os casos A e C. Ganin et al. (2019) também observa para o cenário C uma curva não-linear tal como a obtida neste trabalho, embora tenha usado uma maneira alternativa de calcular os delays. Akbarzadeh et al. (2019), usando um modelo alternativo, mostrou que ataques baseados em grau valorado são particularmente disruptivos em relação aos delays de tempo de viagem.

É importante observar que Paris tem maiores delays do que São Francisco para baixos valores de  $\sigma$ . Mas conforme  $\sigma$  aumenta, São Francisco passa a ser a rede com maior delay. A rede de São Francisco possui a maior rede de interseções semaforizadas, o que auxilia na explicação do por que um número maior de arestas foi afetado e do por que o valor dos delays foi maior. Para baixos valores de  $\sigma$  as características de redundância da rede e de capacidade ociosa conseguem fornecer algum alívio aos agentes que buscam por trajetos eficientes substitutos. O ponto em que São Francisco começa a apresentar resultados piores do que Paris varia de cenário para cenário.

É possível observar ainda que embora uma maior conectividade possa ser encarada como critério de eficiência em sistemas de transporte, ela também pode ser explorada por ataques maliciosos para desativar grande quantidade de elementos rapidamente.

Figura 8 - Delay total para as combinações de cenário e cidade



Fonte: dos autores.

Embora o delay seja uma métrica global eficaz para avaliar a robustez do sistema de transporte, não consegue capturar totalmente como o impacto do processo disruptivo se dá sobre os agentes. Por isso, medidas diretamente relacionadas aos trajetos que eles selecionaram são também investigadas nas seções seguintes bem como os níveis de congestionamento.

## 5.2. CONGESTIONAMENTO

O congestionamento em cada rede varia em função da capacidade das suas arestas e da distribuição de caminhos mais eficientes conforme aumenta a fração de elementos afetados pelo processo disruptivo. A Figura 9 apresenta como o congestionamento variou para cada cidade e em cada caso.

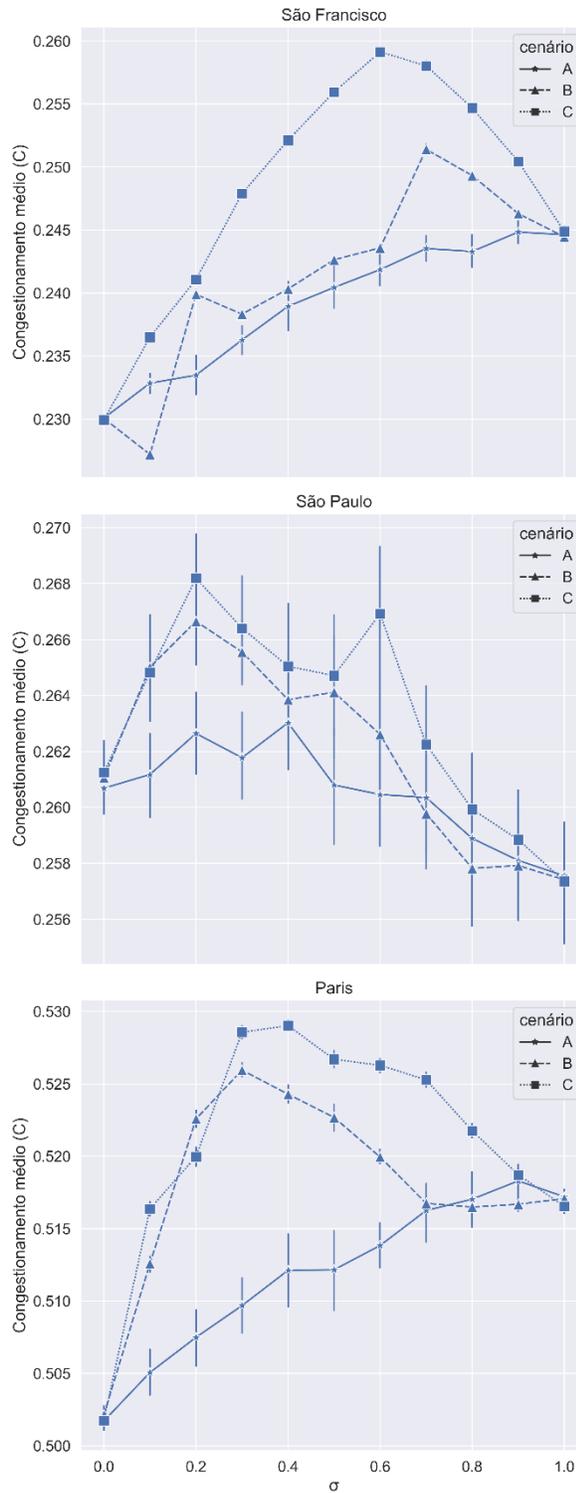
É perceptível que o caso C gerou maiores valores de congestionamento do que o caso B, e este gerou maiores valores do que o caso A. É também possível notar que, enquanto São Francisco e Paris possuem curvas que ascendem não-linearmente, São Paulo possui uma curva que descende, o que significa que o nível de congestionamento em São Paulo reduziu conforme aumentou  $\sigma$ . Este resultado pode ser explicado avaliando a correlação entre a distribuição de caminhos críticos e a distribuição de capacidade de fluxo nas arestas, a correlação entre a capacidade de fluxo e o volume de fluxo, e a capacidade média de fluxo dos trajetos selecionados pelos agentes para valores de sigma  $\sigma = 0$  e  $\sigma = 1$ . Estes resultados estão apresentados na Tabela 9 e servem para indicar como se modifica a atratividade dos agentes por rotas de maior capacidade para diferentes intensidades de processo disruptivo.

Tabela 9 - Atratividade por rotas com maior capacidade

$\sigma$	São Francisco		São Paulo		Paris	
	0,0	1,0	0,0	1,0	0,0	1,0
Correlação CI / Capacidade de fluxo	0,39	0,26	0,43	0,54	0,43	0,43
Correlação fluxo / capacidade de fluxo	0,24	0,23	0,34	0,44	0,27	0,26
Capacidade de fluxo média dos trajetos dos agentes	2545,8	2547,8	3001,4	3189,3	1685,1	1690,0

Fonte: dos autores.

Figura 9 - Congestionamento médio (C) observado em São Francisco, São Paulo e Paris.  
As barras de erro representam intervalo de confiança a 5% de significância.



Fonte: dos autores.

Para São Francisco, conforme  $\sigma$  aumenta, há uma redução da correlação entre a distribuição de caminhos mínimos e rotas de maior capacidade, enquanto a correlação entre volume de fluxo e capacidade de fluxo nas arestas permanece constante. A capacidade média das arestas usadas pelos agentes se modifica em apenas duas unidades. Em Paris, o cenário é semelhante, mas a concentração de eficientes se quer chega a se modificar e a capacidade média de fluxo nos trajetos dos agentes aumenta em aproximadamente cinco unidades. Em São Paulo, vemos um resultado bastante diferente. A correlação entre a centralidade de intermediação (associada a distribuição de caminhos mínimos) e a capacidade de fluxo das arestas aumenta em pouco mais de 10%. É perceptível também que a capacidade média de fluxo dos trajetos escolhidos pelos agentes aumentou em quase 190 unidades, uma mudança bem mais significativa do que as observadas em São Francisco e Paris.

Pode-se deduzir dessas informações que um dos efeitos colaterais de  $\sigma$  em São Paulo foi tornar as rotas de maior capacidade mais atraentes para os agentes no processo de seleção do caminho mínimo, o que ajudaria a explicar a tendência da redução dos volumes de congestionamento observada em São Paulo na Figura 9. Isso também significa que a inviabilização ou anulação da presença de algumas rotas pode levar o sistema a trabalhar com menor sobrecarga e ser mais confiável.

É necessário também observar que 50000 agentes não é um volume elevado para estas redes, já que os valores máximos de congestionamento variam de 0,2 a 0,5, dependendo da cidade.

### 5.3. CARACTERÍSTICAS DAS VIAGENS DOS AGENTES

Nesta seção são resumidos os resultados acerca dos tempos médios de viagem por agente, da razão dos tempos de viagem por agente, da distância média percorrida e da circuidade. Os resultados para tempos médios de viagem por agente e razão de tempos de viagem pode ser consultado na Figura 10. Os resultados para distância média percorrida e circuidade média por agente podem ser consultados na Figura 11.

