

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
INSTITUTO DE INFORMÁTICA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM COMPUTAÇÃO

RODRIGO DE ABREU BATISTA

**Combinando Centralidade de  
Intermediação e Demanda de Tráfego para  
Identificação de Pontos Centrais em Redes  
Viárias**

Dissertação apresentada como requisito  
parcial para a obtenção do grau de Mestre em  
Ciência da Computação

Orientador: Prof<sup>ª</sup>. Dra. Ana L. C. Bazzan

Porto Alegre  
2015

## CIP – CATALOGAÇÃO NA PUBLICAÇÃO

Batista, Rodrigo de Abreu

Combinando Centralidade de Intermediação e Demanda de Tráfego para Identificação de Pontos Centrais em Redes Viárias / Rodrigo de Abreu Batista. – Porto Alegre: PPGC da UFRGS, 2015.

85 f.: il.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Programa de Pós-Graduação em Computação, Porto Alegre, BR–RS, 2015. Orientador: Ana L. C. Bazzan.

1. Redes Complexas. 2. Centralidade de Intermediação.  
3. Sistemas Inteligentes de Transporte. I. Bazzan, Ana L. C..  
II. Título.

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

Reitor: Prof. Carlos Alexandre Netto

Vice-Reitor: Prof. Rui Vicente Oppermann

Pró-Reitor de Pós-Graduação: Prof. Vladimir Pinheiro do Nascimento

Diretor do Instituto de Informática: Prof. Luis da Cunha Lamb

Coordenador do PPGC: Prof. Luigi Carro

Bibliotecária-chefe do Instituto de Informática: Beatriz Regina Bastos Haro

*“As you think, so shall you become.”*

— BRUCE LEE

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço à minha família pelo apoio incondicional e por sempre acreditarem em mim. Agradeço à minha mãe, Maria Luzia, ao meu pai, Mario Augusto e à minha namorada, Aline von Muhlen, por compreenderem a minha ausência e estarem incentivando que eu dê mais esse passo. Agradeço aos meus avós Alzírrio, Loeci, Therezinha e Mário Jurandir, que hoje está no oriente eterno, pela educação e cuidado que sempre me proporcionaram, fazendo com que eu sempre estivesse no caminho do bem. Agradeço à professora Ana Lucia Cetertich Bazzan, por ter me orientado nesse trabalho, ao Programa de Pós-Graduação em Computação da UFRGS, por continuar a me fornecer uma educação de qualidade, e a todos os meus colegas do MASLAB, pelas sugestões apontadas, que contribuíram para o desenvolvimento das ideias aqui apresentadas. Todos foram fundamentais para que esse trabalho fosse concluído.

## RESUMO

Esse trabalho consiste em um estudo sobre a aplicabilidade da medida de centralidade de intermediação (*betweenness centrality*) combinada com demandas de tráfego em redes viárias com o objetivo de identificar os principais pontos dessas redes. Como principais pontos refere-se aqui aos que aparecem com maior frequência entre os caminhos utilizados pelos motoristas que se deslocam pela rede viária. Trata-se de um estudo exploratório, que se inicia com a aplicação da centralidade de intermediação sobre redes simples, estendendo-se até simulações sobre redes baseadas em mapas reais.

Nesse trabalho é analisado o comportamento da medida de centralidade sobre a topologia da rede - *i.e.* tanto sem considerar uma demanda, como considerando demandas de diversas magnitudes. Para ilustrar a proposta, os resultados são confrontados com valores de centralidade de intermediação calculados sobre as taxas de ocupação das vias extraídas de simulação microscópica. Ao final, foram apresentadas evidências de que o método proposto consegue explicar os fluxos de tráfego com melhor desempenho do que a centralidade de intermediação original. No entanto, o método mostrou-se muito sensível à função de custo utilizada na atribuição da demanda de tráfego ao grafo da rede.

Os melhores resultados demonstrados pela abordagem proposta foram obtidos em experimentos sobre redes não regulares e com demandas de tráfego não uniformes. No caso de redes regulares com demanda uniforme, o melhor desempenho foi obtido pelo cálculo da centralidade sem considerar a demanda, mas atribuindo-se o custo unitário às arestas do grafo representativo da rede.

**Palavras-chave:** Redes Complexas. Centralidade de Intermediação. Sistemas Inteligentes de Transporte.

## Identifying Central Points in Road Networks using Betweenness Centrality

### ABSTRACT

This work consists of a study of applicability of betweenness centrality combined with traffic demands in road networks with the objective of identifying their central points. By central points we refer to those which appear with high frequency among the paths used by drivers that move along the road network. It is an exploratory study, which begins with the application of the betweenness centrality on simple networks, extending to simulations on networks based on real maps.

In this study we have analyzed the behavior of the metric over the network topology - *i.e.* without considering demand, as well as experiments considering demands with several magnitudes. To illustrate the proposed method, the results are compared with betweenness centrality values calculated over roadways occupation rates extracted from microscopic simulation. At the end, evidence that the proposed method can explain traffic flows with better performance than the original betweenness centrality were presented. However, the proposed method was shown to be very sensitive to the cost function used in the allocation of the graph network traffic demand. The best results demonstrated by the proposed approach were obtained in experiments on non-regular networks and non-uniform traffic demands. In the case of regular networks with uniform demand, the best performance was obtained by calculating the betweenness centrality without considering the demand, but assigning the unitary cost to the edges of the network graph.

**Keywords:** intelligent transportation systems, betweenness centrality, complex networks.

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

BA	Barabási e Albert
CI	Centralidade de Intermediação
DU	Demanda Uniforme
DNUCB	Demanda Não Uniforme tipo Centro→Borda
DNUBC	Demanda Não Uniforme tipo Borda→Centro
ER	Erdős e Rényi
ITS	Intelligent Transportation Systems
OD	Origem-destino
SUMO	Simulation of Urban MObility
WS	Watts e Strogatz

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 Exemplo de rede viária representada como grafo.....	18
Figura 2.2 Exemplo de rede com distritos numerados.....	19
Figura 2.3 Grafo aleatório de Erdős e Rényi: (a) exemplo de grafo ER e (b) distribuição do grau médio sobre 10 redes aleatoriamente geradas com 10.000 vértices usando uma probabilidade $p = 0,2$ (COSTA et al., 2007).....	23
Figura 2.4 Modelo de grafo small-world de Watts e Strogatz: (a) exemplo de rede small-world com $N = 64$ vértices, $k = 2$ , $p = 0,1$ e (b) distribuição do grau médio sobre 10 redes small-world geradas com 10.000 vértices, $k = 25$ e $p = 0,3$ (COSTA et al., 2007). .....	24
Figura 2.5 Demonstração do processo de <i>rewiring</i> para a construção de uma rede small-world. Cada aresta é reestabelecida com uma probabilidade $p$ . Para $p \approx 0$ , a rede é regular, apresentando muitos triângulos e distâncias longas. Para $p \approx 1$ , o grafo resultante apresenta pequenas distâncias entre os vértices e poucos triângulos (COSTA et al., 2007). .....	25
Figura 2.6 (a) Exemplo de rede <i>scale-free</i> de Barabási e Albert e (b) distribuição do grau médio sobre 10 redes BA compostas de 10.000 vértices e usando $m = 5$ (COSTA et al., 2007). .....	26
Figura 4.1 Etapas envolvidas no cálculo da centralidade de intermediação para os vértices da rede usando o método proposto. ....	38
Figura 4.2 Exemplo da influência da função de custo das arestas na distribuição da centralidade de intermediação. ....	40
Figura 4.3 Gráficos das funções $F_1$ (a), $F_2$ (b) e $F_3$ (c) exibindo o custo em relação ao número de viagens. ....	41
Figura 4.4 Etapas envolvidas no cálculo da centralidade de intermediação sobre o grafo ponderado construído a partir da simulação. ....	43
Figura 4.5 Ocupação média das vias da rede Sioux Falls em função do tempo para demanda pico da manhã, com pico de ocupação ocorrendo no passo de tempo 32.671.....	43
Figura 4.6 Etapas envolvidas no cálculo da centralidade de intermediação usando o método proposto e a simulação microscópica. ....	44
Figura 4.7 Redes usadas nos experimentos.....	44
Figura 5.1 Mapa da rede POA <i>Arterials</i> com distritos destacados em azul.....	47
Figura 5.2 Esquema da rede POA <i>Arterials</i> com vértices numerados.....	48
Figura 5.3 Esquema dos distritos da rede POA <i>Arterials</i> , onde quadrados representam distritos que possuem característica majoritária de origens, enquanto que distritos representados por círculos possuem característica majoritária de destinos.....	49
Figura 5.4 Distribuição dos valores de centralidade de intermediação calculados para os vértices da rede POA <i>Arterials</i> com demanda de volume 25% organizados em ordem decrescente.....	50
Figura 5.5 Ocupação média das vias x tempo para Demanda Não Uniforme tipo Bairro→Centro (DNUBC) e volumes iguais a 10% (a), 25% (b) e 50% (c).....	51
Figura 6.1 Esquema da rede <i>Sioux Falls</i> com vértices numerados. ....	58
Figura 6.2 Demandas pico da manhã (a) e pico da tarde (b) utilizadas nos experimentos com a rede <i>Sioux Falls</i> . Os valores foram agrupados em intervalos de 10 minutos.....	59
Figura 6.3 Ocupação média das vias x tempo sobre a rede <i>Sioux Falls</i> para demandas pico manhã (a) e pico tarde (b). ....	61

Figura 7.1 Esquema da grade 10x10 contendo a nomenclatura dos vértices.....	65
Figura 7.2 Divisão da rede em níveis para análise da centralidade de intermediação .....	66
Figura 7.3 Esquema de distritos da grade 10x10. ....	68
Figura 7.4 Ocupação média x tempo obtida pela simulação das demandas não uniformes tipo Borda-Centro sobre a Grade Regular 10x10. ....	68
Figura 7.5 Ocupação média x tempo obtida pela simulação das demandas uniformes so- bre a Grade Regular 10x10. ....	69
Figura 7.6 Ocupação média x tempo obtida pela simulação das demandas não uniformes tipo centro-borda sobre a Grade Regular 10x10. ....	69

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 Exemplo de matriz OD para a rede representada na Figura 2.2.....	20
Tabela 5.1 Centralidade de Intermediação dos vértices da rede POA <i>Arterials</i> . .....	53
Tabela 5.2 Matriz OD utilizada para o caso Não Uniforme tipo Bairro→Centro, onde o índice das linhas referem-se aos distritos de origem, os índices das colunas referem-se aos distritos de destino e o valor das células relacionam origens e destinos representando um coeficiente que corresponde à intensidade com que os veículos fazem essas viagens. ....	54
Tabela 5.3 Valores de centralidade de intermediação da rede POA <i>Arterials</i> para simulação de demanda com volume 25% e funções de custo $F_1$ : Exponencial Decrescente, $F_2$ : $\frac{1}{x}$ , $F_3$ : Linear Decrescente, $F_4$ : Unitária e $F_5$ : Comprimento da Via.....	55
Tabela 5.4 Valores de centralidade de intermediação calculado sobre as taxas de ocupação extraídas a partir de simulações de demandas com volumes 10%, 25% e 50% observadas, respectivamente, nos instantes 6.863, 7.251 e 8.257.....	56
Tabela 5.5 Correlação entre a centralidade de intermediação calculada pelo método proposto, considerando diferentes funções de custo, e sobre o grafo construído com base nos pesos extraídos no pico de ocupação da simulação microscópica realizada sobre a rede POA <i>Arterials</i> . Funções consideradas: $F_1$ : Exponencial Decrescente, $F_2$ : $\frac{1}{x}$ , $F_3$ : Linear Decrescente, $F_4$ : Unitária e $F_5$ : Comprimento da Via.....	57
Tabela 6.1 Centralidade de intermediação por vértice calculada utilizando diferentes funções de custo e simulação sobre a rede <i>Sioux Falls</i> com demanda pico da manhã. Os cinco maiores valores de cada caso estão destacados. Funções consideradas: $F_1$ : Exponencial Decrescente, $F_2$ : $\frac{1}{x}$ , $F_3$ : Linear Decrescente, $F_4$ : Unitária e $F_5$ : Comprimento da Via.....	60
Tabela 6.2 Centralidade de intermediação por vértice calculada utilizando diferentes funções de custo e simulação sobre a rede <i>Sioux Falls</i> com demanda pico da tarde. Os cinco maiores valores de cada caso estão destacados. Funções consideradas: $F_1$ : Exponencial Decrescente, $F_2$ : $\frac{1}{x}$ , $F_3$ : Linear Decrescente, $F_4$ : Unitária e $F_5$ : Comprimento da Via.....	63
Tabela 6.3 Correlação entre a centralidade de intermediação calculada pelo método proposto, considerando diferentes funções de custo, e sobre o grafo construído com base nos pesos extraídos no pico de ocupação da simulação microscópica realizada sobre a rede <i>Sioux Falls</i> . Funções consideradas: $F_1$ : Exponencial Decrescente, $F_2$ : $\frac{1}{x}$ , $F_3$ : Linear Decrescente, $F_4$ : Unitária e $F_5$ : Comprimento da Via. ....	64
Tabela 7.1 Média da centralidade de intermediação de cada nível .....	66
Tabela 7.2 Valores de centralidade de intermediação de cada vértice considerando todas as arestas com o mesmo custo. Os maiores valores de centralidade ocorrem no centro da grade e estão em destaque. ....	67
Tabela 7.3 Correlação entre a centralidade de intermediação calculada pelo método proposto, considerando diferentes funções de custo, e sobre o grafo construído com base nos pesos extraídos no pico de ocupação da simulação microscópica realizada sobre a Grade Regular 10x10. Funções consideradas: $F_1$ : Exponencial Decrescente, $F_2$ : $\frac{1}{x}$ , $F_3$ : Linear Decrescente, $F_4$ : Unitária e $F_5$ : Comprimento da Via. ....	70

Tabela 7.4 Correlação entre a centralidade de intermediação calculada pelo método proposto e simulação microscópica realizada sobre a Grade Regular 10x10 com as rotas da demanda calculadas por <i>one-shot assignment</i> . Funções consideradas: $F_1$ : Exponencial Decrescente, $F_2$ : $\frac{1}{x}$ , $F_3$ : Linear Decrescente, $F_4$ : Unitária e $F_5$ : Comprimento da Via. ....	71
Tabela 8.1 Correlação utilizando o método de Pearson entre a centralidade de intermediação calculada pelo método proposto, considerando diferentes funções de custo, e sobre o grafo construído com base nos pesos extraídos no pico de ocupação da simulação microscópica. Funções consideradas: $F_1$ : Exponencial Decrescente, $F_2$ : $\frac{1}{x}$ , $F_3$ : Linear Decrescente, $F_4$ : Unitária e $F_5$ : Comprimento da Via.....	74
Tabela 8.2 Correlação de Pearson e Valor-p entre a centralidade de intermediação calculada pelo método proposto, considerando diferentes funções de custo, e sobre o grafo construído com base nos pesos extraídos no pico de ocupação da simulação microscópica cada caso. Funções consideradas: $F_1$ : Exponencial Decrescente, $F_2$ : $\frac{1}{x}$ , $F_3$ : Linear Decrescente, $F_4$ : Unitária e $F_5$ : Comprimento da Via. ....	78
Tabela 8.3 Correlação de Kendall e Valor-p entre a centralidade de intermediação calculada pelo método proposto, considerando diferentes funções de custo, e sobre o grafo construído com base nos pesos extraídos no pico de ocupação da simulação microscópica cada caso. Funções consideradas: $F_1$ : Exponencial Decrescente, $F_2$ : $\frac{1}{x}$ , $F_3$ : Linear Decrescente, $F_4$ : Unitária e $F_5$ : Comprimento da Via. ....	80
Tabela 8.4 Adequação das funções de custo a cada combinação de tipo de rede e demanda. Funções consideradas: $F_1$ : Exponencial Decrescente, $F_2$ : $\frac{1}{x}$ , $F_3$ : Linear Decrescente, $F_4$ : Unitária e $F_5$ : Comprimento da Via.....	81

## LISTA DE ALGORITMOS

1	Centralidade de Intermediação considerando a demanda.....	42
---	---	----

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>15</b>
<b>1.1 Objetivos</b> .....	<b>15</b>
<b>1.2 Organização dos Capítulos</b> .....	<b>16</b>
<b>2 REFERENCIAL TEÓRICO</b> .....	<b>17</b>
<b>2.1 Redes Viárias</b> .....	<b>17</b>
<b>2.2 Demanda de Tráfego</b> .....	<b>18</b>
2.2.1 Distrito .....	18
2.2.2 Matriz de Origem e Destino.....	19
2.2.3 Volume de Demanda .....	19
2.2.4 Rotas .....	21
2.2.5 Formalização do Problema .....	22
<b>2.3 Redes Complexas</b> .....	<b>22</b>
2.3.1 Algumas medidas que caracterizam redes complexas .....	22
2.3.2 Modelos de Redes Complexas .....	23
2.3.2.1 Grafo aleatório de Erdős e Rényi.....	23
2.3.2.2 Redes <i>Small-World</i> .....	24
2.3.2.3 Redes <i>Scale-Free</i> .....	25
<b>2.4 Centralidade de Intermediação</b> .....	<b>26</b>
<b>2.5 SUMO - Simulação de Mobilidade Urbana</b> .....	<b>27</b>
<b>2.6 Conclusão</b> .....	<b>28</b>
<b>3 TRABALHOS RELACIONADOS</b> .....	<b>30</b>
<b>3.1 Transporte Privado</b> .....	<b>30</b>
<b>3.2 Transporte Público</b> .....	<b>34</b>
<b>3.3 Conclusão</b> .....	<b>36</b>
<b>4 MÉTODOS</b> .....	<b>38</b>
<b>4.1 Abordagem Proposta</b> .....	<b>38</b>
4.1.1 Atribuição de Custos às Arestas do Grafo .....	39
4.1.2 Centralidade de Intermediação considerando a Demanda de Tráfego.....	42
<b>4.2 Centralidade de Intermediação Sobre os Resultados da Simulação Microscópica</b> ...	<b>42</b>
<b>4.3 Comparação entre o Método Proposto e a Simulação Microscópica</b> .....	<b>43</b>
<b>4.4 Definição dos Experimentos</b> .....	<b>44</b>
4.4.1 Modelagem da Demanda .....	45
4.4.2 Geração das Rotas.....	45
<b>4.5 Conclusão</b> .....	<b>45</b>
<b>5 EXPERIMENTO 1 - POA ARTERIALS</b> .....	<b>47</b>
<b>5.1 Análise da Rede com Centralidade de Intermediação</b> .....	<b>47</b>
<b>5.2 Modelagem da Demanda</b> .....	<b>48</b>
<b>5.3 Análise da Rede com Centralidade de Intermediação combinada com a Demanda</b> .	<b>49</b>
<b>5.4 Comparação entre o Método Proposto e a Simulação Microscópica</b> .....	<b>50</b>
<b>5.5 Conclusão</b> .....	<b>52</b>
<b>6 EXPERIMENTO 2 - SIOUX FALLS</b> .....	<b>58</b>
<b>6.1 Modelagem da Demanda</b> .....	<b>58</b>
<b>6.2 Análise da Rede com Centralidade de Intermediação combinada com a Demanda</b> .	<b>59</b>
<b>6.3 Comparação entre o Método Proposto e a Simulação Microscópica</b> .....	<b>60</b>
<b>6.4 Conclusão</b> .....	<b>62</b>
<b>7 EXPERIMENTO 3 - GRADE REGULAR 10X10</b> .....	<b>65</b>
<b>7.1 Análise da Rede com Centralidade de Intermediação</b> .....	<b>65</b>
<b>7.2 Modelagem da Demanda</b> .....	<b>66</b>

<b>7.3</b>	<b>Comparação entre o Método Proposto e a Simulação Microscópica</b>	<b>67</b>
<b>7.4</b>	<b>Conclusão</b>	<b>70</b>
<b>8</b>	<b>ANÁLISE DOS RESULTADOS</b>	<b>73</b>
<b>8.1</b>	<b>Análise dos Resultados de POA <i>Arterials</i></b>	<b>73</b>
<b>8.2</b>	<b>Análise dos Resultados de <i>Sioux Falls</i></b>	<b>74</b>
<b>8.3</b>	<b>Análise dos Resultados de Grade Regular 10x10</b>	<b>75</b>
<b>8.4</b>	<b>Análise de Significância dos Resultados</b>	<b>76</b>
8.4.1	Análise Baseada no Coeficiente de Correlação Produto-Momento de Pearson	76
8.4.2	Análise Baseada no Coeficiente de Correlação de Kendall	79
<b>8.5</b>	<b>Recomendação de Uso das Funções</b>	<b>81</b>
<b>9</b>	<b>CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS</b>	<b>82</b>
	<b>REFERÊNCIAS</b>	<b>84</b>

## 1 INTRODUÇÃO

As metrópoles brasileiras enfrentam atualmente grandes problemas de mobilidade urbana, originados, sobretudo, da opção pelo transporte privado em detrimento ao transporte público. Segundo balanço do Denatran<sup>1</sup> realizado em agosto de 2014, o Brasil contava nessa data com 78,1 milhões de veículos privados, incluindo nessa categoria automóveis, caminhonetes, camionetas, motocicletas e motonetas. Isso significa que nos últimos dez anos o país presenciou um aumento de 229,3% em sua frota de veículos.

Considerando a projeção da população brasileira, segundo o IBGE<sup>2</sup>, o Brasil conta atualmente com cerca de 203,3 milhões de habitantes. Isso significa que existe um veículo privado para cada 2,6 habitantes. Lidar com tantos veículos requer, portanto, o devido planejamento do sistema viário somado a mecanismos e estratégias para amenizar os efeitos do tráfego sobre a população e meio ambiente.

O planejamento de sistemas de transporte envolve, entre outros fatores, a análise da distribuição dos fluxos de veículos sobre as redes viárias. Essa é uma atividade essencial tanto para criação quanto para a expansão, manutenção e criação de políticas sobre essas redes, uma vez que a construção de novas vias, sem a devida análise, não garante necessariamente uma melhoria na qualidade do trânsito.

Existem evidências de que a medida de centralidade de intermediação (betweenness centrality), proposta por Freeman (1977), pode ser utilizada para explicar os fluxos de tráfego em redes viárias. No entanto, a centralidade de intermediação tradicional precisa ser adaptada por não representar adequadamente os fluxos de tráfego (KAZERANI; WINTER, 2009a; GAO et al., 2013; GALAFASSI; BAZZAN, 2013). A abordagem apresentada neste trabalho fornece uma proposta diferente para o problema apresentado. Nessa abordagem, assume-se que é conhecida a demanda que será aplicada sobre a rede e, com o auxílio da centralidade de intermediação, busca-se identificar os pontos que recebem maiores volumes de tráfego.

### 1.1 Objetivos

O objetivo deste trabalho é analisar como a centralidade de intermediação pode ser adaptada e utilizada na identificação de pontos centrais em redes viárias. A identificação desses pontos pode auxiliar os planejadores de tráfego ao apontar quais pontos da rede recebem maiores volumes de tráfego, para que possam, então, trabalhar visando a melhoria ou a busca por soluções

---

<sup>1</sup>Disponível em: <<http://www.denatran.gov.br/frota2014.htm>>

<sup>2</sup>Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br/>>

alternativas. Este trabalho estende o estudo desenvolvido por Galafassi e Bazzan (2013), ao propor uma adaptação da medida de centralidade de intermediação combinada a demandas de tráfego que são atribuídas através de diferentes funções de custo. A fim de testar a técnica proposta, são utilizadas simulações microscópicas das demandas sobre as redes, de onde são extraídas as taxas de ocupação das vias que servirão como base de comparação.

## 1.2 Organização dos Capítulos

Este trabalho está organizado da seguinte maneira:

**Capítulo 1** Introduce o tema abordado ao longo desse trabalho, a motivação, os objetivos e a organização;

**Capítulo 2** Apresenta os conceitos relacionados a redes viárias, tais como a representação através de grafos, demanda de tráfego, matriz origem-destino, geração de rotas, modelos de redes complexas e a centralidade de intermediação. Nesse capítulo também é apresentado o simulador SUMO, utilizado como base de comparação para a técnica proposta;

**Capítulo 3** Apresenta os trabalhos relacionados à aplicabilidade da centralidade de intermediação sobre redes viárias, classificados em transporte privado e transporte público.

**Capítulo 4** Apresenta a abordagem proposta, detalhando como é realizada a atribuição da demanda a uma rede viária, o cálculo da centralidade de intermediação e como é feita a comparação com a simulação microscópica. Nesse capítulo também são apresentados os experimentos realizados para testar a técnica proposta;

**Capítulo 5** Descreve a demanda, a rede e a análise baseada na centralidade de intermediação sem considerar uma demanda de tráfego e considerando demandas de tráfego, para os experimentos realizados sobre a rede POA *Arterials*;

**Capítulo 6** Descreve a estrutura e os resultados obtidos para os experimentos realizados sobre a rede *Sioux Falls*;

**Capítulo 7** Descreve a estrutura e os resultados obtidos para os experimentos realizados sobre a Grade Regular 10x10;

**Capítulo 8** Apresenta uma análise geral dos resultados obtidos a partir dos experimentos e traça algumas observações relacionadas à métrica proposta, além de detalhar a análise de significância realizada através dos coeficientes de correlação de Pearson e de Kendall;

**Capítulo 9** Apresenta as conclusões sobre os resultados e a contribuição desse trabalho, além de sugerir possíveis extensões como trabalhos futuros.

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

Os trabalhos relacionados a este estudo e a abordagem proposta, desenvolvida no Capítulo 4, baseiam-se nas áreas de redes complexas e Sistemas Inteligentes de Transporte (*Intelligent Transportation Systems, ITS*) exigindo, portanto, a prévia introdução de alguns conceitos. A Seção 2.1 apresenta como as redes viárias podem ser vistas e modeladas como grafos. A Seção 2.2 aborda os conceitos de demanda de tráfego, matriz de origem-destino, como são definidos os volumes de demanda e como se dá o cálculo de rotas. A Seção 2.3 introduz as redes complexas, algumas medidas utilizadas na análise de redes, três modelos clássicos de redes complexas e a medida de centralidade de intermediação. A Seção 2.4 define a medida de centralidade de intermediação, adotada neste estudo na identificação de pontos centrais em redes viárias. A Seção 2.5 apresenta o simulador SUMO, utilizado para simular a demanda sobre as redes viárias definidas nos experimentos realizados e de onde são extraídas as taxas de ocupação que servirão de base de comparação com a técnica proposta. Por fim, Seção 2.6 apresenta as conclusões relacionadas aos tópicos apresentados nesse capítulo.

### 2.1 Redes Viárias

Redes viárias podem ser vistas como redes compostas por rodovias e por junções entre rodovias (*e.g.* cruzamentos, entroncamentos). Tais redes são tipicamente representadas como grafos direcionados valorados  $G(V, E)$ , compostos por um conjunto  $V$  de vértices (ligações), conjunto  $E$  de arestas (rodovias) e uma função de custo  $C(e)$  que associa um peso a cada aresta. Para o âmbito de redes de trânsito, são comumente utilizados como peso das arestas o comprimento, o tempo de viagem e a capacidade.

A Figura 2.1 exhibe um exemplo de uma rede representada como um grafo direcionado valorado contendo 12 vértices e 24 arestas, todas com peso igual a 10. As arestas direcionadas são mapeadas para os sentidos da rodovia, e os valores associados às mesmas podem representar alguma variável do domínio que está sendo modelado (*e.g.* comprimento da via).

Nos experimentos realizados ao longo desse estudo, a função de custo  $C(e)$  foi estendida para  $C(e, k)$ , onde  $e$  refere-se à aresta e  $k$  refere-se à quantidade de viagens associada à mesma. Adicionalmente, pode-se desejar estender a função de custo para  $C(e, k, t)$  a fim de torná-la dinâmica em função do tempo, tornando possível modelar, por exemplo, a variação no volume de tráfego ao longo do dia.

Para casos onde existem mais de uma faixa de rolamento em uma mesma pista, a função de custo também pode sofrer modificações para contemplar tal característica. A quantidade de

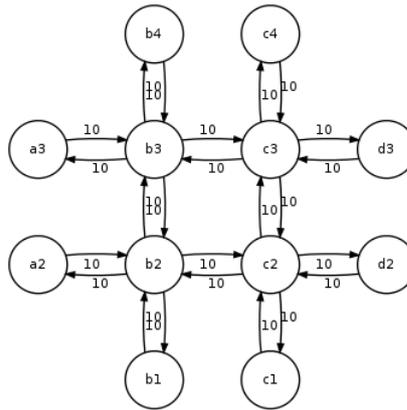


Figura 2.1: Exemplo de rede viária representada como grafo.

faixas de rolamento pode ser importante quando são utilizadas medidas como a capacidade ou a vazão da rodovia. Em casos onde se considera apenas a distância percorrida na rede, é possível ignorar a quantidade de pistas.

## 2.2 Demanda de Tráfego

Uma demanda de tráfego, referenciada a partir daqui apenas como demanda, representa o comportamento dos usuários no uso da infraestrutura da rede. Por comportamento, entende-se aqui as decisões tomadas pelos usuários que são relevantes para o problema que está sendo modelado (*e.g.* escolhas de rotas). Se por um lado a infraestrutura da rede pode ser considerada fixa, a demanda possui um aspecto dinâmico, podendo ser frequentemente alterada para descrever o comportamento dos motoristas. Desse modo, os fluxos de veículos observados no início do dia, podem não ser os mesmos que os observados ao final do dia, fazendo com que o problema exija modelagens distintas. As próximas subseções tratam de formalizações auxiliares à especificação de demandas.

### 2.2.1 Distrito

Em se tratando de modelagem de demanda, localidades de origem e destino são agregadas em distritos. Distritos, ou zonas, podem ser definidos baseando-se em informações obtidas através de pesquisas sociodemográficas, dados de georreferenciamento, estatística urbana, etc. Uma observação importante ao definir um distrito é que as variações socioeconômicas dentro de um mesmo distrito devem ser as menores possíveis, enquanto que entre distritos diferentes é possível esperar que existam maiores variações (BAZZAN; KLÜGL, 2013).

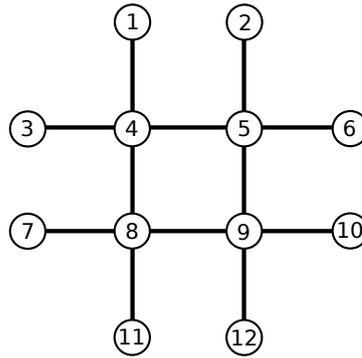


Figura 2.2: Exemplo de rede com distritos numerados.

Os distritos estão associados a uma localização dentro da rede, podendo esses agirem como origens ou destinos das viagens realizadas na mesma. Um distrito refere-se, portanto, a um ou mais vértices da rede sendo um subconjunto disjunto de vértices, isto é, sem que haja sobreposição desse com os outros distritos.

### 2.2.2 Matriz de Origem e Destino

Em transportes, a demanda de uma rede é comumente representada por uma matriz que relaciona origens, destinos e volumes de viagens realizadas pelos usuários da rede. Por relacionar origens e destinos, é chamada de matriz origem-destino, ou matriz OD. A construção dessa matriz pode ser baseada em medição, dados coletados a partir de sensores ou ainda definida empiricamente para a realização de experimentos.

A Figura 2.2 exibe um exemplo de rede com distritos numerados de 1 a 12. Nessa rede, usuários partem de determinados distritos de origem indo em direção a distritos de destino. A necessidade de deslocamento de um grupo de usuários sobre essa rede poderia, por exemplo, ser representada pela Tabela 2.1. Nessa matriz, onde as linhas representam os distritos de origem e as colunas representam os distritos de destino, o valor presente nas células representa a quantidade de usuários que fazem essa viagem. Nesse exemplo, 56 motoristas viajam do distrito 3 para o distrito 10, enquanto que 0 viajam do distrito 10 para o distrito 3.

### 2.2.3 Volume de Demanda

A matriz OD especifica a ocorrência das viagens, relacionando pares de distritos correspondentes a origens e destinos dentro de uma rede. Os valores especificados na matriz OD podem corresponder a valores absolutos da frequência de viagens entre os diferentes distritos, ou a

Tabela 2.1: Exemplo de matriz OD para a rede representada na Figura 2.2.

	1	2	3	...	10	11	12
1	0	1	0	...	7	2	0
2	2		0	...	0	0	
3		0	8	...	56	0	
...	...	...	...	...	...	...	...
10	10	7	0	...	2	0	10
11	11	19	0	...	0	5	23
12	9	10	0	...	21	14	0

coeficientes que ponderam a intensidade de ocorrência dessas viagens. No que se refere à modelagem de demanda, tratar os valores da matriz OD como coeficientes fornece a possibilidade de dimensionar o volume da demanda de acordo com um fator. Isso torna possível especificar diferentes volumes de demanda a serem aplicados sobre uma mesma rede, sem a necessidade da criação de diferentes matrizes OD.

O cálculo do volume da demanda é realizado considerando a capacidade total da rede  $T(G)$ , que pode ser realizada somando-se a capacidade individual de cada aresta  $e \in E$ , conforme a Equação 2.1. A capacidade total da aresta  $T(e)$  pode ser obtida calculando-se quantos veículos cabem fisicamente na via e deve considerar o comprimento da via, a quantidade de pistas e o tamanho médio de um veículo.

$$T(G(V, E)) = \sum_{e \in E} T(e) \quad (2.1)$$

Quando se opta por especificar na matriz OD os coeficientes relativos à intensidade com que ocorrem os fluxos entre origens e destinos, faz-se necessário o cálculo de um fator para a especificação de uma demanda de volume  $x\%$  da capacidade da rede. Uma vez calculada a capacidade total da rede, calcula-se um fator  $f$  de acordo com a função descrita na Equação 2.2, onde  $x$  é um coeficiente que corresponde ao percentual da capacidade total da rede,  $T$  é a capacidade total da rede e  $OD(i, j)$  refere-se à linha  $i$  e coluna  $j$  da matriz OD.

$$f(x) = \frac{x.T}{\sum_{ij} OD(i, j)} \quad (2.2)$$

### 2.2.4 Rotas

Enquanto a matriz OD especifica apenas os distritos de origem e destino de cada viagem, é preciso calcular os caminhos que os motoristas percorrerão dentro da rede. Um usuário que deseja realizar a viagem de  $s$  até  $t$ , representada por  $(s, t)$ , pode encontrar mais de um caminhos que o levam de sua origem até seu destino. Cada um desses possíveis caminhos, representados por uma sequência de arestas, recebe o nome de rota. Uma vez que cada uma das arestas possui um custo associado (Subseção 4.1.1), existe um interesse particular no caminho de menor custo, no âmbito de trânsito poderia se tratar do caminho de menor comprimento ou de menor tempo de viagem.

A geração das rotas consiste, portanto, na associação de rotas às viagens especificadas pela matriz OD. No estudo em questão, o interesse está exclusivamente nos caminhos de menor comprimento, assumindo-se que os motoristas agem tentando minimizar suas distâncias e tempos de viagem. Um dos algoritmos clássicos que pode ser utilizado para o cálculo de caminhos mínimos é o algoritmo de *Dijkstra* (DIJKSTRA, 1959).

Além disso, outros algoritmos clássicos como *Bellman-Ford* (BELLMAN, 1958; FORD, 1956) e *Floyd-Warshall* (FLOYD, 1962; WARSHALL, 1962) podem ser utilizados para resolver problemas relacionados à minimização de custos sobre caminhos em redes. O algoritmo de *Dijkstra* é utilizado para calcular os caminhos mínimos de um vértice para todos os demais vértices de uma rede e não pode ser aplicado a grafos que contenham arestas de custos negativos. Os algoritmos de *Floyd-Warshall* e *Bellman-Ford*, por outro lado, permitem arestas com custos positivos e negativos, mas falham em casos onde existam ciclos negativos, ou seja, ciclos em que a soma das arestas é um número negativo. O problema com ciclos negativos está no fato de que é possível obter um caminho de custo tão baixo quanto se queira, uma vez que se pode utilizar o mesmo ciclo inúmeras vezes na obtenção de um custo cada vez menor. Para esses casos, tanto o algoritmo de *Floyd-Warshall* quanto o de *Bellman-Ford* podem ser utilizados na detecção desses ciclos.

Uma vez calculadas as rotas para as viagens especificadas na matriz OD de acordo com o volume especificado - matriz OD multiplicada pelo fator de escala da demanda (Subseção 2.2.3) -, é possível contabilizar a quantidade de rotas que passam por cada aresta. Essa contabilização é um procedimento fundamental para atribuição dos custos às arestas, que será vista no Capítulo 4.

### 2.2.5 Formalização do Problema

Dada uma demanda  $D$ , composta de um conjunto de viagens que serão feitas pelos motoristas, e uma rede  $G$ , representando a estrutura física de uma rede viária, deseja-se identificar os pontos centrais em  $G$  em relação a essa demanda. Cada entrada  $d \in D$  é representada por um par  $(s, t)$ , que  $S$  corresponde à origem e  $t$  ao destino da viagem. Para cada entrada  $d \in D$  é calculada uma rota  $R(d)$ , composta de uma lista de arestas que levarão o motorista de  $s$  até  $t$ .

A rede  $G$  é composta por um conjunto de arestas  $E$ , correspondentes às vias, um conjunto de vértices  $V$ , representando as junções, e uma função  $C(e)$  que atribui um valor de custo a cada aresta. A função  $C(e, k)$ , que estende a função  $C(e)$ , calcula o custo de uma aresta considerando a quantidade total de viagens  $k$  que passa pela aresta  $e$ . Desta forma, deseja-se identificar quais vértices  $v \in V$  são centrais ao ser considerada a aplicação da demanda  $D$  sobre  $G$ .

## 2.3 Redes Complexas

O estudo de redes complexas é caracterizado por ser uma área situada na interseção entre a teoria dos grafos e a mecânica estatística, o que lhe confere um caráter multidisciplinar. Trata-se da derivação de redes a partir de dados reais, representadas através de grafos, que podem ser exploradas utilizando-se de todo o ferramental já desenvolvido pela teoria dos grafos. No caso de redes viárias, o peso das arestas pode ser utilizado para representar, por exemplo, o comprimento ou a capacidade da via, a velocidade média no trecho, ou ainda o tempo necessário para percorrê-la.

As subseções a seguir estão estruturadas da seguinte forma: a Subseção 2.3.1 apresenta algumas medidas básicas necessárias para a análise de redes complexas e a Subseção 2.3.2 apresenta modelos de redes complexas conhecidos, relacionando as propriedades que caracterizam cada um.

### 2.3.1 Algumas medidas que caracterizam redes complexas

Antes de dar prosseguimento aos conceitos relacionados às redes complexas, cabe aqui definir algumas medidas básicas relacionadas a grafos e que são úteis na análise de redes:

**Grau (*Degree*)** O grau de um vértice refere-se a quantas arestas estão ligadas a ele. Trata-se de uma contagem simples, podendo considerar apenas ao número de arestas que chegam no vértice (*in-degree*) ou o número de arestas que partem do vértice (*out-degree*);

**Grau médio** O grau médio de uma rede refere-se a média dos graus dos vértices da rede;

**Diâmetro** O diâmetro de um grafo corresponde ao tamanho do maior caminho dentre os caminhos mínimos entre todas as combinações de vértices da rede.

## 2.3.2 Modelos de Redes Complexas

### 2.3.2.1 Grafo aleatório de Erdős e Rényi

O grafo aleatório desenvolvido por Rapoport (1951) e, independentemente, por Erdős e Rényi (1959) pode ser considerado o modelo mais básico de rede complexa. Consiste basicamente em gerar-se  $n$  vértices e adicionar-se  $m$  arestas aleatoriamente, evitando duplicatas e conexões onde a origem e o destino ocorram no mesmo vértice. Em 1959, Erdős e Rényi introduziram um modelo para gerar grafos aleatórios consistindo de  $n$  vértices e  $l$  arestas, onde o modelo é inicializado com  $n$  vértices desconectados e são criadas conexões entre os pares de vértices com probabilidade  $p$ . Esse grafo é conhecido como modelo Erdős-Rényi (ER) e a Figura 2.3a apresenta um exemplo de grafo gerado a partir desse modelo. A Figura 2.3b apresenta a distribuição média do grau dos vértices sobre um conjunto de 10 redes ER formadas por 10.000 vértices e probabilidade  $p = 0,2$ .