São Paulo teve os piores resultados concernentes a distância média percorrida e circuidade média por trajeto. De fato, é possível perceber pela análise realizada na seção 4.1 que o design de São Paulo possui uma estrutura análoga a de uma árvore, com menos ciclos, redundância e trajetos alternativos, o que aumenta a distância entre os trajetos realizados. Algumas métricas deixam este aspecto bastante evidente, como o coeficiente de aglomeração e a distribuição da centralidade de

proximidade. São Paulo tem o menor coeficiente de aglomeração e um baixo valor de centralidade de proximidade média.

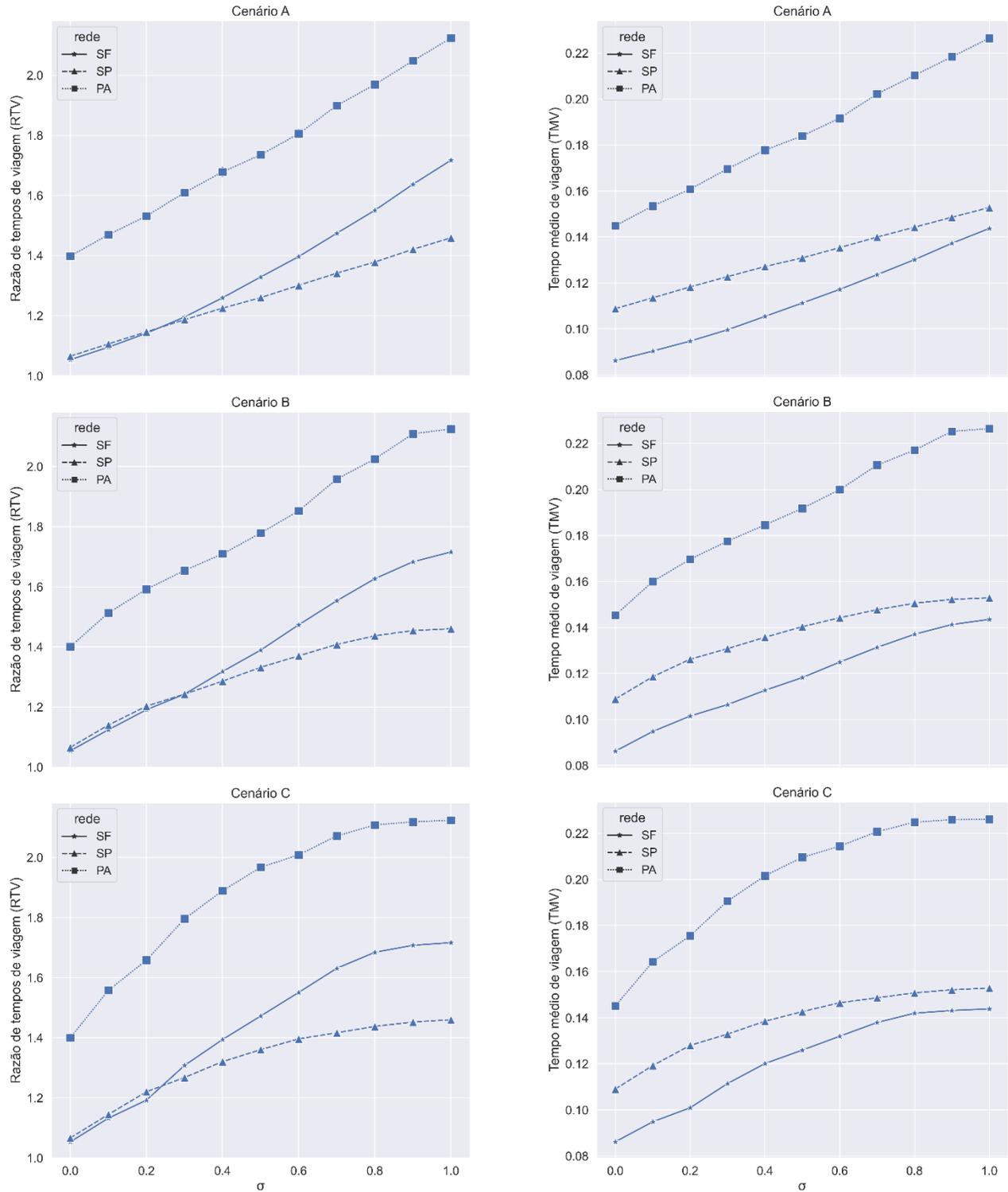
A rede de Paris é a rede que possui os melhores resultados com relação a distância média percorrida e a circuitidade média por trajeto e possui os maiores valores destas mesmas métricas. O cenário B foi aquele que causou maiores impactos na circuitidade e na distância média percorrida para São Paulo e Paris, que possuem uma quantidade significativa de elementos dos seus subgrafos de interseções semaforizadas com alto valor de centralidade de intermediação.

A rede de São Francisco teve melhores valores de tempo médio de viagem e razões de tempo de viagem por agente do que Paris, o que pode ser explicado pelo fato de São Francisco ser uma rede mais redundante, mais conectada, e com maior número de caminhos disjuntos entre dois pontos, além de possuir menores níveis de congestionamento do que Paris. São Paulo, embora possua propriedades topológicas semelhantes à Paris, possui níveis de congestionamento semelhantes aos de São Francisco. A conectividade local de São Francisco, conforme já mencionado na seção 4.5, pode ser uma fonte de vulnerabilidade. A Figura 12 apresenta a fração de agentes que optam por modificar seus trajetos para diferentes valores de  $\sigma$ .

Para baixos valores de  $\sigma$ , os caminhos mais eficientes selecionados pelos agentes são, em média, praticamente os mesmos que seriam escolhidos em condições normais de operação, ou seja, sem efeitos disruptivos ou congestionamento. Para valores superiores de  $\sigma$ , os agentes começam a buscar rotas alternativas.

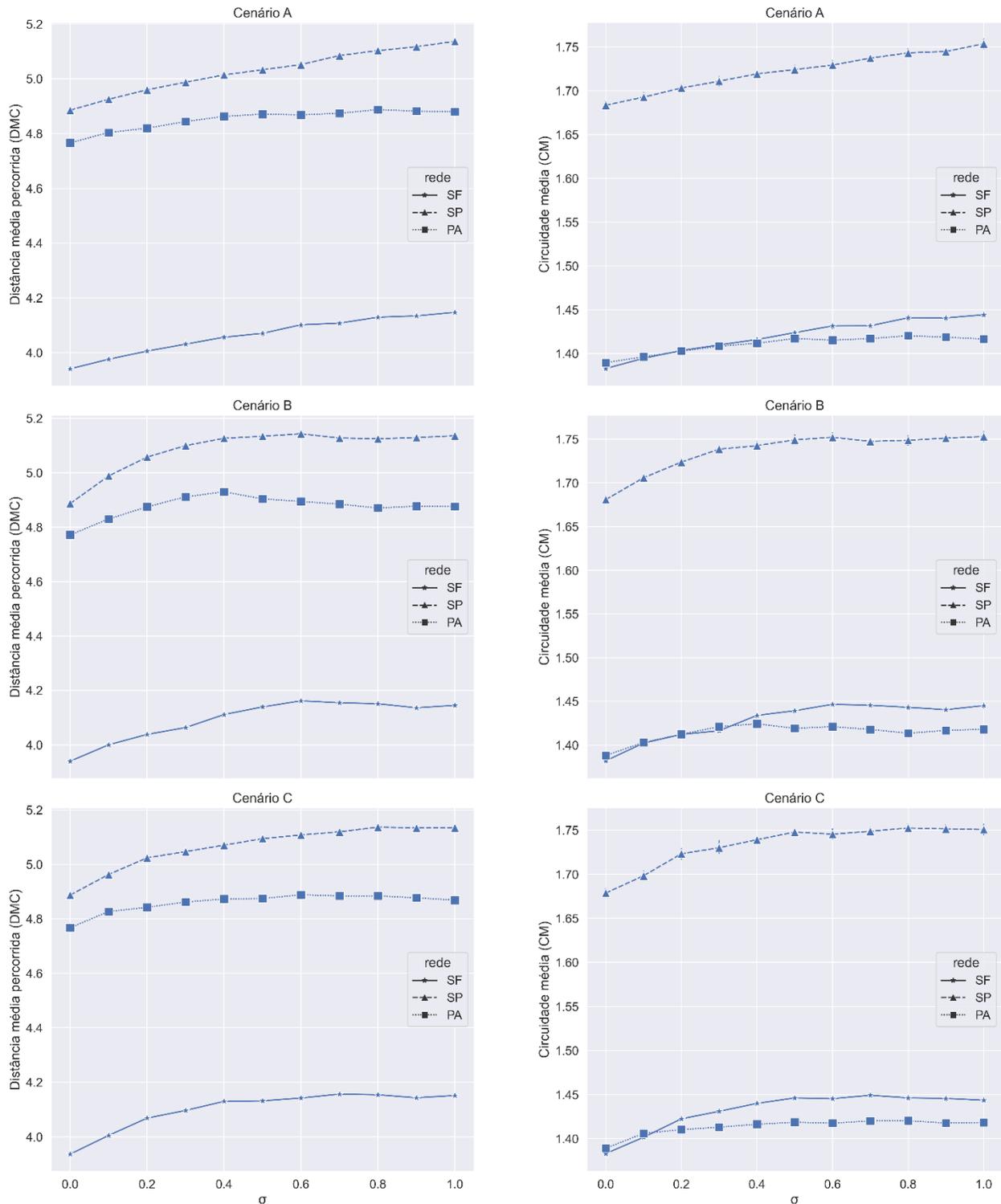
Para  $0,2 < \sigma < 0,45$  agentes utilizarão mais e mais os caminhos alternativos. Para  $0,45 < \sigma < 0,45$  a tendência de aumento se estabiliza. A partir daí as cidades apresentarão diferentes comportamentos, mas para todas elas o cenário B é o mais disruptivo em relação a modificação do perfil de escolha dos agentes. Em São Francisco, valores elevados de  $\sigma$  fazem a fração de agentes selecionando caminhos alternativos cair até que ela se estabiliza em torno de 50%. Em São Francisco, a fração decai de forma bem menos intensa do que em São Francisco e se mantém superior a fração de agentes que não mudam de trajeto, e em Paris os cenários A e C se estabilizam em torno de 50% para  $\sigma > 0,4$  enquanto o cenário B só se estabiliza em 50% para  $\sigma \geq 0,8$ .

Figura 10 - Razão de tempos de viagem (RTV) e Tempo médio de viagem (TMV) para diferentes valores de  $\sigma$ .



Fonte: dos autores.

Figura 11 - Circuidade média (CM) e Distância média percorrida (DMC) para diferentes valores de  $\sigma$ .



Fonte: dos autores.

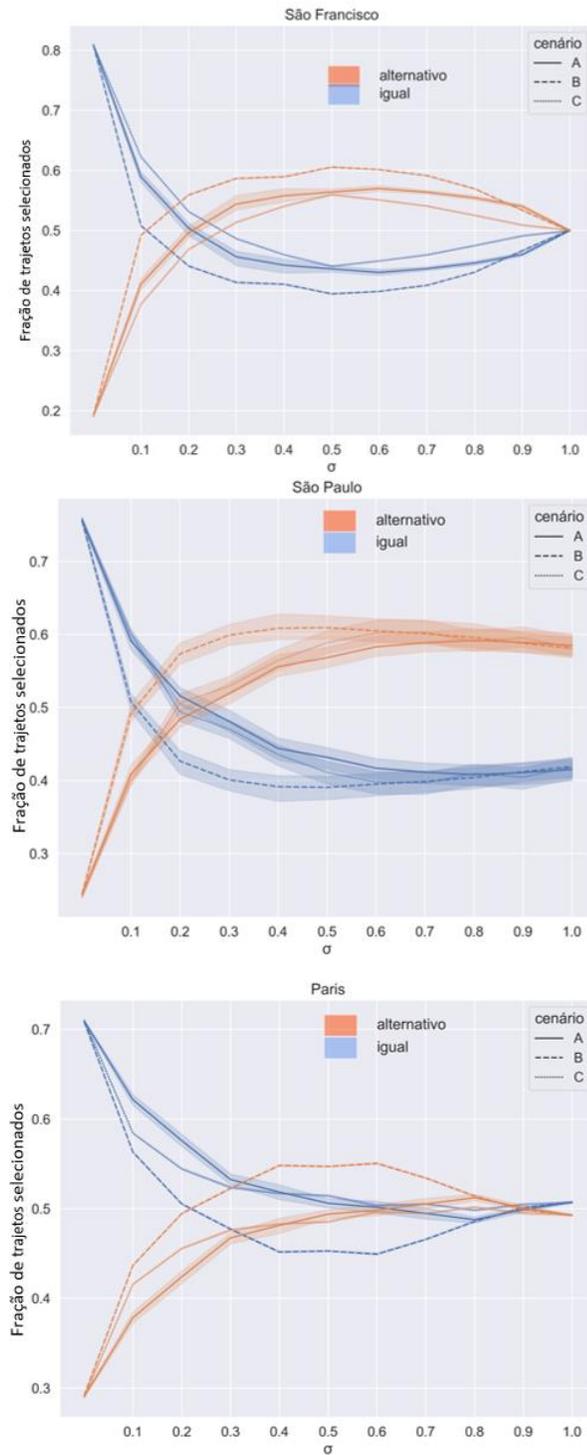
O comportamento observado em São Francisco e Paris estão ligados a um processo de saturação que ocorre conforme o processo disruptivo avança. A partir de certos valores de  $\sigma$  o congestionamento (no caso de Paris) e o elevado volume de vias afetadas (no caso de São Francisco) começam a tornar equivalentes os tempos de viagem nas rotas alternativas e nas rotas originais, utilizadas quando a rede não está sob efeito de congestionamentos ou processos disruptivos.

Zhang et al. (2013) simulou falhas baseadas na centralidade de intermediação são particularmente mais prejudiciais do que outros modos de ataque em relação a mudanças no tamanho dos componentes conectados. Conforme mencionado na seção 2.1, os componentes conectados têm uma relação direta com a redundância dos trajetos disponíveis na rede.

Os resultados deste trabalho podem ser relevantes para entender como diferentes estruturas de rede urbana poderiam ser prejudicadas por ameaças relativas a dispositivos de controle de tráfego. As intersecções com grau elevado (seja grau topológico ou valorado por comprimento) são especialmente vulneráveis, uma vez que a interrupção de um único ponto afetará um número maior de segmentos. O dano dos dispositivos de controle de tráfego em cruzamentos com alta centralidade de intermediação não necessariamente provocará maiores atrasos ou congestionamentos em comparação com uma falha aleatória, mas forçará os agentes a usar caminhos alternativos, o que pode aumentar a distância percorrida por eles e diminuir seu bem-estar.

Aumentar a robustez por meio do fornecimento de rotas alternativas disjuntas ou fornecer estradas com tempos e capacidades de viagem mais rápidas pode ser eficaz na redução do impacto da interrupção se esses recursos estiverem de alguma forma protegidos contra o processo disruptivo em questão. Em alguns contextos, os motoristas podem não estar dispostos a evitar caminhos interrompidos porque qualquer rota alternativa não é suficientemente atrativa em termos de tempo de viagem (por causa do design ineficiente ou porque a interrupção se espalhou), e esse comportamento pode levar a problemas de segurança para equipes de manutenção e motoristas.

Figura 12 - Mudanças do perfil de escolha dos agentes para diferentes valores de  $\sigma$ . As linhas laranjas indicam a porcentagem dos agentes que adotaram rotas alternativas. As linhas azuis indicam a porcentagem de agentes que mantiveram as rotas originais.