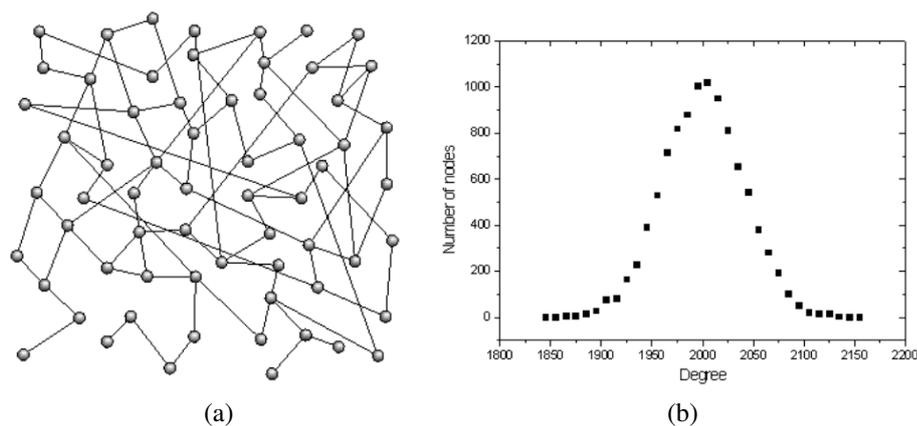


Figura 2.3: Grafo aleatório de Erdős e Rényi: (a) exemplo de grafo ER e (b) distribuição do grau médio sobre 10 redes aleatoriamente geradas com 10.000 vértices usando uma probabilidade  $p = 0,2$  (COSTA et al., 2007).

### 2.3.2.2 Redes Small-World

Watts e Strogatz (1998) observaram que muitas redes reais apresentam a característica de que a maioria dos vértices são alcançados a partir de outros vértices através de um pequeno número de arestas, propriedade essa que ficou conhecida como *small-world* (mundo pequeno). Tal característica aparece frequentemente no âmbito de redes sociais, onde qualquer pessoa do mundo pode ser alcançada a partir de um pequeno número de contatos. Nesse tipo de rede, outra propriedade frequentemente encontrada é a presença de um grande número de ciclos de tamanho 3. Em teoria dos grafos, um ciclo é um caminho dentro do grafo de tamanho mínimo três, em que o primeiro e último vértices coincidem, mas nenhum outro vértice é repetido. O modelo mais comum de rede aleatória com a propriedade *small-world* e pequenos ciclos foi desenvolvido por Watts e Strogatz, e ficou conhecido como modelo *small-world* de Watts-Strogatz (WS). A Figura 2.4a exibe um exemplo de rede *small-world* de Watts-Strogatz, enquanto a Figura 2.4b exibe a distribuição média do grau dos vértices sobre um conjunto de 10 redes WS formadas por 10.000 vértices,  $k = 25$  e  $p = 0,3$ .

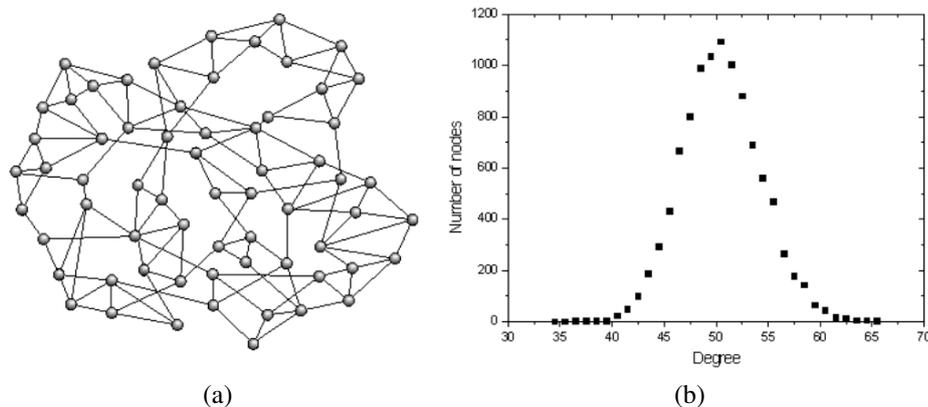


Figura 2.4: Modelo de grafo small-world de Watts e Strogatz: (a) exemplo de rede small-world com  $N = 64$  vértices,  $k = 2$ ,  $p = 0,1$  e (b) distribuição do grau médio sobre 10 redes small-world geradas com 10.000 vértices,  $k = 25$  e  $p = 0,3$  (COSTA et al., 2007).

Para se construir uma rede WS-*small-world*, inicia-se a partir de uma estrutura circular de vértices, ligando cada um aos seus  $k$  vizinhos próximos em cada direção, totalizando  $2k$  conexões, onde  $N \gg k \gg \log(N) \gg 1$ . Em seguida, cada aresta é aleatoriamente trocada com probabilidade  $p$ . O efeito de  $p = 0$  gera uma rede com um alto número de ciclos, mas com grandes distâncias entre os vértices, enquanto que  $p \rightarrow 1$  torna a rede aleatória, mas com poucos ciclos. No trabalho de Watts e Strogatz (1998) é mostrado que, para uma situação

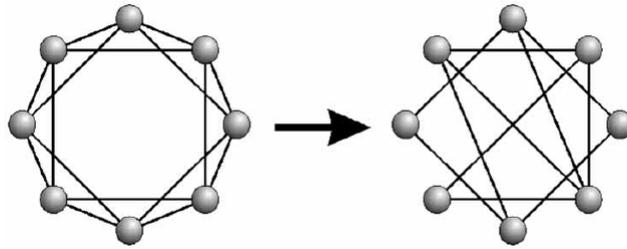


Figura 2.5: Demonstração do processo de *rewiring* para a construção de uma rede small-world. Cada aresta é reestabelecida com uma probabilidade  $p$ . Para  $p \approx 0$ , a rede é regular, apresentando muitos triângulos e distâncias longas. Para  $p \approx 1$ , o grafo resultante apresenta pequenas distâncias entre os vértices e poucos triângulos (COSTA et al., 2007).

intermediária, pequenas distâncias e um grande número de ciclos estão presentes. A Figura 2.5 exibe a construção da rede antes e após a troca de arestas, processo que recebe o nome de *relição* (*rewiring*).

### 2.3.2.3 Redes Scale-Free

Barabási e Albert (1999) demonstraram que a distribuição do grau dos vértices de muitos sistemas reais é caracterizada por uma distribuição desigual dos graus dos vértices. Diferente dos modelos Erdős-Rényi e Watts-Strogatz, onde as redes apresentavam padrões de conexões aleatórias, mas com um grau médio de vértices característico, Barabási e Albert observaram que muitos sistemas reais apresentam poucos vértices com alto grau, enquanto que muitos possuíam baixo grau (COSTA et al., 2007). A partir disso, observou-se que tais redes não apresentavam um grau característico, mas seguiam uma lei de potência (*power law*), conforme a Equação 2.3.

$$P(k) \sim k^{-\gamma} \quad (2.3)$$

Desta forma, redes que seguem o modelo Barabási-Albert (BA) apresentam como característica a existência de poucos vértices altamente conectados, denominados *hubs*. A Figura 2.6a exibe um exemplo de rede Barabási-Albert, enquanto a Figura 2.6b exibe a distribuição média dos graus. Conforme constatado por Barabási e Bonabeau (2003), tais padrões podem ser observados em diversos sistemas, como por exemplo as páginas da Internet e redes de citações de artigos científicos.

A construção de uma rede BA segue dois princípios básicos: crescimento (*growth*) e ligação preferencial (*preferential attachment*). O princípio do crescimento refere-se a forma como a rede é construída, sendo acrescentado um novo vértice a cada etapa, a partir de um número

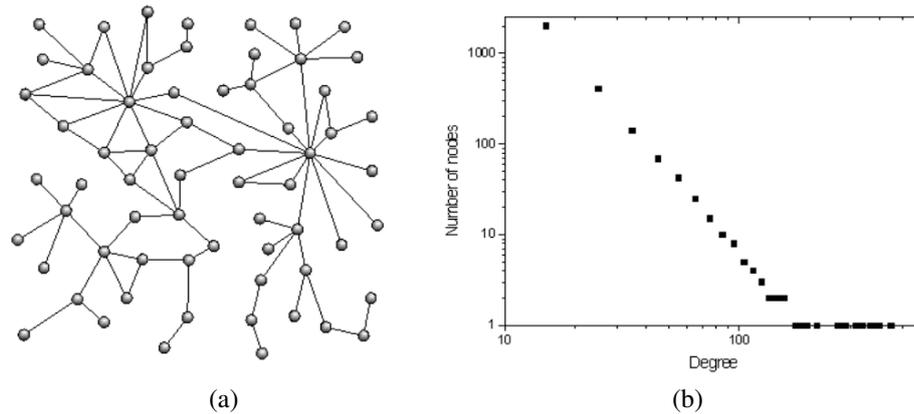


Figura 2.6: (a) Exemplo de rede *scale-free* de Barabási e Albert e (b) distribuição do grau médio sobre 10 redes BA compostas de 10.000 vértices e usando  $m = 5$  (COSTA et al., 2007).

inicial de  $m_0$  vértices. Para cada novo vértice que é inserido,  $m$  novas arestas são inseridas entre o novo vértice e algum vértice já existente. Os vértices escolhidos para receberem novas arestas são escolhidos de acordo com o princípio da ligação preferencial, onde vértices de maior grau possuem maior probabilidade de receberem as ligações com o vértice inserido. A Equação 2.4 exhibe como é calculada a probabilidade de ligação entre o novo vértice  $i$  e um vértice existente  $j$ . O valor de  $k_j$  refere-se ao grau do vértice  $j$ , isto é, quantas arestas incidem sobre  $j$ .

$$P(i \rightarrow j) = \frac{k_j}{\sum_u k_u} \quad (2.4)$$

## 2.4 Centralidade de Intermediação

A medida de centralidade de intermediação baseia-se na ideia de que um nodo é mais central a medida que mais caminhos mínimos passam por ele. Nesse cálculo são considerados os caminhos mínimos entre todos os pares de vértices da rede. O método tradicional para o cálculo da centralidade de intermediação foi proposto por Linton Freeman em 1977 (FREEMAN, 1977).

Seja  $G(V, E)$  um grafo  $G$  composto de um conjunto de vértices  $V$ , um conjunto de arestas  $E$  e uma função de custo  $C(e)$  que atribui pesos às arestas. Sejam  $i, j$  e  $u$  vértices distintos de  $G$ . Seja  $|\sigma_{ij}|$  o número de caminhos mínimos entre  $i$  e  $j$ , e  $|\sigma_{ij,u}|$  o número desses caminhos que passam por  $u$ . A centralidade de intermediação para o vértice  $u$  é representada na Equação (2.5).

$$B_u = \sum_{i \in V} \sum_{j \in V \setminus \{i\}} \frac{\sigma_{ij,u}}{\sigma_{ij}}. \quad (2.5)$$

O cálculo da centralidade de intermediação foi realizado nesse estudo com o auxílio da biblioteca de software IGraph<sup>1</sup>. Essa biblioteca implementa a versão do algoritmo para cálculo da centralidade de intermediação (*betweenness centrality*) desenvolvida por Brandes (2001). Esse algoritmo, que é o estado-da-arte para o cálculo da centralidade de intermediação, possui complexidade de espaço  $\mathcal{O}(n + m)$  e complexidade de tempo  $\mathcal{O}(nm)$  para grafos não ponderados e  $\mathcal{O}(nm + n^2 \log n)$  para grafos ponderados, onde  $n$  refere-se ao número de vértices e  $m$  ao número de arestas.

Uma vez que os caminhos mínimos são calculados em função do peso das arestas, a medida de centralidade torna-se sensível a função de custo escolhida. Neste trabalho foram testadas diferentes funções de custo com o objetivo de obter variações na medida de centralidade e verificar qual oferecia maior correlação com a simulação microscópica de tráfego realizada posteriormente.

## 2.5 SUMO - Simulação de Mobilidade Urbana

O SUMO (BEHRISCH et al., 2011) é um pacote de simulação de tráfego gratuito e de código aberto disponível desde 2001<sup>2</sup>. Essa ferramenta permite a modelagem de sistemas de tráfego intermodais, incluindo a simulação de veículos, transporte público e pedestres. Trata-se de um simulador microscópico, sendo os veículos, pedestres e transporte público modelados explicitamente.

Simulações de tráfego facilitam a validação de alterações na infraestrutura, assim como mudanças nas políticas, antes que elas sejam implantadas nas rodovias. O SUMO tem sido usado em diversos projetos para responder questões de pesquisa. Entre as aplicações do SUMO estão experimentos para avaliação de temporizações semaforicas, comunicação interveicular, previsões de tráfego, investigação e desenvolvimento de métodos para escolhas de rotas, e estudos relacionados à emissão de poluentes. O SUMO também foi utilizado para fornecer previsões de tráfego para as autoridades da cidade de *Köln*, na Alemanha, durante a visita do Papa em 2005 e durante a Copa do Mundo de 2006.

No pacote do SUMO, além do simulador, encontram-se ferramentas para a criação e importação de redes, rotinas para roteamento de veículos e visualização da simulação. A seguir estão descritas algumas ferramentas que acompanham o SUMO:

**SUMO** simulador de tráfego veicular através de linha de comando, permitindo a automatização

---

<sup>1</sup>Disponível em: <<http://igraph.org/>>

<sup>2</sup>Disponível em: <<http://dlr.de/ts/sumo>>

da simulação através de scripts;

**GUISIS** utilitário que permite o acompanhamento da simulação através uma interface gráfica;

**NETCONVERT** permite a conversão de redes que estão no formato de terceiros para o formato do SUMO. Neste trabalho esse utilitário foi utilizado para converter a rede POA *Arterials*, que estava no formato do Open Street Map<sup>3</sup> e a rede Sioux Falls do trabalho de Chakirov e Fourie (2014), que estava no formato MATsim;

**NETGEN** ferramenta que permite a criação de redes abstratas. Neste trabalho utilizou-se essa ferramenta para a criação de uma grade regular de dimensões 10x10;

**OD2TRIPS** esta ferramenta é a responsável por transformar uma matriz OD em viagens, distribuindo os pares OD ao longo de um intervalo de tempo especificado;

**DUAROUTER** este utilitário é o responsável por atribuir rotas às viagens geradas a partir da matriz OD. Essa ferramenta atribui as rotas calculando o caminho de menor custo, onde no caso desse trabalho utilizou-se o algoritmo de *Dijkstra*. Existe a possibilidade dessa ferramenta ser chamada iterativamente para que as rotas sejam redistribuídas e, assim, calculado o Equilíbrio Dinâmico do Usuário (*Dynamic User Equilibrium*), conforme descrito em Gawron (1998).

**oneShot-assignment** o oneShot-assignment é uma alternativa ao processo iterativo proposto pelo DUAROUTER. Nesse processo a rota é calculada no momento da partida do veículo, atribuindo-se a ele o caminho mais rápido.

## 2.6 Conclusão

Neste capítulo foram apresentados conceitos relacionados à modelagem de sistemas de transporte. Primeiramente foi discutido como redes de transporte podem ser representadas como grafos. Em seguida foram introduzidos os conceitos de matriz origem-destino, distrito, volume, rota e a formalização do problema que está sendo abordado.

Neste capítulo também foram introduzidos os conceitos relacionados às redes complexas e algumas métricas relacionadas a grafos. Além disso foram apresentados três modelos clássicos de redes complexas, assim como as propriedades que caracterizam cada um desses. Entre os modelos introduzidos estão o Grafo aleatório de Erdős e Rényi, redes *Small-World*, de Watts e Strogatz, e as redes *Scale-Free*, de Barabási e Albert.

Na Seção 2.4 foi introduzida a medida de centralidade de intermediação e o método através do qual é calculada. A centralidade de intermediação será retomada no desenvolvimento

---

<sup>3</sup>Disponível em: <<http://www.openstreetmap.org/>>

da abordagem proposta, Capítulo 4, e é fundamental na identificação dos pontos centrais considerando a demanda. Por fim, na Seção 2.5 foi apresentado o simulador SUMO, utilizado nos experimentos descritos nos Capítulos 5, 6 e 7, e como se dá o seu funcionamento. Foram apresentados os tipos de arquivos necessários para se realizar uma simulação microscópica, e como se dá a geração desses arquivos para que os procedimentos envolvidos nos experimentos possam ser reproduzidos.

### 3 TRABALHOS RELACIONADOS

As aplicações do estudo de redes em sistemas de transporte permanecem relativamente limitadas (DERRIBLE; KENNEDY, 2010). Os estudos existentes podem ser divididos principalmente em duas categorias, sendo a primeira delas na aplicação de redes de rodovias - como problemas de congestionamento de automóveis - e a segunda num esforço de melhoria do transporte público. A divisão realizada neste capítulo separa os trabalhos que apresentam como objetivo a melhoria do trânsito em redes de transporte privado dos que se propõem a melhorar as redes transporte público.

#### 3.1 Transporte Privado

No trabalho de Park et al. (2005), foi abordado de maneira analítica os níveis de congestionamento em redes aleatórias e redes *scale-free*. Nesse experimento, a rede aleatória considerada segue o modelo de Erdős-Rényi (ERDÖS; RÉNYI, 1959), enquanto que a rede *scale-free* segue o modelo Barabási-Albert (ALBERT et al., 1999). Os autores perceberam que o nível de congestionamento dos vértices aumenta de acordo com o grau médio dos vértices da rede, denotado por  $\langle k \rangle$ . Além disso, foi demonstrado que existe um coeficiente de conectividade crítica  $k_c$  (estimado em torno de 10) onde, para um mesmo valor de  $\langle k \rangle$ , caso  $\langle k \rangle < k_c$  uma rede *scale-free* apresentará maiores níveis de congestionamento nos vértices do que uma rede aleatória e menores níveis caso  $\langle k \rangle > k_c$ .

Xie e Levinson (2007) destacaram a natureza orientada a arestas (*links*) encontrada nas redes viárias. Enquanto diversos trabalhos relacionados a topologias de redes utilizam uma abordagem orientada a vértices, esses conceitos falham em considerar a natureza orientada a arestas encontrada nas redes de transporte. Os autores ressaltam que redes viárias são heterogêneas em relação às vias, e classificam-nas em relação à sua funcionalidade (*e.g.* locais, coletoras, arteriais) e nível de serviço que oferecem. A fim de mensurar a heterogeneidade de uma rede em relação aos diferentes tipos de vias e níveis de serviço, os autores utilizam a medida de entropia de Shannon (SHANNON, 1948), representada pela Equação 3.1. Na Equação 3.1,  $m$  representa os diferentes níveis de serviço presentes na rede  $X$ , enquanto que  $p_i$  representa a razão entre a quantidade de vias que pertencem ao  $i$ -ésimo conjunto, que representa o nível de serviço) e o total de vias na rede. Dessa forma, uma rede homogênea apresenta valor de entropia  $H = 0$ ,

enquanto que valores altos de  $H$  indicam maior heterogeneidade entre as vias da rede.

$$H(X) = - \sum_{i=1}^m p_i \log_2(p_i). \quad (3.1)$$

No que diz respeito à conectividade, Xie e Levinson (2007) estabelecem métricas que retratam como a estrutura das vias arteriais é composta. O cálculo dessas métricas baseia-se no conceito de circuito, que pode ser definido como a subestrutura de uma rede onde existem pelo menos dois caminhos disjuntos entre quaisquer pares de vértices. Com isso, os autores propõem quatro métricas para avaliar os padrões de conexões encontrados na rede: a primeira delas, *ringness* ( $\phi_{ring}$ ), é calculada através do quociente entre o comprimento das vias arteriais presentes em circuitos e o comprimento total de vias arteriais. Se dois circuitos diferentes possuem arestas em comum, esses receberão o nome de teia (*web*). Assim como a métrica apresentada anteriormente, *webness* ( $\phi_{web}$ ) é calculada através do quociente entre o comprimento de vias arteriais presentes em teias e o comprimento total de vias arteriais. A soma de *ringness* e *webness* define uma nova métrica chamada *circuitness* ( $\phi_{circuit}$ ), enquanto as vias arteriais que não estão presentes em circuitos ou teias definem *treeness* ( $\phi_{tree}$ ). Os autores apresentam ainda nesse trabalho um algoritmo para identificar as subestruturas necessárias para o cálculo das métricas.

No trabalho de Holme (2003), o autor investiga a relação entre o fluxo de tráfego em redes de comunicações e medidas de centralidade. Para isso, foram utilizados modelos de saltos de partículas adaptado da teoria de fluxo de tráfego veicular. Nesse modelo, partículas movem-se ao longo das arestas de um grafo, respeitando a restrição de que duas partículas não podem ocupar o mesmo vértice ao mesmo tempo. Essas partículas se deslocam entre origens e destinos definidos aleatoriamente, sendo para isso consideradas três diferentes políticas de atualização: *random walk*, onde as partículas escolhem uma posição vaga de modo aleatório; *detour-at-obstacle*, onde a partícula escolhe aleatoriamente um entre os vizinhos mais próximos do destino; e *wait-at-obstacle*, onde caso não haja vértices liberados próximo do destino, a partícula não se move.

Para poder monitorar a densidade do tráfego em função da centralidade de intermediação, Holme escolheu o modelo de rede *scale-free* de Barabási-Albert, por esse apresentar uma ampla distribuição de valores de centralidade. O autor constatou que a política *wait-at-obstacle* apresentou *dead-locks* com uma probabilidade proporcional à densidade de partículas na rede. Ainda assim, no que diz respeito à velocidade com que as partículas alcançaram seus destinos, a política *wait-at-obstacle* se mostrou a mais rápida, seguida da política *detour-at-obstacle*, e por fim pela *random walk*. Em relação centralidade de intermediação, o autor observou que vértices

com baixas a médias taxas centralidade apresentavam taxas de ocupação constantes, e concluiu que a centralidade de intermediação, por si só não pode estimar a capacidade de um vértice. Nesse ponto, o presente estudo difere do estudo de Holme, pois a centralidade de intermediação é comparada com uma simulação microscópica. Além disso, também são utilizadas demandas não uniformes, diferentes dos pares OD aleatoriamente definidos, que foram utilizados no trabalho de Holme.

No estudo de Kazerani e Winter (2009a), analisou-se a questão relacionada a capacidade da centralidade de intermediação (*betweenness centrality*) em explicar os fluxos de tráfego em redes viárias. Nesse trabalho chegou-se à conclusão de que a centralidade de intermediação tradicional, proposta por Freeman (1977), não pode explicar significativamente os fluxos de tráfego em uma rede por não considerarem sua inserção no espaço geográfico e nem a dinamicidade de suas propriedades ao longo do tempo. Para os autores, os usuários tentam satisfazer suas demandas buscando recursos que estão fisicamente próximos, porém não topologicamente próximos. Além disso, as vias podem conter restrições temporais como interrupções, alocação dinâmica de pistas ou o próprio volume de tráfego e faz com que a medida de centralidade, baseada apenas na topologia e em uma distribuição uniforme, não reflita a real situação do tráfego. Assim, os usuários da rede agiriam racionalmente ao escolher uma função de custo ao calcular o menor caminho, e tal comportamento não é adequadamente capturado pela medida de centralidade tradicional.

Ainda em Kazerani e Winter (2009a), os autores sugerem que é necessária uma adaptação da centralidade de intermediação tradicional, onde seriam considerados os aspectos temporais e físicos, para que fosse atingida uma correlação significativa com o tráfego que acontece realmente na rede. Por fim os autores concluem que, mesmo com a medida de centralidade adaptada, não foi possível explicar ou prever o comportamento do tráfego. Além disso, comentam os autores, faltou uma base de dados real para dar suporte à abordagem proposta durante a realização dos experimentos. No estudo de Kazerani e Winter (2009b), os autores propõem uma alteração no cálculo da centralidade de intermediação de forma que a métrica passe a ser calculada sobre as arestas, e não sobre os vértices. No presente estudo, é proposta uma variação no cálculo da centralidade de intermediação que, por considerar a demanda, apresenta maior correlação com o tráfego observado na simulação microscópica.

No trabalho de Gao et al. (2013), os autores investigam a capacidade da centralidade de intermediação em prever o fluxo de tráfego através da análise da correlação entre essa métrica e registros reais coletados a partir de sensores GPS. Para isso, os autores utilizaram dados coletados por sensores GPS instalados em 149 táxis da cidade de Qingdao (China) ao longo

de uma semana, totalizando 1.261.475 registros. Dessa análise, concluiu-se que a medida de centralidade não descreve adequadamente o fluxo de tráfego, e atribuiu-se a isso dois motivos principais: primeiro que ao calcular a centralidade de intermediação, as origens e destinos das viagens são vértices do grafo, enquanto que em pontos OD reais, origens e destinos estão associadas às arestas; segundo que a distribuição OD não é uniforme e está associada à distribuição da densidade de atividade humana, que é influenciada por diversos fatores, como por exemplo a distribuição demográfica.

Em uma tentativa de explicar a lacuna existente entre a medida de centralidade e o fluxo de tráfego, os autores estabeleceram uma comparação entre a métrica e um modelo sintético de demanda desenvolvido incrementalmente em três etapas, referenciadas por  $F_1$ ,  $F_2$  e  $F_3$ . Em  $F_1$  assumiu-se que a demanda ocorria uniformemente sobre o espaço geográfico, atribuindo cada ponto de origem e destino à aresta mais próxima. Na etapa  $F_2$  estendeu-se o modelo para considerar a distribuição da atividade humana com o auxílio de dados coletados através do uso de celulares pela população, o que atribuiu um caráter não uniforme à distribuição da demanda. Essa abordagem apresentou uma correlação maior com a demanda original, mapeada através dos sensores GPS dos táxis. Por fim, em  $F_3$  o modelo de demanda foi estendido para dar suporte ao fator de decaimento da distância, que modela o fenômeno das pessoas buscarem serviços e recursos em locais relativamente próximos. Assim, viagens com origens e destinos mais próximos teriam uma probabilidade maior de ocorrência. Essa alteração fez com que a demanda simulada apresentasse a maior correlação com os dados de fluxo de tráfego originais coletados.

Quando comparado com os valores de centralidade de intermediação, o modelo de demanda desenvolvido em  $F_2$  foi o que apresentou maior correlação. O estudo sugere que a medida de centralidade, por não considerar o fator de decaimento da distância, apresenta baixa correlação com o modelo  $F_3$  e, por consequência, com o fluxo real obtido pelo sensores GPS. No entanto, além dos possíveis vieses existentes pela utilização de dados coletados a partir do uso de táxis e celulares, descritos em Gao et al. (2013), os autores não sugerem alterações na métrica, que sabidamente assume uma demanda uniforme e desconsidera o fator de decaimento da distância. Nesse sentido, o presente estudo também trata o problema do decaimento da distância encontrado no modelo apresentado por Gao e colegas ao utilizar uma matriz OD. Uma vez que a matriz OD representa de fato a demanda de tráfego, somente os pares OD relacionados às viagens desejadas são encontrados nessa matriz.

No trabalho de Galafassi e Bazzan (2013) é sugerida uma variação da centralidade de intermediação que calcula a métrica levando em consideração a demanda de tráfego. Diferente do

trabalho original de Freeman (1977), que calcula a métrica considerando todas as combinações de pares possíveis entre os vértices da rede, neste trabalho são calculadas as rotas para os pares OD que fazem parte da demanda especificada. Os autores comparam o resultado da correlação da medida de centralidade modificada com a quantidade de veículos em espera nas arestas (fila), e demonstram que a medida proposta descreve melhor o fluxo do tráfego do que a centralidade de intermediação original. Os experimentos foram realizados sobre uma grade regular 6x6 e sobre a rede composta pelas vias arteriais da cidade de Porto Alegre, ambos contemplando variações no que diz respeito ao tipo da demanda (uniforme e não uniforme) e volumes.

O método proposto neste estudo é uma extensão do estudo desenvolvido por Galafassi e Bazzan. Neste trabalho, o cálculo da centralidade de intermediação foi mantido inalterado, tendo sido modificado o modo de atribuição dos pesos às arestas do grafo, de modo a considerar a demanda de tráfego. Além disso, o método aqui proposto foi comparado com a ocupação das vias durante a simulação microscópica, diferente da comparação com o tamanho da fila de veículos em espera, utilizada em Galafassi e Bazzan (2013). Os experimentos também foram estendidos para considerar a rede *Sioux Falls* e uma grade regular de tamanho 10x10.

### 3.2 Transporte Público

Em se tratando de aplicações do estudo de redes complexas no transporte público, pode-se citar os trabalhos de Derrible e Kennedy (2009), Derrible e Kennedy (2010), Derrible e Kennedy (2011) e Derrible (2012). No estudo Derrible e Kennedy (2009), os autores realizam uma análise de 19 sistemas de metrô e demonstram que, além de características culturais e *design* das cidades, a topologia das redes exerce um papel fundamental ao atrair pessoas para utilizar o transporte público. Nesse estudo, os autores analisaram os modelos dos sistemas de metrô com o auxílio da teoria dos grafos e estabeleceram três indicadores para avaliar a qualidade das redes: cobertura (*coverage*), retidão (*directness*) e conectividade *connectivity*. Cobertura ( $\sigma$ ), que considera a área coberta por estações em relação à área servida, retidão ( $\pi$ ) que se refere ao número máximo de transferências necessárias para ir de uma estação a outra e conectividade ( $\rho$ ), que reflete o grau de conexão de uma rede, permitindo a escolha de diferentes caminhos a cada vértice. Através de uma análise de regressão múltipla, os autores encontraram uma forte relação entre esses indicadores e a frequência média de uso do transporte público pelos cidadãos (*ridership*), e sugerem que tais indicadores poderiam ser utilizados no projeto de futuras linhas para maximizar a cobertura, conectividade e tornar as rotas mais diretas.

No trabalho de Derrible e Kennedy (2010), os autores estendem o estudo passando a con-

siderar 33 redes de metrô, com o objetivo de analisar as características de seus sistemas (conceitos *scale-free* e *small-world*), o impacto no tamanho da rede e as implicações na robustez. A robustez foi medida utilizando-se o número de ciclos presentes na rede e sua propensão a falhar. Em geral, quanto mais *clusters* apresenta a rede, mais robusta ela se apresenta, devido à grande quantidade de ciclos e rotas alternativas.

Os autores concluíram que a maior parte das redes são de fato *scale-free* e *small-world* e propuseram recomendações para aumentar a robustez em redes de metrô. Dentre as recomendações estão que redes pequenas deveriam focar na criação de estações de transferência, a fim de aumentar a quantidade de ciclos e criar rotas alternativas; em redes grandes, observou-se que as rotas de transferência ocorriam em poucas estações (*hubs*) ficando, assim, a recomendação de criar rotas de transferência nas periferias. Nesse ponto, cabe observar que a expansão indeliberada das redes poderia diminuir e impedir sua robustez, sendo o agrupamento (*clustering*) através de novas estações de transferência uma solução para o adequado crescimento dos sistemas.

Em Derrible e Kennedy (2011), os autores fazem uma revisão da área de redes de transporte do ponto de vista topológico e métricas para analisá-las. Além de retomar os conceitos e histórico de teoria dos grafos, redes *small-world* (WATTS; STROGATZ, 1998) e redes *scale-free* (ALBERT et al., 1999), esse trabalho se destaca por apresentar uma revisão de indicadores utilizados na literatura. Nesse estudo, os autores introduziram o indicador  $R_T$ , relacionando o tempo de viagem como indicador de conectividade. Diferente de outras, esta análise desconsidera a distância entre os pares origem-destino para utilizar uma medida que distorce a geometria da rede, atribuindo valor infinito caso os pares não possuam conectividade. No presente estudo, também se desconsidera o comprimento das vias, que poderia ser comparado à distância entre origens e destinos, e passa-se a considerar a ocupação das vias. Essa métrica é explorada nas funções de custo usadas para atribuir pesos às arestas dos grafos correspondentes às redes, e estão descritas na Subseção 4.1.1.

Em um recente estudo de Derrible (2012), aplicou-se a centralidade de intermediação a 28 sistemas de metro com o objetivo de investigar a emergência de padrões na evolução da métrica em relação ao tamanho da rede para a posterior análise individual de cada sistema. Observou-se, com forte significância estatística, que a centralidade de intermediação tornou-se uniformemente mais distribuída conforme aumentou-se o tamanho da rede, não sendo encontrado o padrão “vencedor-leva-tudo” presente em outras métricas utilizadas na caracterização de sistemas complexos. Além disso, uma análise mais detalhada dos maiores, médios e menores valores da centralidade de intermediação mostrou que a porção dos vértices com os mais altos

valores decresceram numa taxa menor que a média (0,87 vs 1), enquanto que a porção dos vértices com menores valores de centralidade decresceram mais rapidamente (2,48 vs 1). Em uma análise individual das redes, ao observar-se os 5 vértices mais centrais de redes com mais de 20 vértices, identificou-se estações que poderiam ser usadas para redistribuir os passageiros e, assim, evitar a sobrecarga de passageiros. Observou-se ainda que estações localizadas no centro da rede possuíam altos valores de centralidade de intermediação simplesmente por estarem conectadas a outras estações com alta centralidade. Considerar a centralidade de intermediação no planejamento do processo, observa o autor, pode trazer benefícios e melhor distribuir o fluxo de passageiros, além de permitir comparar as topologias de redes de sistemas diferentes.

### 3.3 Conclusão

Neste capítulo foram destacados alguns trabalhos que descrevem o histórico e estado da arte da aplicação de sistemas complexos em redes de transporte. Mais especificamente, foram citados trabalhos que utilizam teoria dos grafos e a medida de centralidade na identificação de pontos que recebem grandes volumes de demanda em redes viárias.

Esses trabalhos foram organizados de acordo com sua área de aplicação: trabalhos que aplicam as técnicas anteriormente mencionadas em redes de transporte de veículos privados e trabalhos que aplicam em redes de transporte público. Em ambas as categorias puderam ser encontrados trabalhos que utilizam a medida de centralidade para identificar pontos centrais, assim como outras métricas. Apesar da propriedade robustez estar presente na maioria dos trabalhos que tratam de transporte público, pouco foi mencionada nas redes de transporte privado. Notou-se também uma certa divergência de opinião no que diz respeito à aplicabilidade da medida de centralidade entre os autores que a utilizaram em redes de transporte privado.

Além do trabalho de Galafassi e Bazzan (2013), não foram identificados trabalhos considerando a demanda de tráfego em conjunto com a centralidade de intermediação na identificação de pontos centrais em redes viárias. A ideia empregada nesse trabalho assemelha-se à metodologia empregada no trabalho de Gao et al. (2013), onde é aplicada a centralidade de intermediação na identificação de vias com grande volume de tráfego. O trabalho de Gao e colegas falha, no entanto, ao aplicar a centralidade de intermediação sobre a rede ao assumir que os altos valores da métrica irão coincidir com os pontos com maiores volumes de tráfego. O problema em aplicar puramente a medida de centralidade sobre a topologia da rede está no fato de que essa assume que a demanda está uniformemente distribuída pela rede, o que não é sempre verdade. Considerar a aplicação da demanda sobre a rede antes do cálculo da centralidade

dade de intermediação parece, portanto, uma possibilidade de obtenção de melhores resultados na identificação de pontos centrais, uma vez que se deixa de assumir uma demanda uniforme e passa-se a considerar a demanda especificada.

## 4 MÉTODOS

Este capítulo tem como objetivo apresentar o método para identificação de pontos centrais em redes viárias através da utilização da centralidade de intermediação em combinação com a matriz OD de demanda. O método consiste em construir um grafo representativo da rede e ponderá-lo utilizando a demanda, para que a centralidade de intermediação, ao ser calculada, leve em consideração a ocupação das vias, decorrente da real demanda expressa pela matriz OD. O capítulo está organizado da seguinte forma: a Seção 4.1 apresenta a abordagem proposta, como se dá a atribuição de pesos às arestas do grafo e as funções de custo utilizadas; a Seção 4.2 apresenta os passos necessários para a realização da simulação microscópica, que servirá de comparação com o método proposto; a Seção 4.3 apresenta como se dá a comparação entre a abordagem proposta e a simulação microscópica da demanda; por fim, a Seção 4.4 apresenta os experimentos que serão realizados para testar a técnica proposta.

### 4.1 Abordagem Proposta

A abordagem proposta neste estudo consiste em um método para calcular a centralidade de intermediação considerando uma demanda aplicada à rede, e está ilustrada na Figura 4.1. Uma vez especificada a matriz OD de demanda, são calculadas as rotas (Seção 2.2.4) e totalizadas as quantidades de rotas que passam em cada uma das arestas. Essa totalização serve como entrada para a função de custo que atribui peso às arestas do grafo da rede. Diferentes funções de custo foram consideradas e estão descritas adiante, na Subseção 4.1.1.



Figura 4.1: Etapas envolvidas no cálculo da centralidade de intermediação para os vértices da rede usando o método proposto.

Havendo um grafo da rede devidamente ponderado com as rotas que representam a demanda, calcula-se a centralidade de intermediação dos vértices da rede conforme descrito na Seção 2.4. Esses valores são posteriormente confrontados com o resultado da centralidade de intermediação calculada sobre o grafo ponderado com base nos valores de ocupação extraídos da simulação microscópica, descrita na Seção 2.5.

#### 4.1.1 Atribuição de Custos às Arestas do Grafo

Para que o cálculo da centralidade de intermediação possa ocorrer, faz-se necessário determinar as rotas correspondentes à matriz de demanda. Como a matriz OD determina apenas origens e destinos, o cálculo das rotas se faz necessário para a obtenção da tabela de ocorrência de rotas por aresta. As rotas foram obtidas calculando-se o caminho de menor custo entre a origem e o destino de cada viagem presente na matriz OD. Com isso, foram encontradas, para cada par OD, seqüências de arestas que formavam os caminhos de menor custo utilizando-se algoritmo de *Dijkstra* (DIJKSTRA, 1959).

Uma vez calculadas as rotas correspondentes à demanda, é possível construir uma tabela de ocorrência da quantidade de rotas que passa por cada aresta. Esse procedimento é uma etapa fundamental para a aplicação da abordagem proposta, pois é nesse ponto onde são inseridas as informações da demanda de tráfego no processo ilustrado na Figura 4.1.

A atribuição de pesos às arestas pode ser realizada de modos distintos. Diversos trabalhos utilizam o comprimento da via como custo das arestas (GAO et al., 2013; CRUCITTI et al., 2006; KAZERANI; WINTER, 2009a; DERRIBLE; KENNEDY, 2011). Neste trabalho utilizou-se a taxa de ocupação das vias como peso das arestas, por entender-se que essa reflete a utilização da rede pela demanda.

Nesse trabalho optou-se por utilizar funções de custo decrescentes para realizar a atribuição dos custos às arestas. A Figura 4.2 ilustra a situação que motivou essa decisão. Na Figura 4.2a é exibida uma rede onde passam 10 rotas em cada uma das arestas; nessa mesma figura estão exibidos os valores da centralidade de intermediação para cada um dos vértices. É possível notar que os valores de intermediação estão igualmente distribuídos, pois trata-se de uma rede regular.

Supondo que a quantidade de viagens entre os vértices  $A$  e  $B$  foi aumentada em 5 viagens, um raciocínio natural é incrementar a quantidade de viagens na aresta para 15. A Figura 4.2b ilustra o que acontece com a centralidade de intermediação quando o custo da aresta  $AB$  é aumentado. Nesse caso, como o algoritmo de centralidade de intermediação considera os caminhos de menor custo, caminhos que antes passavam por  $AB$  deixaram de passar. Dessa forma, os vértices  $C$  e  $D$  passaram a receber os maiores valores de centralidade de intermediação, quando na realidade foram os vértices  $A$  e  $B$  aqueles que receberam real aumento de demanda. Isso exige do leitor uma interpretação invertida da métrica, de modo que os vértices com menores valores de intermediação são os pontos centrais em relação a demanda.

Para solucionar esse problema e fazer com que os maiores valores de centralidade de inter-

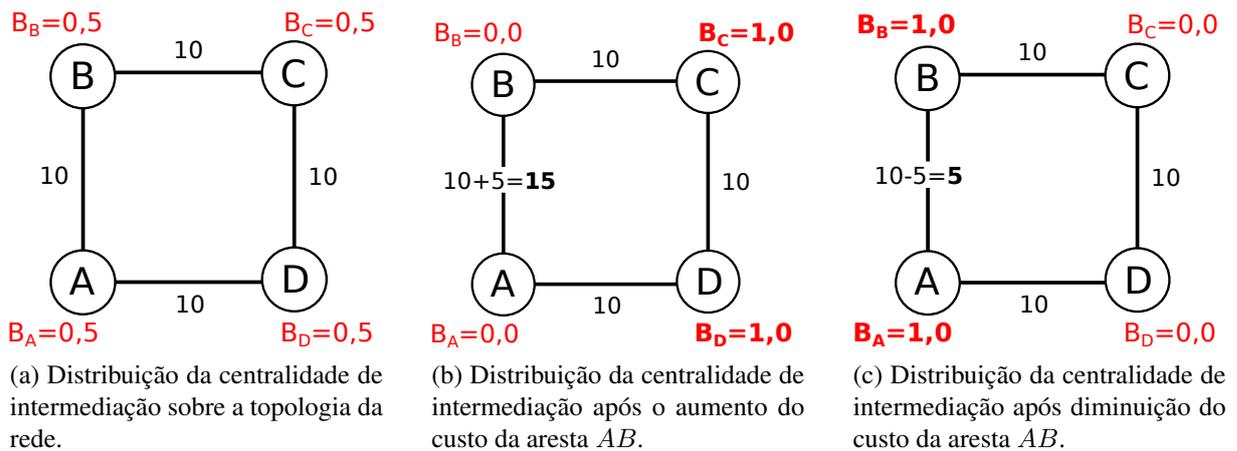


Figura 4.2: Exemplo da influência da função de custo das arestas na distribuição da centralidade de intermediação.

mediação fossem atribuídos aos vértices com maior volume de demanda, optou-se pela utilização de funções de custo decrescentes. Nesse caso, um aumento de demanda entre os vértices  $A$  e  $B$  passou a ocasionar uma diminuição no peso da aresta, por esse ser atribuído através de uma função decrescente. A Figura 4.2c mostra que, nesse caso, os vértices com maiores valores de intermediação coincidem com os vértices que recebem maiores demandas.