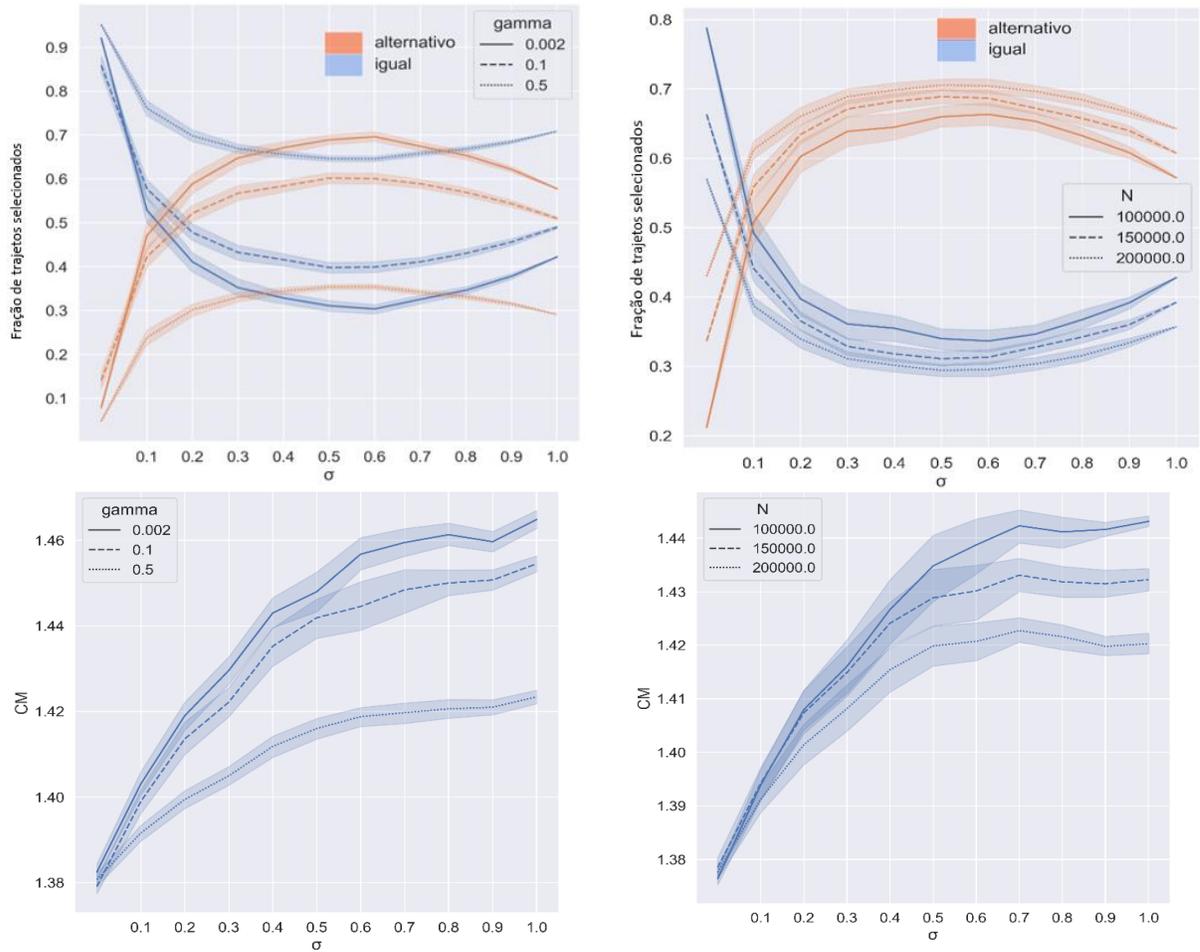
Fonte: dos autores.

#### 5.4.EFEITOS DA VARIAÇÃO DE $\gamma$ E $N$

A variação do parâmetro de ajuste  $\gamma$  modifica a capacidade de adaptação dos agentes e possui um efeito análogo ao da informação incompleta, afetando as diferenças entre os tempos percebidos e os tempos efetivos. A variação de  $N$  provoca maior congestionamento da rede e tende a modificar os tempos de viagem das arestas de forma mais intensa. Esses pontos podem ser logicamente deduzidos das características do modelo. Agora, o comportamento dos agentes e o valor da circuidade média apresentarão comportamentos menos intuitivos e precisam ser melhor discutidos.

A redução de  $\gamma$  e o aumento de  $N$  aumentam a fração de agentes que adotam trajetos alternativos, indicando tendências opostas. O aumento de  $\gamma$  ou de  $N$  atenua os valores de circuidade média, o que pode ser explicado pela menor percepção do trade-off entre distância e tempo, no caso de  $\gamma$  e pela maior sobrecarga dos trajetos alternativos, no caso de  $N$ . Esses resultados estão expressos na Figura 13.

Figura 13 - Efeitos da variação de  $\gamma$  (com  $N$  fixo em 50000) e  $N$  (com  $\gamma$  fixo em 0.1) para escolha dos agentes e circuidade média (CM).



Fonte: dos autores.

## 6. CONCLUSÕES

Sistemas complexos fazem parte da nossa vida e estão presentes em uma grande variedade de contextos. A tecnologia da informação é muito importante para a otimização da mobilidade urbana e ajuda na redução do congestionamento, na melhoria da segurança viária e na redução da poluição. Esses mecanismos podem compartilhar informações entre si, para que possam reagir às variáveis globais do sistema. A adoção deve se unir a planos para proteger dispositivos de ataques cibernéticos, falhas eletromecânicas, falhas de conectividade e perda de precisão. O impacto dessas falhas não é o mesmo em todas as cidades. A topologia da rede de transporte desempenha um papel importante no entendimento do impacto dos processos disruptivos.

Nesta dissertação, buscou-se responder as seguintes questões de pesquisa com o uso da teoria de redes complexas: 1) como as propriedades de mobilidade disponíveis na rede se alteram diante de processos disruptivos? 2) como os usuários alteram seu comportamento em resposta às mudanças apresentadas pela rede em cenários disruptivos? 3) qual a influência da topologia na mobilidade e no comportamento dos agentes?

Pôde-se discutir a relação entre os conceitos de vulnerabilidade e resiliência, e observar que mesmo com maior número de elementos vulneráveis em uma rede complexa, o impacto de falhas pode ser amenizado por um arranjo mais resiliente.

Para estimar o impacto de processos disruptivos em sistemas de transporte na mobilidade urbana, utilizou-se simulação de falhas e ataques e análise de redes complexas. Com essas ferramentas, foi possível diagnosticar a ineficiência do design de redes reais em relação à falta de capacidade, falta de redundância ou arranjo espacial deficiente. A análise de subgrafos de elementos vulneráveis permitiu obter uma estimativa inicial do dano causado, evidenciando como o arranjo desses elementos em estrutura de rede torna o impacto disruptivo mais severo.

A modificação no comportamento dos usuários em cenários disruptivos foi estudada utilizando a simulação de viagens, com agentes que buscam otimizar seu tempo de viagem. Mesmo que a hipótese do comportamento otimizador não seja realista, é uma boa estimativa inicial, ainda mais considerando que a seleção de trajetos cada vez mais tem sido realizada com o uso de aplicativos de GPS que, em geral, tendem a usar algum tipo de algoritmo de otimização.

Embora os semáforos tenham sido os alvos escolhidos durante a simulação dos processos disruptivos, outros tipos de processos disruptivos podem ser simulados pelo mecanismo proposto. Poderia ser possível, por exemplo, usar como elemento vulnerável túneis ou pontes. Esse tipo de

direcionamento é viabilizado pelo volume cada vez maior de informações disponíveis acerca da estrutura de redes de transporte urbano.

A simulação de viagens permite obter estimativas iniciais do impacto nas dinâmicas de mobilidade em cenários disruptivos a um custo computacional relativamente baixo. Foi possível averiguar que, a partir de uma certa fração de elementos afetados, os agentes tendem a ficar indiferentes entre utilizar caminhos alternativos e utilizar aqueles caminhos considerados ótimos em ausência de falhas. Além disso, foi observado que ataques baseados no uso da centralidade de intermediação tendem a acentuar o uso de rotas alternativas.

Uma maior conectividade pode ser explorada como uma possível fonte de vulnerabilidade em sistemas de transporte. Mesmo que as propriedades globais classifiquem as redes em relação à resiliência de forma mais vantajosa, a avaliação da capacidade rodoviária, redundância e estatísticas de viagens ajuda a tornar a classificação final da estrutura da rede mais completa. Os resultados mostram que quase todos os aspectos da rede têm alguma influência na resiliência, dependendo das características do processo disruptivo. Os resultados da simulação de viagem de agente mostram que uma medida global de desempenho do sistema pode não refletir o desempenho das viagens individuais em termos de distância e tempo de viagem percorridos.

Este trabalho busca abordar um aspecto essencial e muitas vezes angustiante da vida cotidiana dos cidadãos, isto é, o sistema de transporte e os problemas que o afetam. Todos os dias, as grandes metrópoles experimentam congestionamentos em seus veículos particulares e superlotação nos transportes públicos. As implicações desses problemas vão além da mobilidade urbana, afetando a saúde dos cidadãos e o meio ambiente, devido ao stress e ao excesso de poluentes liberados na atmosfera pelos veículos automotivos. É possível notar que a alteração de uma fração reduzida de elementos da rede urbana pode causar impactos significativos no uso de trajetos, nas distâncias percorridas e nos tempos de viagem, características estas que tem implicações econômicas evidentes, representadas pelo tempo perdido no trânsito, pela ocorrência de acidentes, deterioração das vias de transporte e uso de combustível.