Com isso, os experimentos foram guiados levando-se em consideração as seguintes funções de custo:

**$F_1$ : Exponencial Decrescente** É possível utilizar uma função exponencial para modelar o aumento do custo de uma aresta em função da sua ocupação (BUREAU, 1964). De modo análogo, assumindo-se que o custo de uma aresta também diminui exponencialmente em relação à sua ocupação, definiu-se o custo atribuído às arestas de acordo com uma função  $C$ , definida no intervalo  $(0; 1]$ . Esse custo é calculado de acordo com a função exponencial decrescente apresentada na Equação 4.1, um caso particular da família de equações  $y = a(1 - b)^x$ , e considera a quantidade de viagens  $n$  que passa por uma dada aresta. Os valores de  $a$  e  $b$  foram definidos experimentalmente para essa função de modo que o seu decaimento estivesse entre as funções linear e  $1/x$ . A Figura 4.3a exibe o gráfico da função  $F_1$ .

$$C(n) = (1 - 0,001)^n. \quad (4.1)$$

**$F_2$ :  $\frac{1}{x}$**  A função de custo exibida na Equação 4.2, um caso particular de função racional da família  $y = \frac{1}{x^k}$ , também foi considerada nos experimentos. A Figura 4.3b exibe o gráfico

da função  $F_2$ . Essa função foi escolhida para explorar o comportamento da centralidade de intermediação quando o custo das arestas decai mais rapidamente do que a função exponencial explicada anteriormente. Assim como na função anterior,  $n$  corresponde ao número de viagens que passa pela aresta.

$$C(n) = \frac{1}{n}. \quad (4.2)$$

**$F_3$ : Linear Decrescente** A função linearmente decrescente exibida na Equação 4.3 também foi considerada nos experimentos, onde  $n$  corresponde ao número de viagens que passa pela aresta. A Figura 4.3c exibe o gráfico da função  $F_3$ . Para cada experimento realizado nesse estudo, o valor de  $k$  foi definido como sendo a quantidade máxima de viagens recebida por uma aresta daquele experimento. O principal objetivo em usar uma função de custo linearmente decrescente está em estudar o comportamento do método proposto quando o custo das arestas diminui mais suavemente do que a função exponencial decrescente.

$$C(n) = 1 - \frac{n}{k}. \quad (4.3)$$

**$F_4$ : Unitária** A função unitária foi adicionada aos experimentos e atribuí o custo unitário a todas as arestas do grafo. Um caminho mínimo calculado sobre um grafo ponderado com essa função, corresponde a quantidade de saltos (*hops*) necessários para alcançar o destino a partir da origem especificada.

**$F_5$ : Comprimento da Via** Conforme comentado no início dessa seção, e considerando que diversos trabalhos utilizam o comprimento da via como peso das arestas, utilizou-se como função  $F_5$  o comprimento da via, a título de comparação com trabalhos anteriores.

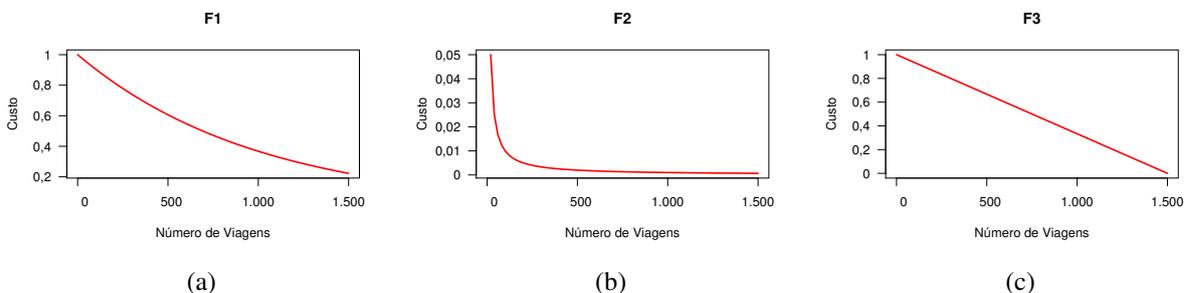


Figura 4.3: Gráficos das funções  $F_1$  (a),  $F_2$  (b) e  $F_3$  (c) exibindo o custo em relação ao número de viagens.

#### 4.1.2 Centralidade de Intermediação considerando a Demanda de Tráfego

Após o grafo que representa a rede viária ter sido construído e suas arestas devidamente ponderadas utilizando as rotas geradas a partir da matriz OD e função de custo, é possível calcular a centralidade de intermediação. Como o foco está na identificação de pontos centrais, o resultado do cálculo da centralidade de intermediação apresentará altos valores para vértices que possuem maior centralidade. O Algoritmo 1 descreve os passos envolvidos no cálculo da centralidade de intermediação considerando a demanda.

---

**Algorithm 1** Centralidade de Intermediação considerando a demanda

---

**Require:** Rede ( $R$ ), Matriz OD ( $M$ ), Função de Custo ( $C$ )

**Ensure:** Centralidade de Intermediação de todos os vértices

- 1: **procedure** CENTRALIDADEDEINTERMEDIACAOCOMDEMANDA( $R, M, C$ )
  - 2:     Construir um grafo  $G$  com a mesma topologia de  $R$
  - 3:     Gerar as rotas de  $M$  sobre  $G$
  - 4:     Criar uma tabela  $T$  contendo a quantidade de rotas que passa por cada aresta
  - 5:     Atribuir custo às arestas de  $G$  usando  $T$  e  $C$
  - 6:     Calcular a centralidade de intermediação de  $G$
  - 7:     **return** centralidade de intermediação dos vértices
- 

O Algoritmo 1 recebe como entrada a rede viária  $R$ , a matriz de origem-destino  $M$  e a função de custo  $C$ . Primeiramente é calculado um grafo  $G$  com a mesma topologia de  $R$  (linha 2), ou seja, uma cópia do grafo com a mesma quantidade de vértices, arestas e interconexões entre esses, porém sem os pesos. Em seguida são calculadas as rotas para cada uma das viagens presentes na matriz  $M$  (linha 3), que correspondem aos pares OD. Cada uma dessas rotas é então contabilizada de modo a obter-se uma tabela de ocorrência da quantidade de rotas que passa por cada aresta (linha 4). As quantidades de rotas por aresta servem de entrada para a função  $C$ , que atribui custo às arestas do grafo  $G$  (linha 5). Estando o grafo  $G$  devidamente ponderado com os valores correspondentes à demanda, o cálculo da centralidade de intermediação é realizado (linha 6) a fim de se obter a centralidade dos vértices (linha 7).

#### 4.2 Centralidade de Intermediação Sobre os Resultados da Simulação Microscópica

O método proposto nesse capítulo foi testado sobre experimentos realizados sobre redes representativas das cidades de Porto Alegre e Sioux Falls, e uma grade regular 10x10. Uma vez que não se dispõe de acesso a medições reais realizadas sobre as vias das cidades utilizadas nos experimentos, optou-se por testar a técnica proposta através da comparação com uma simulação. Nesse caso, utilizou-se uma simulação microscópica executada no simulador SUMO que,

conforme descrito na Seção 2.5, simula a demanda aplicada sobre determinada rede.

A Figura 4.4 exibe as etapas envolvidas no cálculo da centralidade de intermediação sobre o grafo ponderado com os valores de ocupação das vias extraídos no pico de ocupação da rede. O procedimento descrito na Figura 4.4 recebe como entrada o a matriz OD e a rede viária e realiza a geração das viagens, que traduz-se na distribuição dos pares OD ao longo do tempo. A geração das rotas é realizada calculando-se para cada par OD o caminho de menor custo sobre a rede viária. O conjunto de rotas e a rede viária são passadas para o simulador SUMO, que realiza a simulação de maneira microscópica, gerando como saída a ocupação das vias em cada passo de tempo.



Figura 4.4: Etapas envolvidas no cálculo da centralidade de intermediação sobre o grafo ponderado construído a partir da simulação.

A Figura 4.5 exibe como exemplo a curva da média de ocupação das vias em um dos experimentos sobre a rede Sioux Falls. Nesse gráfico está destacado o instante 32.671, onde ocorre o pico de ocupação da rede. Desse instante, extraíram-se as taxas de ocupação das vias e ponderou-se um grafo com a mesma topologia da rede viária. Sobre esse grafo foi calculada a centralidade de intermediação dos vértices, que serviu de base de comparação com o método proposto.

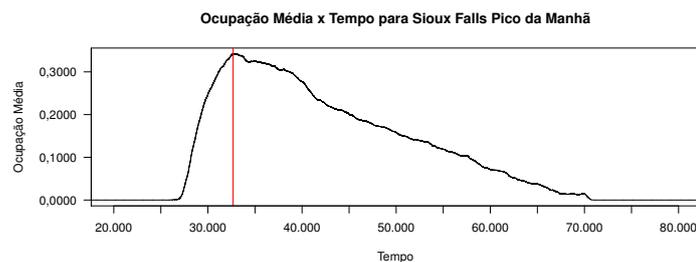


Figura 4.5: Ocupação média das vias da rede Sioux Falls em função do tempo para demanda pico da manhã, com pico de ocupação ocorrendo no passo de tempo 32.671.

### 4.3 Comparação entre o Método Proposto e a Simulação Microscópica

Com o objetivo de comparar a centralidade de intermediação calculada pelo método proposto com a centralidade calculada sobre a simulação, optou-se por utilizar o coeficiente de

correlação. A Figura 4.6 mostra as etapas envolvidas no processo de comparação entre a simulação microscópica e o método proposto. Ambos os fluxos, descritos nas Seções 4.1 e 4.2, recebem como entrada a matriz OD e a representação da rede viária e calculam a centralidade de intermediação dos vértices da rede. Os valores de centralidade de intermediação foram comparados através do coeficiente de correlação de Pearson e, no Capítulo 8 (Análise dos Resultados), estendidos para o coeficiente de correlação de Kendall.

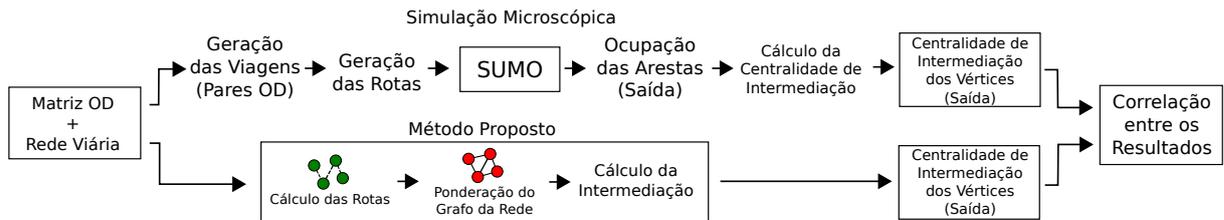


Figura 4.6: Etapas envolvidas no cálculo da centralidade de intermediação usando o método proposto e a simulação microscópica.

#### 4.4 Definição dos Experimentos

A técnica proposta nesse trabalho foi testada em experimentos sobre três redes, sendo a primeira delas constituída das vias arteriais da cidade de Porto Alegre (Figura 4.7a), a segunda baseada na cidade Sioux Falls (Figura 4.7b) e a terceira consistindo em uma grade regular 10x10 (Figura 4.7c). Além disso, foram definidas demandas de diferentes volumes para cada rede com o objetivo de analisar o comportamento da centralidade de intermediação em diferentes níveis de ocupação.

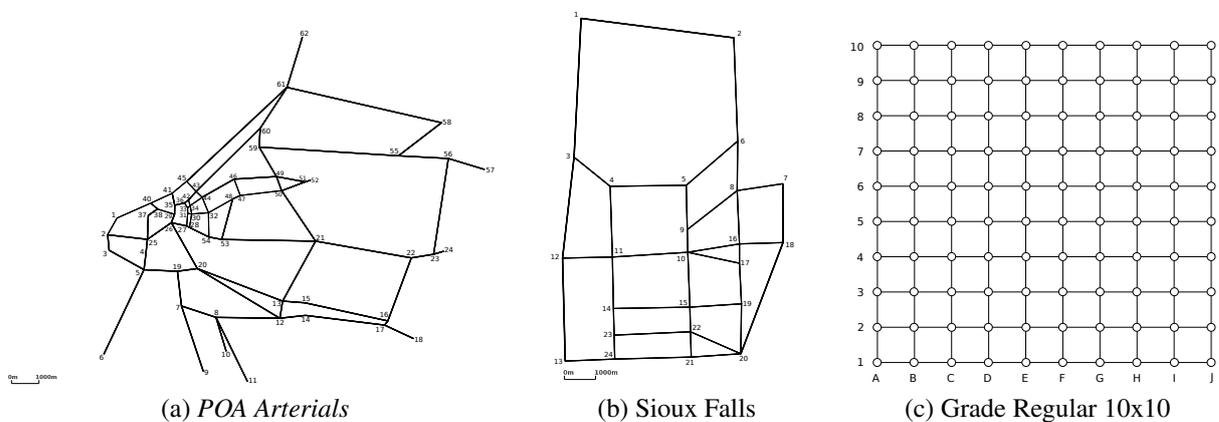


Figura 4.7: Redes usadas nos experimentos.

#### 4.4.1 Modelagem da Demanda

Neste estudo, a demanda é especificada através de Matriz OD, conforme descrita na Seção 2.2.2, onde os valores dessa matriz são multiplicados por fatores que dão origem a quantidades de viagens que ocorrem entre cada par OD. Isso fez necessária uma estimativa de quantos veículos eram comportados simultaneamente em cada rede, que foi calculada conforme Equação 2.1, descrita na Seção 2.2.3. Nessa estimativa considerou-se o comprimento da via, a quantidade de pistas e o tamanho médio de um veículo, que neste trabalho foi assumido como 5 metros.

Nos experimentos descritos nos Capítulos 5, 6 e 7, correspondentes, respectivamente, às redes POA *Arterials*, *Sioux Falls* e Grade Regular 10x10, estão descritos os padrões de demanda especificados e seus objetivos. Em linhas gerais, buscou-se iniciar com um experimento de demanda arbitrária sobre a rede POA *Arterials*, em seguida partiu-se para a utilização de uma demanda já utilizada em outros trabalhos para a rede *Sioux Falls*, e por fim aplicou-se a abordagem proposta em demandas de diferentes padrões e volumes sobre a Grade Regular 10x10.

#### 4.4.2 Geração das Rotas

Para a rede POA *Arterials* e Grade Regular 10x10, as rotas foram calculadas utilizando o utilitário *duarouter*, presente no pacote do simulador SUMO, que calcula o menor caminho entre a origem e o destino de cada viagem utilizando o algoritmo de *Dijkstra*, conforme já mencionado na Seção 2.2.4. Experimentos adicionais sobre a Grade Regular 10x10 utilizaram o utilitário *one-shot assignment*, também presente no pacote do SUMO, que realiza o cálculo das rotas distribuindo-as entre os possíveis caminhos que conectam um par OD. Esse utilitário utiliza uma abordagem incremental que recalcula o custo das arestas a cada intervalo de tempo, evitando que todas as rotas concentrem-se no mesmo caminho de menor custo. Para as demandas que foram geradas utilizando-se esse utilitário, o intervalo de tempo especificado dos pesos das arestas foi de 1.800 segundos.

#### 4.5 Conclusão

Nesse capítulo foi apresentada a abordagem proposta para o cálculo da centralidade de intermediação considerando a demanda. Foi descrito como é feita a atribuição da demanda ao grafo da rede através de funções de custo, e como essas funções podem afetar os valores apresentados pela medida de centralidade. Em seguida, foram descritas as funções de custo escolhidas para

a realização dos experimentos, sendo essas as funções exponencial decrescente ( $F_1$ ),  $\frac{1}{x}$  ( $F_2$ ), linear decrescente ( $F_3$ ), unitária ( $F_4$ ) e comprimento da aresta ( $F_5$ ).

Para testar a técnica proposta optou-se por compará-la com a centralidade de intermediação calculada sobre um grafo ponderado com as taxas de ocupação das vias obtidas através de simulação microscópica. Para isso, foram apresentados os passos necessários para a realização da simulação com o simulador SUMO, e exibido um diagrama dos passos necessários para o cálculo da centralidade de intermediação baseada na simulação. Também foi descrito que comparação entre a abordagem proposta e a simulação será realizada através das medidas de correlação de Pearson e de Kendall. Por fim, apresentou-se os mapas das redes, sendo essas POA *Arterials*, *Sioux Falls* e Grade Regular 10x10, todas utilizadas nos experimentos como testes da técnica proposta.

## 5 EXPERIMENTO 1 - POA ARTERIALS

O primeiro experimento foi realizado sobre a rede *POA Arterials*, baseada no mapa da cidade de Porto Alegre, extraída do *Open Street Map*<sup>1</sup>. Sobre essa rede foi realizado um processamento para capturar apenas as vias e junções, a fim de se obter uma representação da rede na forma de grafo. Trata-se da mesma rede utilizada nos experimentos por Galafassi e Bazzan (2013), já citados na Seção 3.1. A Figura 5.1 exibe o mapa da cidade de Porto Alegre contendo, em destaque, os pontos que deram origem aos distritos, enquanto que a Figura 5.2 exibe a rede já convertida para o formato do simulador SUMO, através da ferramenta *netconvert*. A rede *POA Arterials* (Figura 5.2) é composta por 61 vértices e possui capacidade total de 127.320 veículos.



Figura 5.1: Mapa da rede *POA Arterials* com distritos destacados em azul.

### 5.1 Análise da Rede com Centralidade de Intermediação

Para a realização da análise da rede, fez-se necessária a atribuição de pesos às arestas do grafo, uma vez que é necessária uma referência de custo para guiar o algoritmo de caminhos mínimos usado durante o cálculo da centralidade de intermediação. A realização da análise da rede iniciou-se pela atribuição do comprimento das vias como pesos das arestas do grafo - sem levar em consideração qualquer demanda aplicada à rede -, seguida da aplicação do algoritmo de cálculo da centralidade de intermediação. A utilização do comprimento das vias como peso das arestas do grafo corresponde à função de custo  $F_5$ , que conforme mencionado na Subseção 4.1.1, é uma função que desconsidera a demanda, retornando apenas o comprimento da via

<sup>1</sup>Disponível em: <<http://www.openstreetmap.org/>>

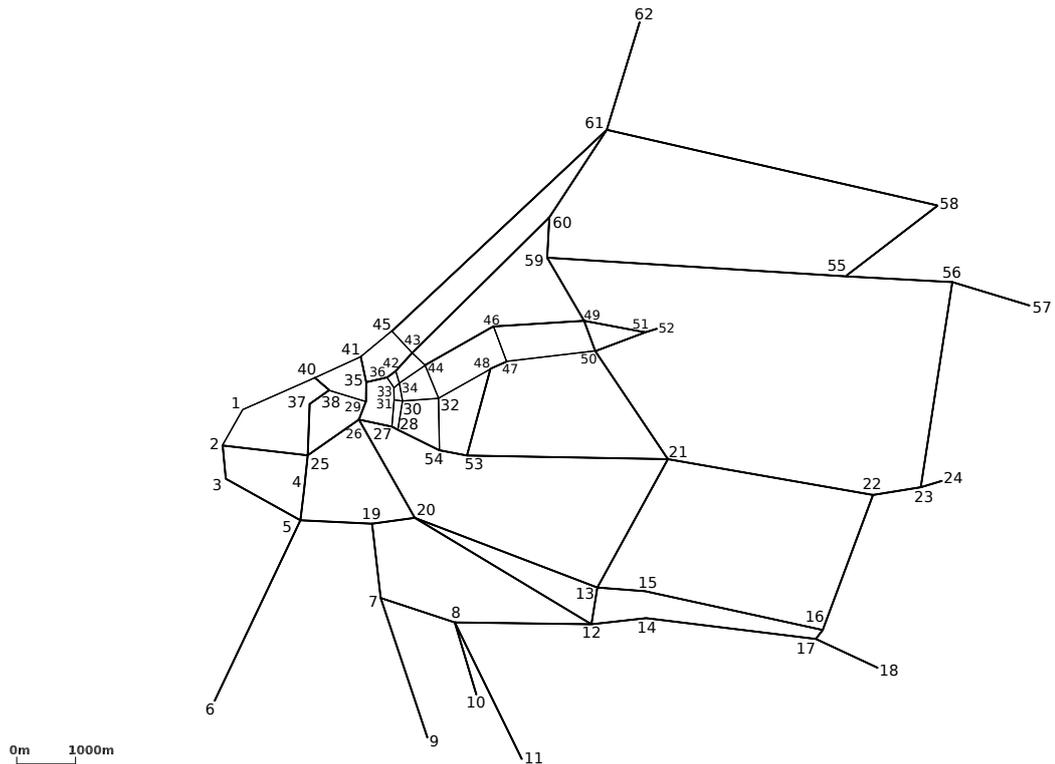


Figura 5.2: Esquema da rede POA *Arterials* com vértices numerados.

como resultado. A Tabela 5.1 exibe os vértices da rede POA *Arterials* e seus respectivos valores de centralidade de intermediação, em ordem decrescente. Para a localização geográfica dos pontos relacionados, a Figura 5.2 exibe a numeração dos vértices da rede POA *Arterials*.

Como é possível observar na Tabela 5.1, nos vértices 26, 36 e 35 ocorrem os maiores valores de centralidade de intermediação. Isso pode ser justificado pelo fato de esses vértices estarem situados na região interna do mapa e, como consequência, fazerem parte de muitos caminhos mínimos que conectam vértices distintos. Complementarmente, vértices situados nas extremidades do mapa recebem valores de centralidade iguais ou próximos a zero, como é o caso dos vértices 6, 62 e 9. Tal comportamento se dá por esses vértices ocorrerem na periferia do mapa e, portanto, não estarem presentes nos caminhos mínimos computados entre os vértices.

## 5.2 Modelagem da Demanda

A demanda utilizada nesse experimento, denominada Demanda Não Uniforme tipo Bairro → Centro (DNUBC), baseia-se em uma demanda arbitrária com o objetivo de reproduzir um comportamento de início de dia, onde os motoristas partem da periferia da cidade e vão em direção ao centro em busca de recursos e serviços. Para isso, foram definidos 15 distritos sobre a rede POA *Arterials* que serviram de origens e destinos das viagens, recebendo o nome dos vértices onde estavam situados. A Tabela 5.2 exibe a matriz OD que representa essa demanda, enquanto

que a Figura 5.3 exibe a localização dos distritos no mapa. Na Figura 5.3, distritos representados como círculos possuem papel majoritário de origem, enquanto que distritos representados como quadrados possuem característica majoritária de destinos.

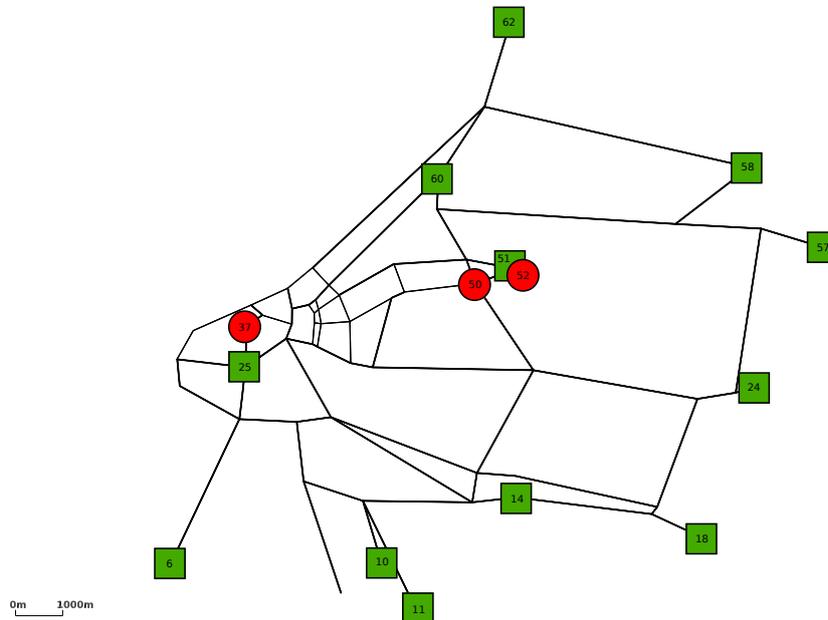


Figura 5.3: Esquema dos distritos da rede POA *Arterials*, onde quadrados representam distritos que possuem característica majoritária de origens, enquanto que distritos representados por círculos possuem característica majoritária de destinos.

Foram definidos volumes de demanda de 10%, 25% e 50% da capacidade total da rede. Uma vez que a rede possui capacidade total para 127.320 veículos, os valores absolutos envolvidos são os seguintes: a demanda de 10% equivale a 12.732 veículos; a demanda de 25%, a 31.830 veículos e a demanda de 50%, a 63.660 veículos.

### 5.3 Análise da Rede com Centralidade de Intermediação combinada com a Demanda

Para a análise da rede POA *Arterials* utilizando a centralidade de intermediação combinada com as demandas de tráfego, especificadas na Seção 5.2, utilizou-se a abordagem proposta na Seção 4.1. De modo que fossem testadas todas as funções de custo abordadas na Subseção 4.1.1, o método proposto foi repetido para cada combinação de demandas e funções de custo. Os resultados de centralidade de intermediação por função de custo e Demanda Não-Uniforme tipo Bairro→Centro (DNUBC) com volume de 25% estão listados na Tabela 5.3.

A Figura 5.4 apresenta os valores de centralidade de intermediação dos vértices da rede POA *Arterials* para demanda com volume igual a 25% distribuídos em ordem decrescente.

Desses, tomou-se os 5 vértices com maiores ocorrências de centralidade de intermediação como referência para prosseguimento da análise.

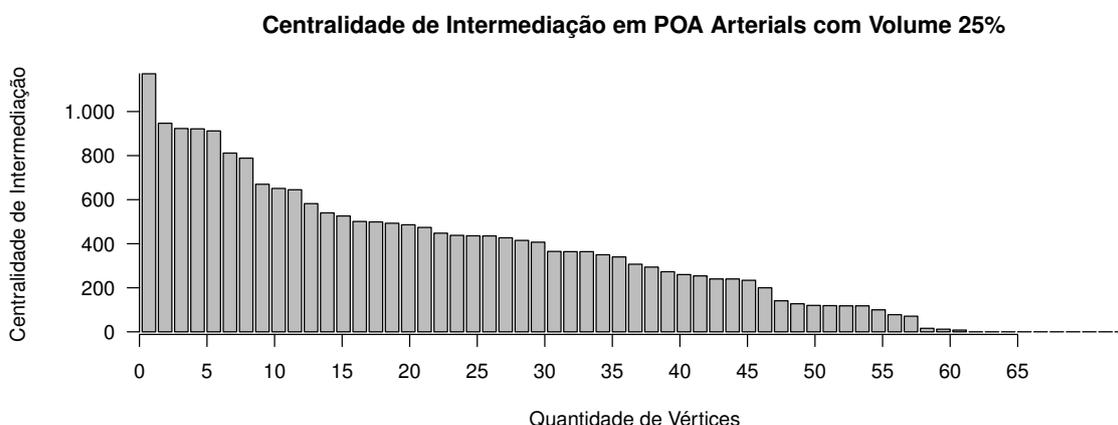


Figura 5.4: Distribuição dos valores de centralidade de intermediação calculados para os vértices da rede *POA Arterials* com demanda de volume 25% organizados em ordem decrescente.

Na Tabela 5.3, os cinco maiores valores de centralidade de intermediação encontram-se em destaque. Nessa tabela é possível notar, por exemplo, que ao considerar a demanda o vértice com maior centralidade passou a ser o 21, enquanto no caso onde não se considerava a demanda, era o 26 (Tabela 5.1).

#### 5.4 Comparação entre o Método Proposto e a Simulação Microscópica

Considerando-se a demanda especificada pela matriz OD da Tabela 5.2 e os volumes de demanda estabelecidos na Seção 4.4, realizou-se a simulação microscópica sobre a rede *POA Arterials*, extraíndo-se as taxas de ocupação de cada aresta em cada passo de tempo. As Figuras 5.5a, 5.5b e 5.5c exibem, respectivamente, os gráficos de ocupação média da rede ao longo do tempo para os diferentes volumes de demanda considerados, sendo esses, respectivamente, 10%, 25% e 50% da capacidade da rede. Através da análise desses gráficos é possível notar que os picos de ocupação ocorrem nos seguintes instantes: para a demanda de volume 10%, a rede atinge seu pico de ocupação no passo de tempo 6.863; para a demanda de volume 25%, o pico de ocupação ocorre no passo de tempo 7.251; e para a demanda de volume 50%, o pico de ocupação ocorre no passo de tempo 8.257. Isso se deve pela existência de congestionamento, onde os veículos permanecem parados aguardando a liberação das arestas e concorrendo para cruzar as junções.

Uma vez identificados os pontos onde ocorreram os picos de ocupações médias para os

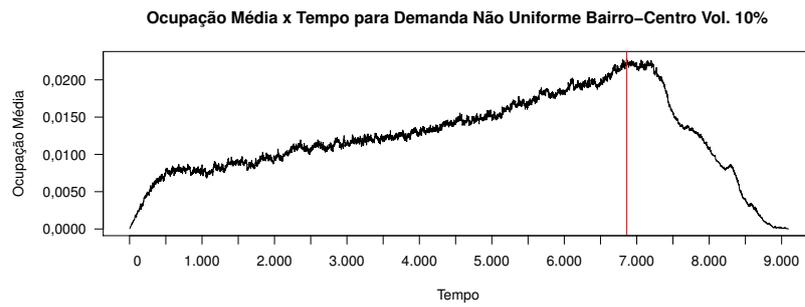
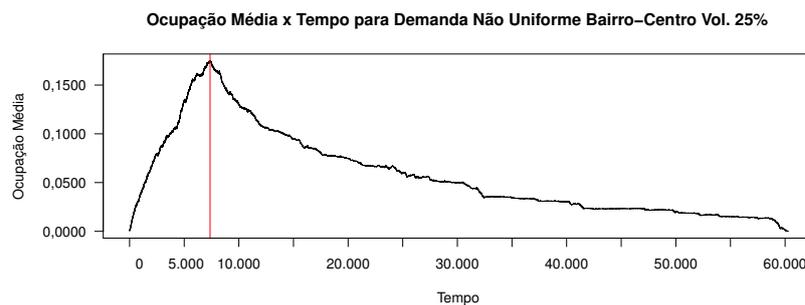
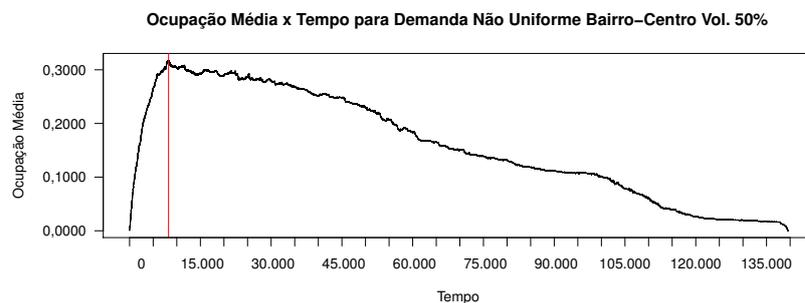
(a) POA *Arterials* DNUBC 10% com pico de ocupação em 6.863(b) POA *Arterials* DNUBC 25% com pico de ocupação em 7.251(c) POA *Arterials* DNUBC 50% com pico de ocupação em 8.257

Figura 5.5: Ocupação média das vias x tempo para Demanda Não Uniforme tipo Bairro→Centro (DNUBC) e volumes iguais a 10% (a), 25% (b) e 50% (c).

volumes de demanda simulados, torna-se possível analisar pontualmente onde ocorreram os instantes de maior ocupação e compará-los com os valores de centralidade de intermediação obtidos pelo método proposto. Para isso, foram obtidas as taxas de ocupação das vias no pico de ocupação das redes e calculada a centralidade de intermediação, conforme descrito na Seção 4.2. A Tabela 5.4 exibe os resultados da centralidade de intermediação para os vértices nas simulações dos volumes 10%, 25% e 50% da matriz OD especificada na Tabela 5.2.

Utilizando o processo especificado na Seção 4.3, é possível comparar o método proposto de cálculo da centralidade de intermediação combinada com a demanda com os valores de centralidade obtidos a partir da simulação microscópica. Nesse método, foi escolhido utilizar o coeficiente de correlação de Pearson a fim de comparar os resultados obtidos. A Tabela 5.5

exibe a correlação entre centralidade de intermediação, calculada para cada combinação de demanda e função de custo, e a obtida a partir da sua respectiva simulação microscópica.

Com base nos resultados da Tabela 5.5, é possível notar que funções que consideram a demanda, expressas pelas colunas  $F_1$ ,  $F_2$  e  $F_3$ , mostraram resultados melhores do que a função  $F_5$ , que considera apenas o comprimento das vias como custo das arestas. A função linear  $F_3$  foi a que apresentou os melhores resultados entre as funções estudadas. A função unitária  $F_4$ , apresentou bons resultados, superando  $F_1$  e  $F_2$  em algumas instâncias. Para todos os casos, a correlação diminui conforme aumentou-se o volume da demanda. Ainda para esse caso, a função  $F_2$  (linear decrescente) mostrou os melhores resultados.

## 5.5 Conclusão

Neste capítulo foi apresentada a rede POA *Arterials* e aplicado o cálculo da centralidade de intermediação sobre a mesma. A métrica foi aplicada para os vértices, uma vez que desejava-se realizar um estudo exploratório sobre a adequação da centralidade de intermediação na identificação de pontos centrais. Não se pôde avaliar inicialmente se a métrica refletia de fato os pontos centrais da rede em relação ao tráfego, até se obter os valores da centralidade de intermediação a partir da simulação.

Ao realizar-se a simulação, calculou-se a ocupação média da rede ao longo do tempo, onde foram identificados instantes onde a média de ocupação era máxima. Nesses instantes, foram extraídos os valores de ocupação das arestas e utilizados para ponderar o grafo representativo da rede. Sobre esse grafo foram calculados os valores de centralidade de intermediação que serviram de base de comparação para o método proposto. O capítulo 8 apresenta a compilação dos diferentes casos em um quadro comparativo, junto da discussão dos resultados.

Tabela 5.1: Centralidade de Intermediação dos vértices da rede POA *Arterials*.

Vértice	Centralidade de Intermediação	Vértice	Centralidade de Intermediação
26	1213	14	206
36	979	17	206
35	934	30	204
29	919	55	202
42	761	16	182
20	699	61	178
43	688	31	177
21	525	38	154
25	495	56	150
27	484	2	142
49	476	40	142
60	471	48	121
19	444	51	118
28	443	47	112
59	401	32	98
33	398	45	96
22	391	15	61
12	382	37	58
44	358	3	48
54	326	1	14
50	324	10	0
7	316	11	0
34	315	18	0
46	315	24	0
13	307	52	0
53	304	58	0
8	290	57	0
5	272	6	0
4	220	62	0
41	215	9	0
23	214		

Tabela 5.2: Matriz OD utilizada para o caso Não Uniforme tipo Bairro→Centro, onde o índice das linhas referem-se aos distritos de origem, os índices das colunas referem-se aos distritos de destino e o valor das células relacionam origens e destinos representando um coeficiente que corresponde à intensidade com que os veículos fazem essas viagens.

	<b>57</b>	<b>62</b>	<b>58</b>	<b>60</b>	<b>51</b>	<b>50</b>	<b>52</b>	<b>37</b>	<b>25</b>	<b>6</b>	<b>11</b>	<b>10</b>	<b>24</b>	<b>14</b>	<b>18</b>
<b>57</b>	0	1	1	1	1	2	2	2	1	1	1	1	1	1	1
<b>62</b>	1	0	1	1	1	4	4	4	1	1	1	1	0	1	1
<b>58</b>	1	1	0	1	1	2	2	2	1	1	1	1	1	1	1
<b>60</b>	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	0	1	0
<b>51</b>	0	0	0	1	0	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1
<b>50</b>	1	1	1	1	1	0	4	4	1	1	1	1	0	1	1
<b>52</b>	1	0	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	0	1	1
<b>37</b>	1	1	0	0	0	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1
<b>25</b>	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1
<b>6</b>	0	0	1	1	1	2	2	2	1	0	1	1	1	1	1
<b>11</b>	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1
<b>10</b>	0	0	1	1	1	2	2	2	1	1	1	0	1	1	1
<b>24</b>	1	1	1	1	1	2	2	2	1	1	1	1	0	1	1
<b>14</b>	1	1	1	1	1	2	2	2	1	1	1	1	0	0	1
<b>18</b>	1	1	1	1	1	2	2	2	1	1	1	1	1	1	0

Tabela 5.3: Valores de centralidade de intermediação da rede POA *Arterials* para simulação de demanda com volume 25% e funções de custo  $F_1$ : Exponencial Decrescente,  $F_2$ :  $\frac{1}{x}$ ,  $F_3$ : Linear Decrescente,  $F_4$ : Unitária e  $F_5$ : Comprimento da Via.

Vértice	Funções de Custo					Vértice	Funções de Custo				
	$F_1$	$F_2$	$F_3$	$F_4$	$F_5$		$F_1$	$F_2$	$F_3$	$F_4$	$F_5$
1	0	53	39	57	14	32	2	0	60	117	98
2	59	118	121	133	142	33	136	142	132	144	398
3	0	5	29	37	48	34	133	141	117	101	315
4	309	140	79	52	220	35	533	539	475	456	<b>934</b>
5	285	197	213	240	272	36	551	508	388	378	<b>979</b>
6	0	0	0	0	0	37	34	45	54	79	58
7	208	142	148	153	316	38	132	158	97	124	154
8	451	372	352	300	290	40	181	245	132	156	142
9	0	0	0	0	0	41	181	245	226	255	215
10	0	0	0	0	0	42	486	405	277	278	<b>761</b>
11	0	0	0	0	0	43	850	645	388	376	688
12	<b>1.150</b>	<b>1.160</b>	592	534	382	44	269	274	191	221	358
13	878	<b>895</b>	<b>968</b>	<b>901</b>	307	45	124	152	153	245	96
14	210	155	128	120	206	46	88	219	149	175	315
15	0	0	42	51	61	47	53	59	35	61	112
16	227	161	142	146	182	48	9	6	94	103	121
17	247	174	148	142	206	49	<b>1.124</b>	890	575	451	476
18	0	0	0	0	0	50	<b>1.212</b>	<b>1.004</b>	<b>666</b>	<b>546</b>	324
19	138	224	291	393	444	51	118	118	118	118	118
20	682	844	<b>962</b>	<b>1.000</b>	699	52	0	0	0	0	0
21	<b>1.407</b>	<b>1.382</b>	<b>1.188</b>	<b>1.080</b>	525	53	300	295	321	318	304
22	412	499	450	474	391	54	163	171	158	185	326
23	142	230	300	349	214	55	200	173	218	245	202
24	0	0	0	0	0	56	118	126	214	276	150
25	665	498	441	398	495	57	0	0	0	0	0
26	<b>1.106</b>	<b>1.038</b>	<b>1.000</b>	<b>959</b>	<b>1.213</b>	58	0	0	77	90	0
27	144	182	205	245	484	59	1.097	723	462	365	401
28	89	119	159	204	443	60	976	659	389	289	471
29	660	658	529	499	<b>919</b>	61	264	191	217	248	178
30	4	0	99	126	204	62	0	0	0	0	0
31	3	0	69	80	177						

Tabela 5.4: Valores de centralidade de intermediação calculado sobre as taxas de ocupação extraídas a partir de simulações de demandas com volumes 10%, 25% e 50% observadas, respectivamente, nos instantes 6.863, 7.251 e 8.257.

Vértice	Volumes de Demanda Simulados			Vértice	Volumes de Demanda Simulados		
	10%	25%	50%		10%	25%	50%
1	38	14	6	32	68	20	21
2	121	129	138	33	137	239	464
3	29	21	15	34	111	305	447
4	44	16	83	35	420	380	701
5	210	185	179	36	381	340	580
6	0	0	0	37	96	69	69
7	148	145	186	38	136	87	124
8	348	362	427	40	128	82	67
9	0	0	0	41	180	127	117
10	0	0	0	42	270	118	90
11	0	0	0	43	397	189	112
12	594	686	750	44	192	385	526
13	<b>959</b>	772	467	45	161	65	18
14	126	236	298	46	138	445	576
15	48	1	0	47	34	45	110
16	136	277	309	48	101	22	23
17	140	285	323	49	567	<b>1.109</b>	<b>1.002</b>
18	0	0	0	50	<b>658</b>	<b>1.071</b>	<b>916</b>
19	327	324	233	51	365	<b>826</b>	<b>903</b>
20	<b>1.004</b>	789	623	52	0	0	0
21	<b>1.142</b>	<b>1.378</b>	<b>1.177</b>	53	289	580	673
22	446	466	531	54	146	547	650
23	302	223	284	55	220	285	174
24	0	0	0	56	216	183	184
25	453	448	496	57	0	0	0
26	<b>1.040</b>	<b>1.043</b>	<b>1.292</b>	58	79	54	15
27	255	546	664	59	461	621	614
28	179	553	626	60	388	335	393
29	487	429	774	61	219	200	235
30	110	120	32	62	0	0	0
31	77	45	36				

Tabela 5.5: Correlação entre a centralidade de intermediação calculada pelo método proposto, considerando diferentes funções de custo, e sobre o grafo construído com base nos pesos extraídos no pico de ocupação da simulação microscópica realizada sobre a rede POA *Arterials*. Funções consideradas:  $F_1$ : Exponencial Decrescente,  $F_2$ :  $\frac{1}{x}$ ,  $F_3$ : Linear Decrescente,  $F_4$ : Unitária e  $F_5$ : Comprimento da Via.