Há diversas possibilidades de ampliar este trabalho. Nesta dissertação, os agentes tem comportamento otimizador e selecionam o trajeto mais rápido. Esta simplificação nem sempre é realista, pois os trajetos mais rápidos podem apresentar uma série de características indesejáveis como excesso de curvas ou passagens por trechos perigosos da cidade. Uma melhoria possível é adotar uma função custo de aresta que incorpore essas outras preocupações. O processo disruptivo

aplicado neste trabalho afetou a velocidade de percurso dos agentes, no entanto, há várias outras maneiras pelas quais as características de viagem podem ser afetadas. É possível por exemplo imaginar situações em que o sentido de percurso é trocado pelos sinalizadores de fluxo, o fluxo é totalmente bloqueado ou em que a informação dos agentes sobre os tempos de trajeto varia em função de algum atributo da viagem dos agentes, como o destino ou a distância percorrida. Por fim, é possível estender essa análise para uma situação em que grupos de agentes competem utilizando diferentes estratégias e comparar o impacto dessas estratégias no sistema e para os agentes, individualmente.

## 7. REFERÊNCIAS

AKBARZADEH, Meisam; REIHANI, Sayed Farzin Salehi; SAMANI, Keivan Aghababaei. Detecting critical links of urban networks using cluster detection methods. **Physica A: Statistical Mechanics and its Applications**, v. 515, p. 288-298, 2019.

AL KHAFRAF, Nameer; JALILI, Mahdi. Optimization of synchronizability in complex spatial networks. **Physica A: Statistical Mechanics and its Applications**, v. 514, p. 46-55, 2019.

ALBERT, Réka; BARABÁSI, Albert-László. Statistical mechanics of complex networks. **Reviews of modern physics**, v. 74, n. 1, p. 47, 2002.

ALBERT, Réka; JEONG, Hawoong; BARABÁSI, Albert-László. Error and attack tolerance of complex networks. **nature**, v. 406, n. 6794, p. 378-382, 2000.

AN, Xin-lei et al. Synchronization analysis of complex networks with multi-weights and its application in public traffic network. **Physica A: Statistical Mechanics and its Applications**, v. 412, p. 149-156, 2014.

BARRAT, Alain; BARTHELEMY, Marc; VESPIGNANI, Alessandro. **Dynamical processes on complex networks**. Cambridge university press, 2008.

BARTHÉLEMY, Johan; CARLETTI, Timoteo. An adaptive agent-based approach to traffic simulation. **Transportation research procedia**, v. 25, p. 1238-1248, 2017.

BARTHELEMY, Marc. **Morphogenesis of spatial networks**. Cham, Switzerland: Springer International Publishing, 2018.

BATTY, Michael. **The new science of cities**. MIT press, 2013.

BEINEKE, Lowell W.; OELLERMANN, Ortrud R.; PIPPERT, Raymond E. The average connectivity of a graph. **Discrete mathematics**, v. 252, n. 1-3, p. 31-45, 2002.

BEN-AKIVA, Moshe E. et al. A dynamic traffic assignment model for highly congested urban networks. **Transportation research part C: emerging technologies**, v. 24, p. 62-82, 2012.

BENOIT, Jérôme GM; JABARI, Saif Eddin G. On the perturbation of self-organized urban street networks. **Applied Network Science**, v. 4, n. 1, p. 1-20, 2019.

BERTRAND, J. Will M.; FRANSOO, Jan C. Operations management research methodologies using quantitative modeling. **International Journal of Operations & Production Management**, 2002.

BETTENCOURT, Luís MA. Cities as complex systems. **Modeling complex systems for public policies**, p. 217-236, 2015.

BITNER, Agnieszka; HOŁYST, Robert; FIAŁKOWSKI, Marcin. From complex structures to complex processes: Percolation theory applied to the formation of a city. **Physical Review E**, v. 80, n. 3, p. 037102, 2009.

BLANCHARD, Philippe; VOLCHENKOV, Dimitri. Intelligibility and first passage times in complex urban networks. **Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences**, v. 464, n. 2096, p. 2153-2167, 2008.

BOCCALETTI, Stefano et al. Complex networks: Structure and dynamics. **Physics reports**, v. 424, n. 4-5, p. 175-308, 2006.

BOCCARA, Nino. Modeling complex systems. Springer Science & Business Media, 2010.

BOEING, Geoff. A multi-scale analysis of 27,000 urban street networks: Every US city, town, urbanized area, and Zillow neighborhood. **Environment and Planning B: Urban Analytics and City Science**, v. 47, n. 4, p. 590-608, 2020.

BOEING, Geoff. Planarity and street network representation in urban form analysis. **Environment and Planning B: Urban Analytics and City Science**, v. 47, n. 5, p. 855-869, 2020.

BOEING, Geoff. The morphology and circuitry of walkable and drivable street networks. In: **The mathematics of urban morphology**. Birkhäuser, Cham, 2019. p. 271-287.

BROIDO, Anna D.; CLAUSET, Aaron. Scale-free networks are rare. **Nature communications**, v. 10, n. 1, p. 1-10, 2019.

CALLAWAY, Duncan S. et al. Network robustness and fragility: Percolation on random graphs. **Physical review letters**, v. 85, n. 25, p. 5468, 2000.

CARDILLO, Alessio et al. Structural properties of planar graphs of urban street patterns. **Physical Review E**, v. 73, n. 6, p. 066107, 2006.

CASALI, Ylenia; HEINIMANN, Hans R. Robustness response of the Zurich road network under different disruption processes. **Computers, Environment and Urban Systems**, v. 81, p. 101460, 2020.

CAUCHICK MIGUEL, Paulo Augusto et al. Metodologia de pesquisa em engenharia de produção e gestão de operações. Rio de Janeiro: Elsevier, 2010.

CHAKRABARTI, Deepayan et al. Epidemic thresholds in real networks. **ACM Transactions on Information and System Security (TISSEC)**, v. 10, n. 4, p. 1-26, 2008.

CHAN, Sonic HY; DONNER, Reik V.; LÄMMER, Stefan. Urban road networks—spatial networks with universal geometric features?. **The European Physical Journal B**, v. 84, n. 4, p. 563-577, 2011.

CHU, Chia-Chi; IU, Herbert Ho-Ching. Complex networks theory for modern smart grid applications: A survey. **IEEE Journal on Emerging and Selected Topics in Circuits and Systems**, v. 7, n. 2, p. 177-191, 2017.

COURTAT, Thomas; GLOAGUEN, Catherine; DOUADY, Stephane. Mathematics and morphogenesis of cities: A geometrical approach. **Physical Review E**, v. 83, n. 3, p. 036106, 2011.

CROOKS, Andrew T.; HEPPENSTALL, Alison J. Introduction to agent-based modelling. In: **Agent-based models of geographical systems**. Springer, Dordrecht, 2012. p. 85-105.

CRUCITTI, Paolo; LATORA, Vito; MARCHIORI, Massimo. Model for cascading failures in complex networks. **Physical Review E**, v. 69, n. 4, p. 045104, 2004.

CRUCITTI, Paolo; LATORA, Vito; PORTA, Sergio. Centrality measures in spatial networks of urban streets. **Physical Review E**, v. 73, n. 3, p. 036125, 2006.

DINARDO, A. et al. Redundancy features of water distribution systems. **Procedia Engineering**, v. 186, p. 412-419, 2017.

DING, Rui et al. Application of complex networks theory in urban traffic network researches. **Networks and Spatial Economics**, v. 19, n. 4, p. 1281-1317, 2019.

DONG, Shangjia et al. Measuring the topological robustness of transportation networks to disaster-induced failures: A percolation approach. **Journal of Infrastructure Systems**, v. 26, n. 2, p. 04020009, 2020.

DONNER, Reik. Emergence of synchronization in transportation networks with biologically inspired decentralized control. In: **Recent advances in nonlinear dynamics and synchronization**. Springer, Berlin, Heidelberg, 2009. p. 237-275.

DOROGOVTSSEV, Sergey N.; MENDES, Jose FF. Evolution of networks. **Advances in physics**, v. 51, n. 4, p. 1079-1187, 2002.

EK, HUNT. História do Pensamento Econômico: uma perspectiva crítica. **Rio de Janeiro: Campus Elsevier**, 2005.

ELLENS, Wendy et al. Effective graph resistance. **Linear algebra and its applications**, v. 435, n. 10, p. 2491-2506, 2011.

ELLENS, Wendy; KOUIJ, Robert E. Graph measures and network robustness. **arXiv preprint arXiv:1311.5064**, 2013.

ELLEUCH, Islam; MAKNI, Achraf; BOUAZIZ, Rafik. Design of an Intelligent Cooperative Road Hazard Detection Persistent System. In: **International Conference on Intelligent Systems Design and Applications**. Springer, Cham, 2018. p. 696-707.

FAJGELBAUM, Pablo D.; SCHAAL, Edouard. Optimal transport networks in spatial equilibrium. **Econometrica**, v. 88, n. 4, p. 1411-1452, 2020.

FAN, DongKai; SHI, Ping. Improvement of Dijkstra's algorithm and its application in route planning. In: **2010 seventh international conference on fuzzy systems and knowledge discovery**. IEEE, 2010. p. 1901-1904.

FENG, Jia et al. Weighted complex network analysis of the Beijing subway system: Train and passenger flows. **Physica A: Statistical Mechanics and its Applications**, v. 474, p. 213-223, 2017.

FORRESTER, Jay W. Learning through system dynamics as preparation for the 21st century. **System Dynamics Review**, v. 32, n. 3-4, p. 187-203, 2016.

GANIN, Alexander A. et al. Resilience and efficiency in transportation networks. **Science advances**, v. 3, n. 12, p. e1701079, 2017.

GANIN, Alexander A. et al. Resilience in intelligent transportation systems (ITS). **Transportation Research Part C: Emerging Technologies**, v. 100, p. 318-329, 2019.

GAO, Jianxi; BARZEL, Baruch; BARABÁSI, Albert-László. Universal resilience patterns in complex networks. **Nature**, v. 530, n. 7590, p. 307-312, 2016.

GAO, Song et al. Understanding urban traffic-flow characteristics: a rethinking of betweenness centrality. **Environment and Planning B: Planning and Design**, v. 40, n. 1, p. 135-153, 2013.

GHANBARI, Ryan; JALILI, Mahdi; YU, Xinghuo. Correlation of cascade failures and centrality measures in complex networks. **Future generation computer systems**, v. 83, p. 390-400, 2018.

GOYAL, Sanjeev; VAN DER LEIJ, Marco J.; MORAGA-GONZÁLEZ, José Luis. Economics: An emerging small world. **Journal of political economy**, v. 114, n. 2, p. 403-412, 2006.

GUALDI, Stanislao; MANDEL, Antoine. On the emergence of scale-free production networks. **Journal of Economic Dynamics and Control**, v. 73, p. 61-77, 2016.

GUIMERÀ, Roger et al. Optimal network topologies for local search with congestion. **Physical review letters**, v. 89, n. 24, p. 248701, 2002.

GUO, Yajuan et al. Dynamic identification of urban traffic congestion warning communities in heterogeneous networks. **Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications**, v. 522, p. 98-111, 2019.

HEIDE, Dominik; SCHÄFER, Mirko; GREINER, Martin. Robustness of networks against fluctuation-induced cascading failures. **Physical Review E**, v. 77, n. 5, p. 056103, 2008.

HELBING, D.; BALIETTI, S. How to do agent-based simulations in the future: From modeling social mechanisms to emergent phenomena and interactive systems design (SSRN Scholarly Paper No. ID 2339770). Rochester, NY: Social Science Research Network. Retrieved from the Santa Fe Institute Archive: <http://www.santafe.edu/research/workingpapers/abstract/51b331dfecab44d50dc35fed2c6bbd7b>, 2013.

HU, Ziping; VERMA, Pramode K. Topological resilience of complex networks against failure and attack. In: **2011 Fifth IEEE International Conference on Advanced Telecommunication Systems and Networks (ANTS)**. IEEE, 2011. p. 1-6.

JAMAKOVIC, A.; UHLIG, S. P. W. G. On the relationship between the algebraic connectivity and graph's robustness to node and link failures. In: **2007 Next Generation Internet Networks**. IEEE, 2007. p. 96-102.

JIA, Hongfei et al. Dynamic Cascading Failure Analysis in Congested Urban Road Networks With Self-Organization. **IEEE Access**, v. 8, p. 17916-17925, 2020.

JUNIOR, J. C. M. R.; DE SOUZA VIEIRA, Reginaldo. Políticas públicas de transporte coletivo de passageiros: a segregação das mulheres em vagão exclusivo do metrô. **CEP**, v. 88801, p. 170, 2017.

KIRKLEY, Alec et al. From the betweenness centrality in street networks to structural invariants in random planar graphs. **Nature communications**, v. 9, n. 1, p. 1-12, 2018.

KLEIN, Ido; BEN-ELIA, Eran. Emergence of cooperation in congested road networks using ICT and future and emerging technologies: A game-based review. **Transportation Research Part C: Emerging Technologies**, v. 72, p. 10-28, 2016.

KOOHSARI, Mohammad Javad et al. Natural movement: A space syntax theory linking urban form and function with walking for transport. **Health & place**, v. 58, p. 102072, 2019.

LADYMAN, James; LAMBERT, James; WIESNER, Karoline. What is a complex system?. **European Journal for Philosophy of Science**, v. 3, n. 1, p. 33-67, 2013.

LEVY, Nadav; BEN-ELIA, Eran. Emergence of system optimum: A fair and altruistic agent-based route-choice model. **Procedia computer science**, v. 83, p. 928-933, 2016.

LI, Ming et al. Percolation on complex networks: Theory and application. **Physics Reports**, 2021.

LIN, Geng; CHEN, Xiaoxuan; LIANG, Yutian. The location of retail stores and street centrality in Guangzhou, China. **Applied geography**, v. 100, p. 12-20, 2018.

LIU, Wei; SONG, Zhaoyang. Review of studies on the resilience of urban critical infrastructure networks. **Reliability Engineering & System Safety**, v. 193, p. 106617, 2020.

LOBSANG, Tashi; ZHEN, Feng; ZHANG, Shanqi. Can Urban Street Network Characteristics Indicate Economic Development Level? Evidence from Chinese Cities. **ISPRS International Journal of Geo-Information**, v. 9, n. 1, p. 3, 2020.

MACAL, Charles M.; NORTH, Michael J. Tutorial on agent-based modeling and simulation. In: **Proceedings of the Winter Simulation Conference, 2005**. IEEE, 2005. p. 14 pp.

MAGGI, Elena; VALLINO, Elena. Understanding urban mobility and the impact of public policies: The role of the agent-based models. **Research in Transportation Economics**, v. 55, p. 50-59, 2016.

MANZO, Stefano; NIELSEN, Otto Anker; PRATO, Carlo Giacomo. Investigating uncertainty in BPR formula parameters: a case study. 2013.

MEHMOOD, Muhammad Sajid et al. The spatial coupling effect between urban street network's centrality and collection & delivery points: A spatial design network analysis-based study. **Plots**, v. 16, n. 5, p. e0251093, 2021.

MERCHAN, Daniel; WINKENBACH, Matthias; SNOECK, André. Quantifying the impact of urban road networks on the efficiency of local trips. **Transportation Research Part A: Policy and Practice**, v. 135, p. 38-62, 2020.

MOHSENI-KABIR, Arman et al. Percolation thresholds for robust network connectivity. **Journal of Statistical Mechanics: Theory and Experiment**, v. 2021, n. 1, p. 013212, 2021.

MORABITO NETO, R.; PUREZA, V. Modelagem e simulação. Metodologia de pesquisa em engenharia de produção e gestão de operações, v. 2, p. 169-198, 2012.

MOTTER, Adilson E.; LAI, Ying-Cheng. Cascade-based attacks on complex networks. *Physical Review E*, v. 66, n. 6, p. 065102, 2002.

MTOI, Enock T.; MOSES, Ren. Calibration and evaluation of link congestion functions: applying intrinsic sensitivity of link speed as a practical consideration to heterogeneous facility types within urban network. **Journal of Transportation Technologies**, 2014.

NAIEM, Amgad et al. An agent based approach for modeling traffic flow. In: **2010 The 7th International Conference on Informatics and Systems (INFOS)**. IEEE, 2010. p. 1-6.

NEWMAN, Mark EJ. Assortative mixing in networks. **Physical review letters**, v. 89, n. 20, p. 208701, 2002.

PAUL, Abhijit. Understanding the influence of roadway configuration on traffic flows through a conventional traffic-assignment model. **Journal of Transport Literature**, v. 9, n. 2, p. 40-44, 2015.

PERRA, Nicola; FORTUNATO, Santo. Spectral centrality measures in complex networks. **Physical Review E**, v. 78, n. 3, p. 036107, 2008.