Experimento	Função de Custo				
	$F_1$	$F_2$	$F_3$	$F_4$	$F_5$
POA Arterials DNUBC Vol. 10%	0,96	0,92	0,99	0,98	0,69
POA Arterials DNUBC Vol. 25%	0,80	0,84	0,84	0,81	0,58
POA Arterials DNUBC Vol. 50%	0,76	0,78	0,77	0,74	0,69

## 6 EXPERIMENTO 2 - *SIoux FALLS*

Como segundo experimento foi utilizada uma rede baseada na cidade *Sioux Falls*. Trata-se da mesma rede utilizada no trabalho de Chakirov e Fourie (2014). Nesse trabalho, os autores basearam-se em dados de censo para criar uma demanda desagregada e um modelo microscópico da rede *Sioux Falls*. A Figura 6.1 exibe a topologia da rede, composta por 24 vértices e capacidade total de 67.359 veículos.

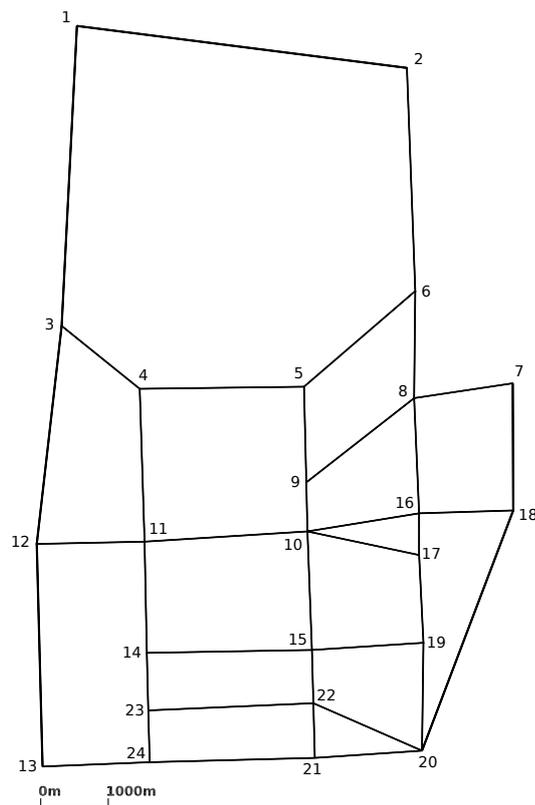


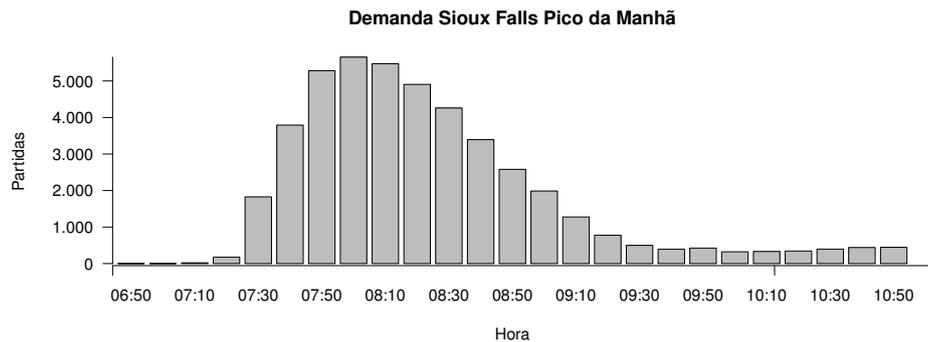
Figura 6.1: Esquema da rede *Sioux Falls* com vértices numerados.

### 6.1 Modelagem da Demanda

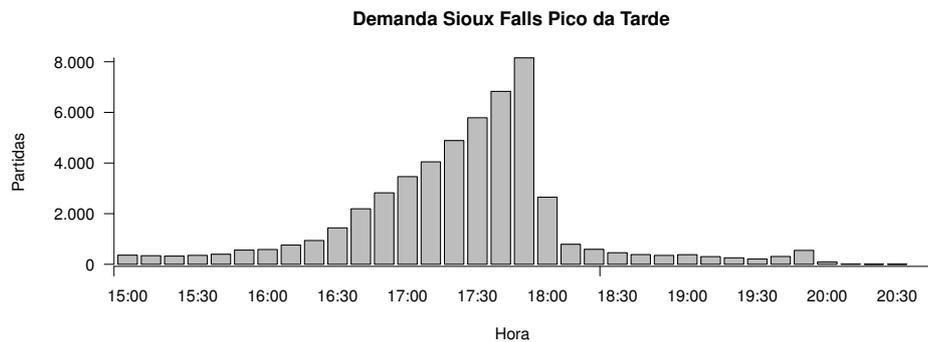
No trabalho de Chakirov e Fourie (2014), os autores desenvolveram um modelo de demanda para a rede *Sioux Falls* com base em dados de censo em combinação com um processo de atribuição de tráfego dinâmico. Essa demanda foi reutilizada no presente trabalho, tendo sido desmembrada em duas partes, sendo a primeira correspondente ao pico da manhã e a segunda ao pico da tarde.

A demanda pico da manhã corresponde ao horário entre às 6h50 e 10h50 e possui um volume total de 45.000 veículos. A demanda pico da tarde corresponde ao horário entre às 15h e 20h30

e equivale a um volume de 51.600 veículos. As Figuras 6.2a e 6.2b exibem, respectivamente, como as demandas pico da manhã e pico da tarde estão distribuídas ao longo do tempo. Os valores representados nos gráficos correspondem às quantidades de veículos que partem de suas origens em direção aos seus destinos em cada instante de tempo, agrupados em intervalos de 10 minutos.



(a)



(b)

Figura 6.2: Demandas pico da manhã (a) e pico da tarde (b) utilizadas nos experimentos com a rede *Sioux Falls*. Os valores foram agrupados em intervalos de 10 minutos.

## 6.2 Análise da Rede com Centralidade de Intermediação combinada com a Demanda

Os resultados da centralidade de intermediação combinada com as demandas pico da manhã e pico da tarde estão listados, respectivamente, nas Tabelas 6.1 e 6.2. Os valores obtidos pelo método proposto estão exibidos nas colunas de  $F_1$  à  $F_5$ , enquanto a coluna “Simulação” exhibe os valores de centralidade obtidos pela simulação microscópica.

Tabela 6.1: Centralidade de intermediação por vértice calculada utilizando diferentes funções de custo e simulação sobre a rede *Sioux Falls* com demanda pico da manhã. Os cinco maiores valores de cada caso estão destacados. Funções consideradas:  $F_1$ : Exponencial Decrescente,  $F_2$ :  $\frac{1}{x}$ ,  $F_3$ : Linear Decrescente,  $F_4$ : Unitária e  $F_5$ : Comprimento da Via.

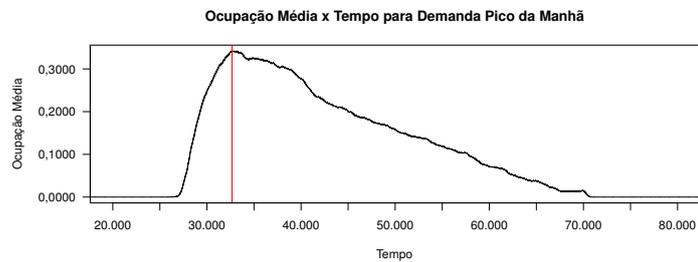
Vértice	Função de Custo					Simulação
	$F_1$	$F_2$	$F_3$	$F_4$	$F_5$	
1	9.103	9.103	9.647	9.924	9.103	9.375
2	9.117	12.231	10.089	10.089	10.665	8.577
3	15.888	13.017	14.916	15.193	14.340	16.428
4	<b>19.294</b>	17.562	<b>17.038</b>	<b>19.117</b>	17.006	12.907
5	6.554	10.559	15.610	<b>18.557</b>	<b>24.134</b>	7.572
6	15.091	<b>18.700</b>	15.519	15.242	16.639	14.279
7	3.326	3.560	3.560	3.560	2.767	10.133
8	<b>18.790</b>	<b>18.808</b>	12.784	12.961	13.774	16.894
9	13.674	13.623	<b>19.573</b>	<b>20.462</b>	<b>27.655</b>	14.953
10	<b>42.980</b>	<b>37.882</b>	<b>36.784</b>	<b>30.539</b>	<b>33.664</b>	<b>31.824</b>
11	<b>35.269</b>	<b>33.075</b>	<b>31.314</b>	<b>25.068</b>	<b>23.418</b>	<b>42.001</b>
12	16.393	16.895	11.209	11.097	8.809	17.374
13	10.899	8.111	5.499	5.499	4.923	4.923
14	4.657	6.185	9.400	12.623	15.148	<b>29.303</b>
15	16.300	15.283	<b>17.327</b>	18.509	<b>17.621</b>	<b>29.817</b>
16	<b>25.777</b>	<b>21.679</b>	12.148	12.148	13.699	<b>29.798</b>
17	7.426	8.471	8.412	8.412	8.412	23.639
18	13.673	12.720	7.480	7.303	7.066	15.859
19	4.654	5.728	7.226	7.338	7.366	28.280
20	11.302	10.693	10.630	10.520	10.864	8.644
21	5.860	6.235	6.000	6.753	6.374	4.398
22	13.596	12.665	14.285	14.710	13.845	9.793
23	4.487	6.211	7.712	8.744	9.702	9.189
24	7.873	7.197	6.526	6.988	8.764	6.051

### 6.3 Comparação entre o Método Proposto e a Simulação Microscópica

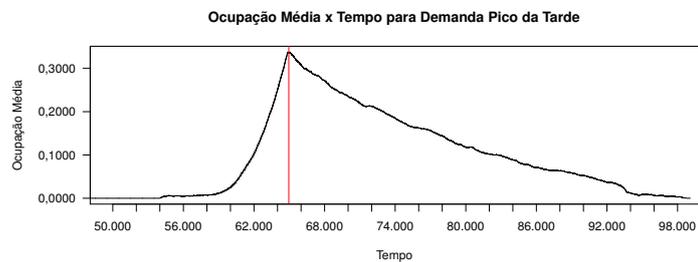
Repetindo-se o mesmo processo de simulação microscópica realizado para a rede POA *Arterials*, descrito na Seção 5.4, obteve-se os valores de ocupação das vias da rede *Sioux Falls*. As Figuras 6.3a e 6.3b exibem, respectivamente, os gráficos de ocupação da rede para as demandas pico da manhã e pico da tarde. Na demanda pico da manhã, o instante de maior ocupação da rede ocorreu no passo de tempo 32.671 (por volta das 8h), enquanto que na demanda pico da tarde, ocorreu no passo de tempo 64.956 (por volta das 18h).

Os valores de centralidade de intermediação calculados sobre a simulação nesses instantes estão listados nas colunas “Simulação” das Tabelas 6.1 e 6.2. As correlações entre a centralidade

de intermediação calculada pelo método proposto e a calculada nos picos de ocupação de cada uma das demandas especificadas estão relacionadas na Tabela 6.3.



(a) *Sioux Falls* com pico de ocupação em 32.671



(b) *Sioux Falls* com pico de ocupação em 64.956

Figura 6.3: Ocupação média das vias x tempo sobre a rede *Sioux Falls* para demandas pico manhã (a) e pico tarde (b).

Pelos valores de correlação exibidos na Tabela 6.3, é possível notar que as funções  $F_2$  e  $F_3$ , que consideram a demanda, obtiveram desempenho superiores às funções  $F_4$  e  $F_5$ . Com exceção do caso *Sioux Falls* Pico da Tarde, que para a função  $F_1$  apresentou um desempenho abaixo das demais, todas as funções que consideram a demanda apresentaram desempenhos semelhantes.

Além disso, a demanda pico da manhã apresentou resultados de correlação inferiores à demanda pico da tarde. Entre as possíveis explicações para isso ter acontecido, pode estar a forma como a demanda foi gerada. Segundo Chakirov e Fourie (2014), a demanda utilizada em seu trabalho foi gerada por um processo iterativo de atribuição de tráfego. Diferente do processo de cálculo de rotas utilizado pelo método proposto, que se baseia no caminho de menor custo, esse processo, segundo os autores, realiza a distribuição das rotas entre os possíveis caminhos que conectam cada par OD. Isso faz com que as rotas sejam mais bem distribuídas pela rede, podendo causar uma divergência em relação ao método proposto, pois nesse as rotas são baseadas no caminho de menor custo.

## 6.4 Conclusão

Neste capítulo foi apresentada a rede *Sioux Falls* e definidas as demandas utilizadas. Nesse caso, as demandas foram baseadas no modelo de demanda desenvolvido no trabalho de Chakirov e Fourie (2014). Criou-se então, a partir da demanda original, duas novas demandas, denominadas pico da manhã e pico da tarde.

A partir desse ponto, todo o processo desenvolvido sobre esse experimento seguiu a metodologia aplicada sobre a rede POA *Arterials*. Conforme descrito no Capítulo 5, realizou-se as simulações microscópicas das demandas e encontrou-se o pico de ocupação das mesmas, sobre o qual foi calculada a centralidade de intermediação.

Ao realizar-se a comparação através da correlação, notou-se que o método proposto obteve resultados superiores ao caso onde considera-se apenas o comprimento das vias como pesos das arestas. Também foi observado que os resultados encontrados nesse experimento foram, em geral, inferiores aos encontrados para a rede POA *Arterials*, e que as diferenças encontradas podem ter sido causadas pela forma como a demanda foi gerada.

Tabela 6.2: Centralidade de intermediação por vértice calculada utilizando diferentes funções de custo e simulação sobre a rede *Sioux Falls* com demanda pico da tarde. Os cinco maiores valores de cada caso estão destacados. Funções consideradas:  $F_1$ : Exponencial Decrescente,  $F_2$ :  $\frac{1}{x}$ ,  $F_3$ : Linear Decrescente,  $F_4$ : Unitária e  $F_5$ : Comprimento da Via.

Vértice	Função de Custo					Simulação
	$F_1$	$F_2$	$F_3$	$F_4$	$F_5$	
1	9.375	9.647	9.647	9.924	9.103	9.103
2	8.325	8.325	10.089	10.089	10.665	8.577
3	16.680	16.680	14.916	15.193	14.340	16.428
4	<b>20.852</b>	<b>20.580</b>	<b>17.038</b>	<b>19.117</b>	17.006	<b>20.872</b>
5	5.474	5.474	15.610	<b>18.557</b>	<b>24.134</b>	6.554
6	14.279	14.007	15.519	15.242	16.639	14.551
7	10.077	7.099	2.767	3.560	2.767	3.573
8	<b>20.506</b>	<b>21.099</b>	12.682	12.961	13.774	<b>20.013</b>
9	12.709	13.816	<b>19.471</b>	<b>20.462</b>	<b>27.655</b>	18.401
10	<b>31.763</b>	<b>37.148</b>	<b>35.514</b>	<b>30.539</b>	<b>33.664</b>	<b>47.393</b>
11	<b>34.800</b>	<b>36.139</b>	<b>29.027</b>	<b>25.068</b>	<b>23.418</b>	<b>34.503</b>
12	15.687	11.670	11.139	11.097	8.809	9.549
13	16.014	8.994	5.499	5.499	4.923	5.067
14	12.755	10.924	8.477	12.623	15.148	7.328
15	9.903	11.487	<b>17.885</b>	18.509	<b>17.621</b>	<b>20.315</b>
16	15.963	<b>20.261</b>	12.941	12.148	13.699	18.246
17	7.681	6.979	8.412	8.412	8.412	13.486
18	16.630	12.958	7.582	7.303	7.066	7.732
19	4.402	4.402	7.296	7.338	7.366	8.954
20	20.154	13.627	11.180	10.520	10.864	11.005
21	17.082	10.141	8.706	6.753	6.374	5.956
22	8.773	8.507	14.542	14.710	13.845	17.863
23	12.941	9.743	6.255	8.744	9.702	9.641
24	<b>22.669</b>	13.640	7.982	6.988	8.764	7.898

Tabela 6.3: Correlação entre a centralidade de intermediação calculada pelo método proposto, considerando diferentes funções de custo, e sobre o grafo construído com base nos pesos extraídos no pico de ocupação da simulação microscópica realizada sobre a rede *Sioux Falls*. Funções consideradas:  $F_1$ : Exponencial Decrescente,  $F_2$ :  $\frac{1}{x}$ ,  $F_3$ : Linear Decrescente,  $F_4$ : Unitária e  $F_5$ : Comprimento da Via.

Experimento	Função de Custo				
	$F_1$	$F_2$	$F_3$	$F_4$	$F_5$
Sioux Falls pico da manhã	0,61	0,61	0,59	0,54	0,45
Sioux Falls pico da tarde	0,67	0,89	0,93	0,87	0,78

## 7 EXPERIMENTO 3 - GRADE REGULAR 10X10

O modelo para o estudo em questão consiste em uma rede disposta na forma de grade de tamanho 10x10, onde as arestas representam as vias e os vértices, os cruzamentos entre elas. Para a construção dessa rede, foram definidos 100 vértices, organizados na forma de uma grade composta por 10 linhas e 10 colunas, conectados por arcos ortogonais representando as vias. Cada uma dessas vias possui dois sentidos, sendo a rede, portanto, representada por um grafo bidirecionado. Além disso, todas as vias possuem extensão igual a 100 metros, o que se traduz em uma capacidade de rede igual a 4.890 veículos. A Figura 7.1 exibe a topologia da rede com as linhas e colunas identificadas para auxiliar na localização dos vértices.

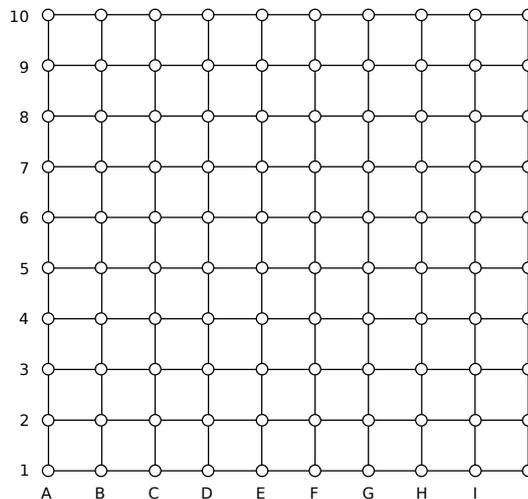


Figura 7.1: Esquema da grade 10x10 contendo a nomenclatura dos vértices

### 7.1 Análise da Rede com Centralidade de Intermediação

O estudo da métrica sobre a Grade Regular 10x10 considera que todas as arestas possuem o mesmo tamanho. Assim, foi atribuído às arestas do grafo o valor de 100 metros e em seguida calculada a centralidade de intermediação dos vértices.

Ao analisar-se os resultados dos valores de centralidade de intermediação sobre a grade 10x10, notou-se que os valores mais altos ocorriam próximo ao centro, enquanto que os mais baixos ocorriam nas bordas. A fim de sumarizar os valores, a grade foi dividida em níveis que vão do mais interno ao mais externo, conforme apresentado na Figura 7.2.

A Tabela 7.1 exibe os valores médios da centralidade de intermediação obtidos sobre os vértices de cada nível. Como é possível notar, os maiores valores de centralidade de intermediação ocorrem nos vértices centrais (C1) e vão diminuindo em direção à borda. Isso pode ser

confirmado através da Tabela 7.2 e ocorre conforme o previsto, uma vez que era esperada a existência de mais caminhos mínimos passando pelo centro da grade (maior centralidade) do que pela borda.