PORTA, Sergio; CRUCITTI, Paolo; LATORA, Vito. Multiple centrality assessment in Parma: a network analysis of paths and open spaces. **urban design International**, v. 13, n. 1, p. 41-50, 2008.

PORTA, Sergio; CRUCITTI, Paolo; LATORA, Vito. The network analysis of urban streets: A dual approach. **Physica A: Statistical Mechanics and its Applications**, v. 369, n. 2, p. 853-866, 2006.

PU, Cunlai et al. Traffic-driven SIR epidemic spreading in networks. **Physica A: Statistical Mechanics and its Applications**, v. 446, p. 129-137, 2016.

QIAN, Yongsheng et al. A simulation of the cascading failure of a complex network model by considering the characteristics of road traffic conditions. **Nonlinear Dynamics**, v. 80, n. 1, p. 413-420, 2015.

RAJULA, Hema Sekhar Reddy; MAURI, Matteo; FANOS, Vassilios. Scale-free networks in metabolomics. **Bioinformatics**, v. 14, n. 3, p. 140, 2018.

RODRIGUES, Francisco A. et al. The Kuramoto model in complex networks. **Physics Reports**, v. 610, p. 1-98, 2016.

ROLNIK, Raquel; KLINTOWITZ, Danielle. (Im) Mobility in the city of São Paulo. **Estudos Avançados**, v. 25, n. 71, p. 89-108, 2011.

SABERI, Meead et al. Understanding the impacts of a public transit disruption on bicycle sharing mobility patterns: A case of Tube strike in London. **Journal of Transport Geography**, v. 66, p. 154-166, 2018.

SAKIZ, Fatih; SEN, Sevil. A survey of attacks and detection mechanisms on intelligent transportation systems: VANETs and IoV. *Ad Hoc Networks*, v. 61, p. 33-50, 2017.. <https://doi.org/10.1016/j.adhoc.2017.03.006>

SCARINGELLA, R. S. (2001). A CRISE DA MOBILIDADE URBANA EM SÃO PAULO. *São Paulo em Perspectiva*. <https://doi.org/10.1590/s0102-88392001000100007>

SCOTT, Darren M. et al. Network robustness index: A new method for identifying critical links and evaluating the performance of transportation networks. *Journal of Transport Geography*, v. 14, n. 3, p. 215-227, 2006.

SHARIFI, Ayyoob. Resilient urban forms: A review of literature on streets and street networks. **Building and Environment**, v. 147, p. 171-187, 2019.

SIENKIEWICZ, Julian; HOŁYST, Janusz A. Statistical analysis of 22 public transport networks in Poland. **Physical Review E**, v. 72, n. 4, p. 046127, 2005.

SOHOUEYOU, Philippe YR et al. Using a random road graph model to understand road networks robustness to link failures. **International Journal of Critical Infrastructure Protection**, v. 29, p. 100353, 2020.

STRANO, Emanuele et al. Urban street networks, a comparative analysis of ten European cities. **Environment and Planning B: Planning and Design**, v. 40, n. 6, p. 1071-1086, 2013.

SUN, Xiaoqian; GOLLNICK, Volker; WANDEL, Sebastian. Robustness analysis metrics for worldwide airport network: A comprehensive study. *Chinese Journal of Aeronautics*, v. 30, n. 2, p. 500-512, 2017.

TERO, Atsushi et al. Rules for biologically inspired adaptive network design. **Science**, v. 327, n. 5964, p. 439-442, 2010.

VALDEOLIVAS, Alberto et al. Random walk with restart on multiplex and heterogeneous biological networks. **Bioinformatics**, v. 35, n. 3, p. 497-505, 2019.

VALIANT, Gregory; ROUGHGARDEN, Tim. Braess's paradox in large random graphs. **Random Structures & Algorithms**, v. 37, n. 4, p. 495-515, 2010.

WANG, Shiguang; ZHENG, Lili; YU, Dexin. The improved degree of urban road traffic network: A case study of Xiamen, China. **Physica A: Statistical Mechanics and its Applications**, v. 469, p. 256-264, 2017.

WANG, Wen-Xu; CHEN, Guanrong. Universal robustness characteristic of weighted networks against cascading failure. **Physical Review E**, v. 77, n. 2, p. 026101, 2008.

WATTS, Duncan J.; STROGATZ, Steven H. Collective dynamics of 'small-world' networks. **nature**, v. 393, n. 6684, p. 440-442, 1998.

WU, Jianjun et al. Urban transit system as a scale-free network. **Modern Physics Letters B**, v. 18, n. 19n20, p. 1043-1049, 2004.

WU, Jianjun; GAO, Ziyou; SUN, Huijun. Simulation of traffic congestion with SIR model. **Modern Physics Letters B**, v. 18, n. 30, p. 1537-1542, 2004.

YANG, Xiping et al. Exploring the characteristics of an intra-urban bus service network: a case study of shenzhen, China. **ISPRS International Journal of Geo-Information**, v. 8, n. 11, p. 486, 2019.

YANJUN, W. A. N. G. et al. Measuring the resilience of an airport network. **Chinese Journal of Aeronautics**, v. 32, n. 12, p. 2694-2705, 2019.

ZENG, Guanwen et al. Switch between critical percolation modes in city traffic dynamics. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 116, n. 1, p. 23-28, 2019.

ZENG, Ziling; LI, Taixun. Analyzing congestion propagation on urban rail transit oversaturated conditions: a framework based on SIR Epidemic Model. **Urban Rail Transit**, v. 4, n. 3, p. 130-140, 2018.

ZHANG, Jianhua et al. Networked characteristics of the urban rail transit networks. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, v. 392, n. 6, p. 1538-1546, 2013.

ZHANG, Jianhua; WANG, Shuliang; WANG, Xiaoyuan. Comparison analysis on vulnerability of metro networks based on complex network. **Physica A: Statistical Mechanics and its Applications**, v. 496, p. 72-78, 2018.

ZHANG, Jin-dong et al. Vehicle routing in urban areas based on the oil consumption weight-Dijkstra algorithm. **IET Intelligent Transport Systems**, v. 10, n. 7, p. 495-502, 2016.

ZHANG, Teng; BU, Changjiang. Detecting community structure in complex networks via resistance distance. **Physica A: Statistical Mechanics and its Applications**, v. 526, p. 120782, 2019.

ZHAO, Liang et al. Onset of traffic congestion in complex networks. **Physical Review E**, v. 71, n. 2, p. 026125, 2005.

ZHOU, Jie; LIU, Zonghua; LI, Baowen. Influence of network structure on rumor propagation. **Physics Letters A**, v. 368, n. 6, p. 458-463, 2007.

ZHOU, Yaoming; WANG, Junwei. Efficiency of complex networks under failures and attacks: A percolation approach. **Physica A: Statistical Mechanics and its Applications**, v. 512, p. 658-664, 2018.

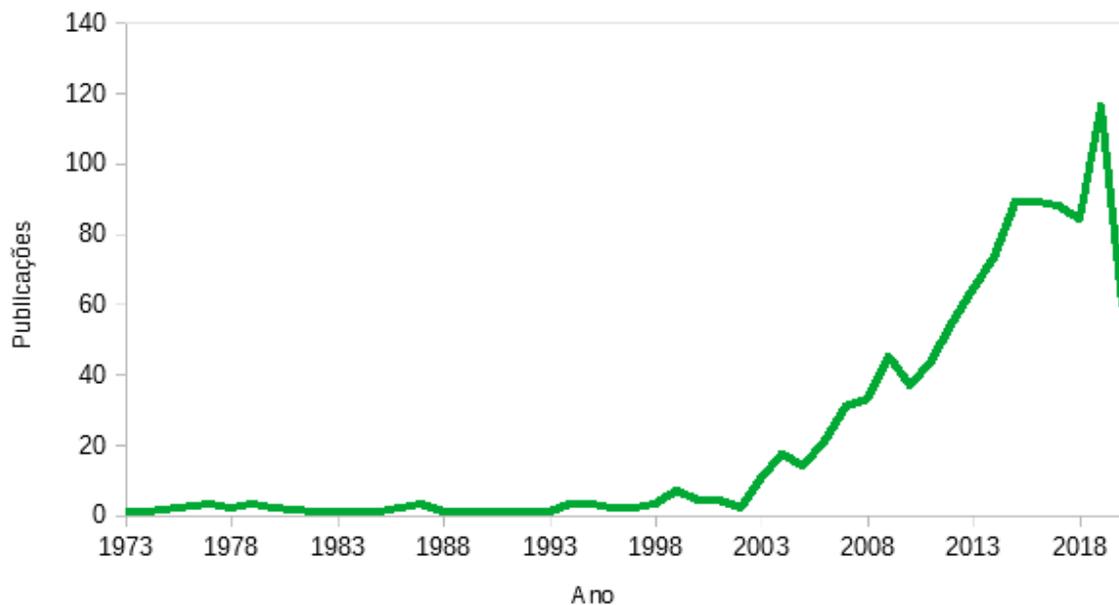
ZILSKE, Michael; NEUMANN, Andreas; NAGEL, Kai. **OpenStreetMap for traffic simulation**. Technische Universität Berlin, 2015.

## 8. APÊNDICES

### 8.1. APÊNDICE A: INFORMAÇÕES BIBLIOMÉTRICAS

O volume de trabalhos sendo publicados ao longo dos anos sobre redes complexas de transporte vem aumentando. Ao pesquisar por “complex” e “transportation networks” na base de dados Scopus, foram selecionados os primeiros artigos mais citados. O gráfico do volume de artigos por ano está presente na Figura 14.

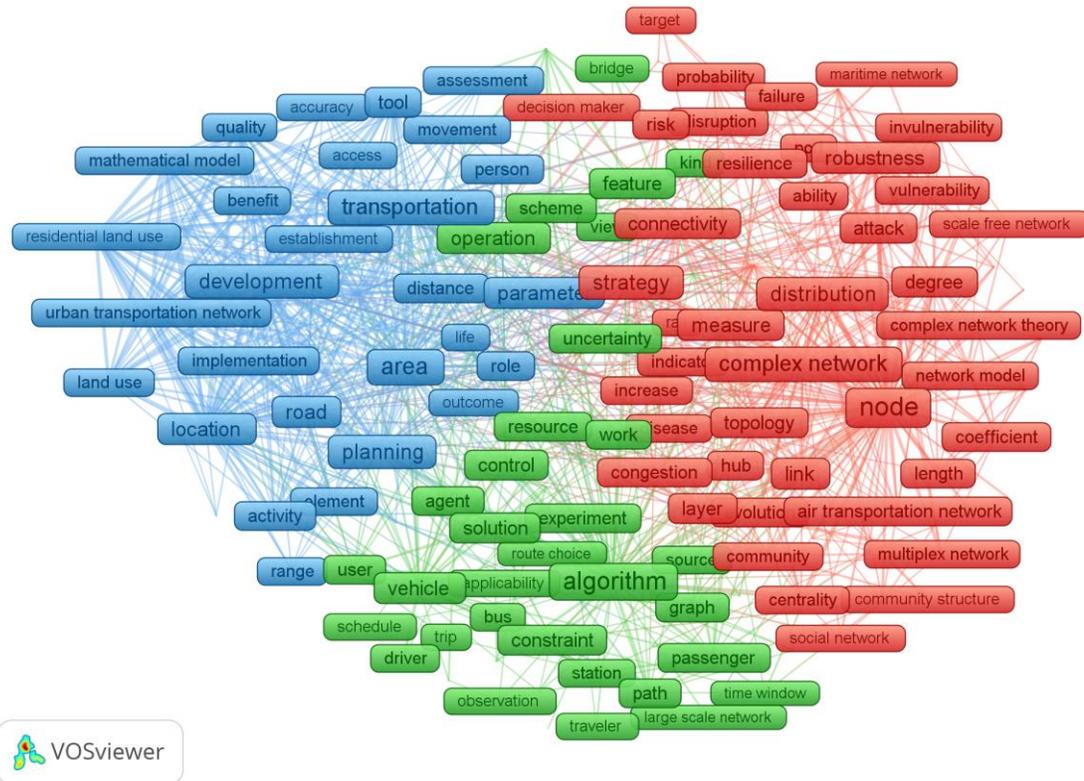
Figura 14 – Volume de artigos publicados por ano com os termos “complex” e “transportation networks”.



Fonte: dos autores.

Observa-se os termos mais presentes nos resumos e palavras-chaves. Os termos, quando presentes em conjunto, passam a ser unidos por um ligamento. Forma-se, então, uma rede de termos que aparecem frequentemente em conjunto. Pode-se dizer até mesmo que a rede formada pelos termos mais citados poderia vir a formar uma rede complexa. A rede formada aparece na Figura 15.

Figura 15 - Rede de termos mais citados na pesquisa pelo termo "redes complexas" no Scopus.



Fonte: dos autores.

Vários dos principais temas relacionados à teoria de redes complexas podem ser observados na Figura 15, com, pelo menos, três clusters ou grupos distintos bem definidos. O conjunto verde apresenta termos que aparentemente estão ligados a modelos de otimização, como “janela de tempo”, “algoritmo”, “experimento”, “schedule”. O cluster vermelho apresenta temas fortemente ligados às aplicações da teoria de redes que encontram espaço tanto na análise de redes de transporte quanto em outros temas, como “centralidade”, “topologia”, “congestionamento”, “distribuição”, “resiliência”, “vulnerabilidade”, “conectividade”, e etc. Há um terceiro cluster, em azul-claro, que aparentemente articula termos correlatos à gestão da rede de transporte, como “qualidade”, “desenvolvimento” e “planejamento”. Alguns dos termos presentes nos clusters serão explicados mais adiante.



## 8.2. APÊNDICE B: INTERVALOS DE CONFIANÇA PARA RESULTADOS DA SIMULAÇÃO

A Tabela 10 apresenta os intervalos de confiança a 5% de significância para todas as variáveis de saída da simulação, exceto a fração de agentes que permanece nos trajetos originais, apenas para valores de  $\sigma$  de 0,1 e 0,5 pois estes são representativos do resto da amostra.

Tabela 10 - Intervalos de confiança para as variáveis de saída da simulação

			São Francisco		São Paulo		Paris	
			inferior	superior	inferior	superior	inferior	superior
delay total	A	0.1	0.8648	0.9269	0.6364	0.6749	1.75	1.7927
	B		0.7892	0.7905	0.7348	0.7373	1.8073	1.8247
	C		2.4656	2.4699	1.5677	1.5779	2.8186	2.8384
CM	A	0.1	1.3921	1.397	1.6874	1.6981	1.3948	1.3978
	B		1.4004	1.4041	1.7017	1.7101	1.4007	1.4052
	C		1.3997	1.4035	1.6929	1.7038	1.4038	1.4081
DMC	A	0.1	3.9714	3.9805	4.9191	4.9313	4.7974	4.8101
	B		3.9961	4.0042	4.9827	4.9946	4.8259	4.835
	C		4.0018	4.0084	4.9526	4.9731	4.8215	4.8322
RTV	A	0.1	1.0927	1.0981	1.1034	1.1092	1.4623	1.4762
	B		1.1235	1.1243	1.1347	1.1445	1.51	1.5161
	C		1.1315	1.1335	1.1426	1.147	1.554	1.5616
TMV	A	0.1	0.0902	0.0906	0.1131	0.114	0.1526	0.1544
	B		0.0947	0.0949	0.118	0.1193	0.1596	0.1604
	C		0.0947	0.0949	0.1189	0.1196	0.1638	0.1648
delay total	A	0.5	3.8497	3.95	2.4217	2.4853	3.8672	4.0363
	B		3.3831	3.3913	2.4615	2.4885	3.8191	3.8372
	C		6.1756	6.185	3.7356	3.7613	5.6549	5.6773
CM	A	0.5	1.4214	1.4263	1.719	1.7294	1.4138	1.4205
	B		1.4371	1.4414	1.744	1.7547	1.4176	1.4207
	C		1.4436	1.4488	1.743	1.753	1.4156	1.4217
DMC	A	0.5	4.0618	4.0792	5.0232	5.0429	4.8619	4.8803
	B		4.1349	4.1438	5.1259	5.1432	4.8955	4.9129
	C		4.129	4.135	5.0816	5.107	4.87	4.8794
RTV	A	0.5	1.3229	1.3345	1.2549	1.2654	1.7221	1.7478
	B		1.3881	1.39	1.3277	1.3357	1.7759	1.7814
	C		1.4708	1.4738	1.3559	1.3649	1.9634	1.9708
TMV	A	0.5	0.1108	0.1118	0.1304	0.1315	0.1825	0.1855
	B		0.1181	0.1184	0.1401	0.1407	0.1912	0.1923
	C		0.1258	0.1261	0.1421	0.1431	0.209	0.2102

Fonte: dos autores.