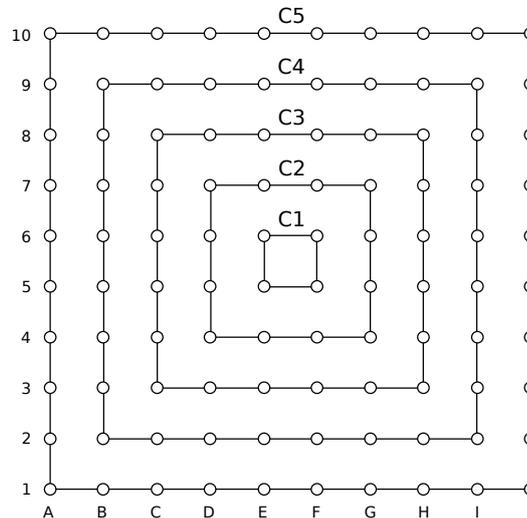


Figura 7.2: Divisão da rede em níveis para análise da centralidade de intermediação

Tabela 7.1: Média da centralidade de intermediação de cada nível

Nível	Média da <i>CI</i>
C1	1.232,41
C2	1.097,47
C3	852,73
C4	533,17
C5	167,13

## 7.2 Modelagem da Demanda

Com o objetivo de analisar o comportamento da centralidade de intermediação em diferentes situações, foram especificados três diferentes padrões de demanda, sendo esses Demanda Uniforme, Demanda Não Uniforme tipo Borda→Centro e Demanda Não Uniforme tipo Centro→Borda. A representação dos distritos Borda e Centro está ilustrada na Figura 7.3. Para as demandas Borda→Centro e Centro→Borda, o distrito Centro foi definido como sendo os quatro vértices centrais da grade, sendo os demais considerados como sendo a região Borda. Além disso, para cada um desses padrões foram definidos volumes de demanda iguais a 10%,

Tabela 7.2: Valores de centralidade de intermediação de cada vértice considerando todas as arestas com o mesmo custo. Os maiores valores de centralidade ocorrem no centro da grade e estão em destaque.

	<b>a</b>	<b>b</b>	<b>c</b>	<b>d</b>	<b>e</b>	<b>f</b>	<b>g</b>	<b>h</b>	<b>i</b>	<b>j</b>
<b>10</b>	9	121	182	215	230	230	215	182	121	9
<b>9</b>	121	346	492	580	621	621	580	492	346	121
<b>8</b>	182	492	712	853	922	922	853	712	492	182
<b>7</b>	215	580	853	1.036	<b>1.128</b>	<b>1.128</b>	1.036	853	580	215
<b>6</b>	230	621	922	<b>1.128</b>	<b>1.232</b>	<b>1.232</b>	<b>1.128</b>	922	621	230
<b>5</b>	230	621	922	<b>1.128</b>	<b>1.232</b>	<b>1.232</b>	<b>1.128</b>	922	621	230
<b>4</b>	215	580	853	1.036	<b>1.128</b>	<b>1.128</b>	1.036	853	580	215
<b>3</b>	182	492	712	853	922	922	853	712	492	182
<b>2</b>	121	346	492	580	621	621	580	492	346	121
<b>1</b>	9	121	182	215	230	230	215	182	121	9

25%, 50% e 75% da capacidade da grade regular 10x10.

Os padrões de demanda especificados estão descrito a seguir:

**Demanda Uniforme** Demanda onde todos os vértices da rede podem ser origem e destino das viagens com igual probabilidade. O objetivo é criar viagens aleatórias dentro da grade 10x10.

**Demanda Não Uniforme tipo Borda→Centro** Demanda onde as viagens partem da periferia em direção ao centro da grade 10x10. O objetivo desta demanda é simular um congestionamento na região central do mapa.

**Demanda Não Uniforme tipo Centro→Borda** Demanda onde todas as viagens partem do centro em direção à borda do mapa. O objetivo desta demanda é simular um padrão complementar ao descrito anteriormente.

### 7.3 Comparação entre o Método Proposto e a Simulação Microscópica

Utilizando-se o mesmo processo de comparação dos resultados descrito na Seção 4.3, obtiveram-se os resultados listados na Tabela 7.3. Comparando-se os resultados da centralidade de intermediação obtidos pelo método proposto com os obtidos pela simulação microscópica, pôde-se notar que o método proposto, representado nas colunas  $F_1$ ,  $F_2$  e  $F_3$ , apresentou resultados semelhantes aos das colunas  $F_4$  e  $F_5$  para as demandas DNUBC e DNUCB.

As funções exponencial  $F_1$  e linear  $F_3$  demonstraram melhor desempenho na maior parte das instâncias do caso Grade 10x10 Borda→Centro (DNUBC). Para o caso Grade 10x10 com

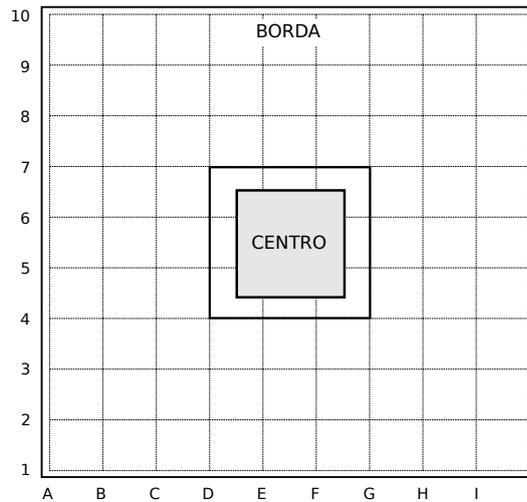


Figura 7.3: Esquema de distritos da grade 10x10.

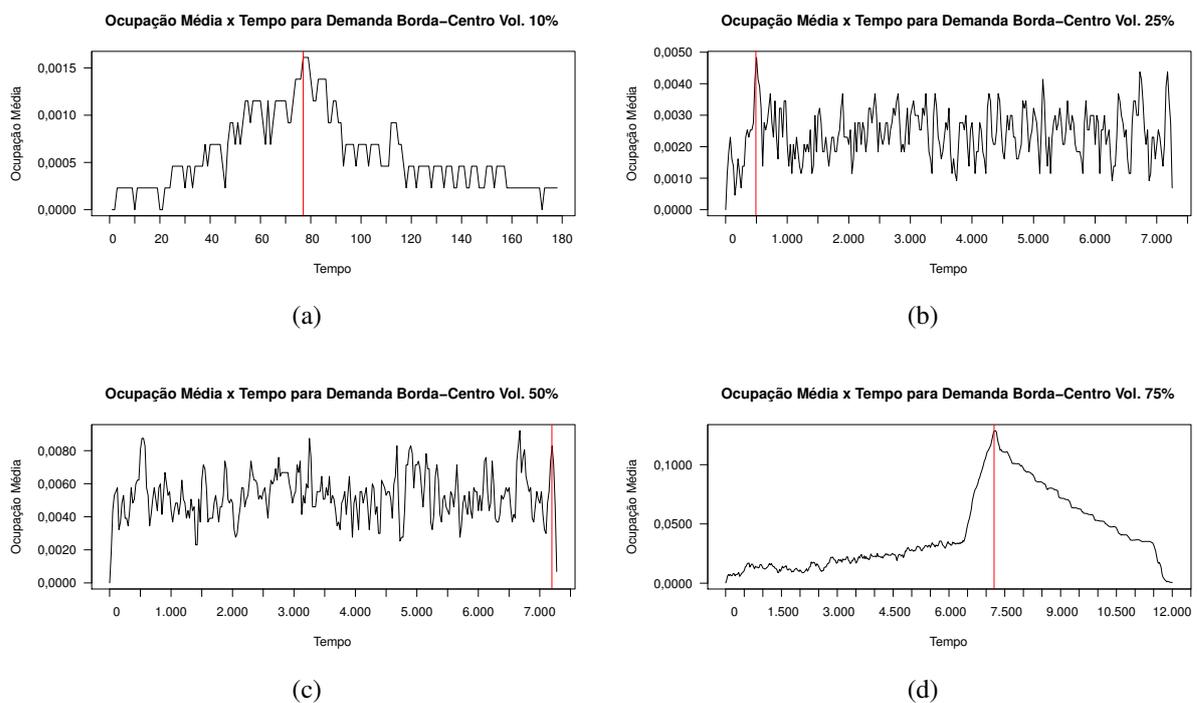


Figura 7.4: Ocupação média x tempo obtida pela simulação das demandas não uniformes tipo Borda-Centro sobre a Grade Regular 10x10.

Demanda Uniforme (DU) os melhores resultados foram obtidos com as funções  $F_4$ , que corresponde à função unitária, e  $F_5$ , onde considera-se apenas o comprimento da via como peso da aresta. Para o caso Grade 10x10 Centro→Borda, os resultados obtidos não são conclusivos.

Com o objetivo de descartar possíveis vieses gerados pela existência de diversos caminhos mínimos de mesmo custo sobre grades regulares, optou-se por estender os experimentos de modo a realizar a geração das rotas por outro processo. Para isso, utilizou-se o utilitário *one-shot assignment*, descrito na Seção 4.4.2, para se gerar demandas com rotas mais bem distribuídas

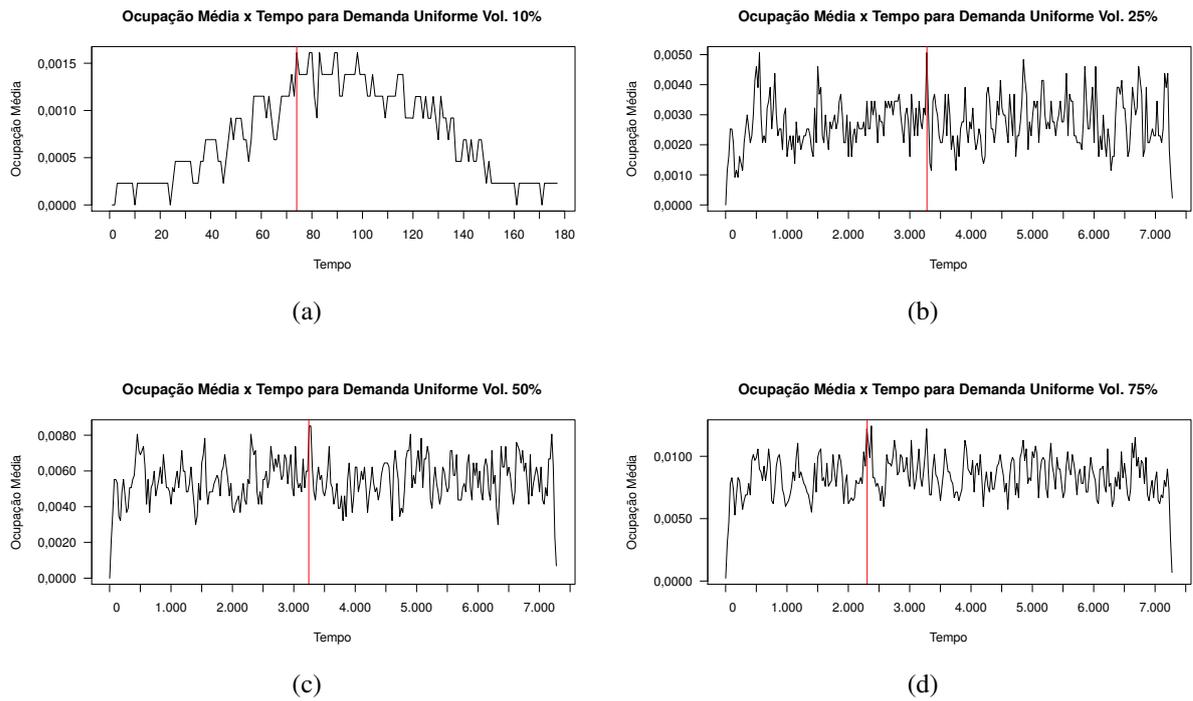


Figura 7.5: Ocupação média x tempo obtida pela simulação das demandas uniformes sobre a Grade Regular 10x10.

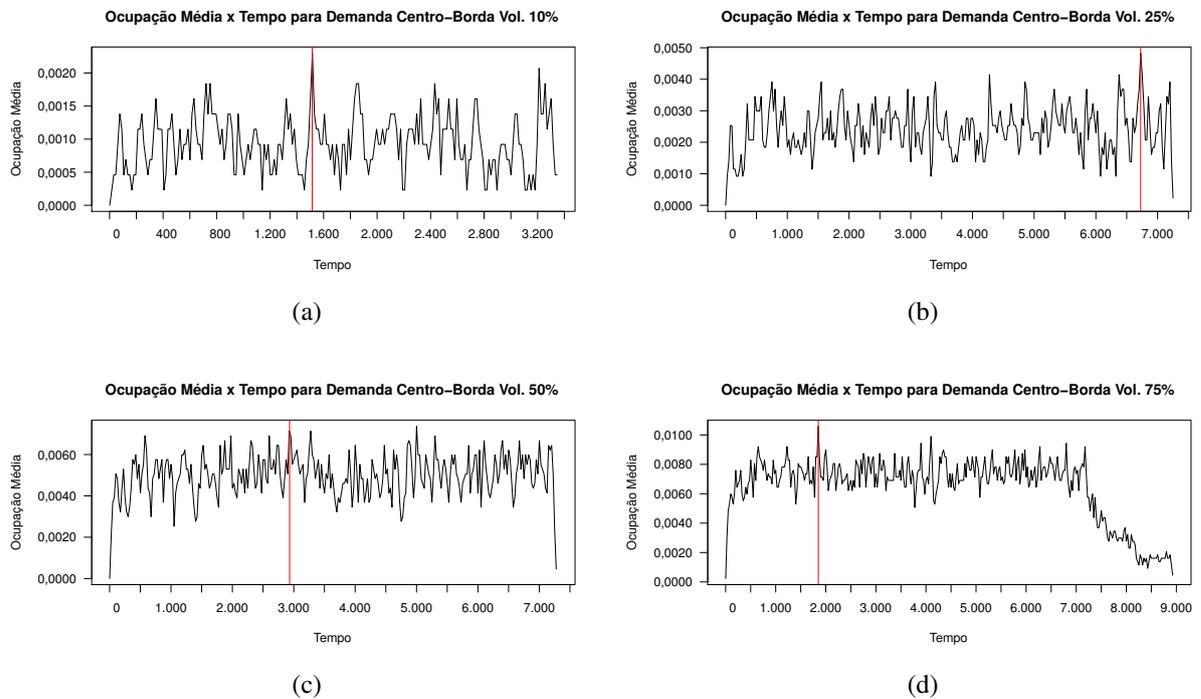


Figura 7.6: Ocupação média x tempo obtida pela simulação das demandas não uniformes tipo centro-borda sobre a Grade Regular 10x10.

sobre a grade.

Foram criadas então novas versões das demandas já estabelecidas, e realizadas novas simulações microscópicas. Os resultados da correlação entre a centralidade de intermediação entre a abordagem proposta e as simulações das novas demandas estão listados na Tabela 7.4. Pela análise dos resultados é possível notar que, para as funções que consideram a demanda, os resultados da correlação diminuíram em média 10% em relação à versão anterior dos experimentos. No caso da demanda DNUBC de volume igual a 75%, a queda foi significativa e estendeu-se por todos os experimentos, inclusive aos que não consideram a demanda. Ao que parece, por se tratar de um caso extremo, onde a demanda em questão possui volume muito elevado e distante da realidade, uma fila muito grande foi gerada na entrada dos quatro vértices que compõem a região centro da grade.

Tabela 7.3: Correlação entre a centralidade de intermediação calculada pelo método proposto, considerando diferentes funções de custo, e sobre o grafo construído com base nos pesos extraídos no pico de ocupação da simulação microscópica realizada sobre a Grade Regular 10x10. Funções consideradas:  $F_1$ : Exponencial Decrescente,  $F_2$ :  $\frac{1}{x}$ ,  $F_3$ : Linear Decrescente,  $F_4$ : Unitária e  $F_5$ : Comprimento da Via.

Experimento	Função de Custo				
	$F_1$	$F_2$	$F_3$	$F_4$	$F_5$
Grade 10x10 DNUBC Vol. 10%	0,84	0,79	0,88	0,89	0,89
Grade 10x10 DNUBC Vol. 25%	0,90	0,83	0,91	0,86	0,86
Grade 10x10 DNUBC Vol. 50%	0,91	0,85	0,93	0,80	0,80
Grade 10x10 DNUBC Vol. 75%	0,94	0,80	0,93	0,73	0,73
Grade 10x10 DU Vol. 10%	0,67	0,61	0,67	0,89	0,89
Grade 10x10 DU Vol. 25%	0,63	0,59	0,63	0,91	0,91
Grade 10x10 DU Vol. 50%	0,73	0,73	0,73	0,75	0,75
Grade 10x10 DU Vol. 75%	0,69	0,71	0,67	0,87	0,87
Grade 10x10 DNUCB Vol. 10%	0,90	0,73	0,90	0,88	0,88
Grade 10x10 DNUCB Vol. 25%	0,84	0,82	0,85	0,87	0,87
Grade 10x10 DNUCB Vol. 50%	0,78	0,67	0,78	0,83	0,83
Grade 10x10 DNUCB Vol. 75%	0,90	0,77	0,89	0,81	0,81

## 7.4 Conclusão

Nesse capítulo foi apresentada a Grade 10x10, rede criada sinteticamente para auxiliar no entendimento da distribuição dos valores de centralidade de intermediação sobre a rede viária, e os resultados obtidos pela aplicação do cálculo da métrica sobre a mesma. Sobre essa rede, foram estabelecidos três padrões de demanda, sendo esses Demanda Uniforme (DU),

Tabela 7.4: Correlação entre a centralidade de intermediação calculada pelo método proposto e simulação microscópica realizada sobre a Grade Regular 10x10 com as rotas da demanda calculadas por *one-shot assignment*. Funções consideradas:  $F_1$ : Exponencial Decrescente,  $F_2$ :  $\frac{1}{x}$ ,  $F_3$ : Linear Decrescente,  $F_4$ : Unitária e  $F_5$ : Comprimento da Via.

Experimento	Função de Custo				
	$F_1$	$F_2$	$F_3$	$F_4$	$F_5$
Grade 10x10 DNUBC Vol. 10% ( <i>one-shot assign.</i> )	0,77	0,65	0,77	0,86	0,86
Grade 10x10 DNUBC Vol. 25% ( <i>one-shot assign.</i> )	0,78	0,74	0,78	0,85	0,85
Grade 10x10 DNUBC Vol. 50% ( <i>one-shot assign.</i> )	0,79	0,69	0,79	0,84	0,84
Grade 10x10 DNUBC Vol. 75% ( <i>one-shot assign.</i> )	0,14	0,13	0,14	0,24	0,24
Grade 10x10 DU Vol. 10% ( <i>one-shot assign.</i> )	0,52	0,45	0,52	0,83	0,83
Grade 10x10 DU Vol. 25% ( <i>one-shot assign.</i> )	0,68	0,65	0,68	0,90	0,90
Grade 10x10 DU Vol. 50% ( <i>one-shot assign.</i> )	0,61	0,61	0,61	0,84	0,83
Grade 10x10 DU Vol. 75% ( <i>one-shot assign.</i> )	0,56	0,54	0,55	0,83	0,83
Grade 10x10 DNUCB Vol. 10% ( <i>one-shot assign.</i> )	0,81	0,72	0,80	0,87	0,87
Grade 10x10 DNUCB Vol. 25% ( <i>one-shot assign.</i> )	0,78	0,75	0,80	0,83	0,83
Grade 10x10 DNUCB Vol. 50% ( <i>one-shot assign.</i> )	0,80	0,72	0,81	0,80	0,80
Grade 10x10 DNUCB Vol. 75% ( <i>one-shot assign.</i> )	0,81	0,63	0,81	0,81	0,81

Demanda Não Uniforme tipo Borda-Centro (DNUBC) e Demanda Não Uniforme tipo Centro-Borda (DNUCB), de modo a analisar a distribuição da centralidade de intermediação em diversas situações. Além disso, foram especificados volumes de demanda iguais a 10%, 25%, 50% e 75% da capacidade da rede para cada um dos casos.

A abordagem proposta, que combina centralidade de intermediação com a demanda, mostrou-se mais eficiente para o caso Grade 10x10 Borda→Centro, que é a única demanda em que as rotas convergem para um mesmo local da rede. Nesse caso, as funções que demonstraram melhor desempenho foram  $F_1$  (exponencial decrescente) e  $F_3$  (linear decrescente). No caso Grade 10x10 com demanda uniforme (DU), as funções unitária ( $F_4$ ) e comprimento da aresta ( $F_5$ ) foram as que demonstraram melhor desempenho. Para o caso Grade 10x10 Centro→Borda, as funções exponencial ( $F_1$ ), linear ( $F_3$ ) e unitária ( $F_4$ ) demonstraram desempenho semelhante, sendo o experimento não conclusivo.

Com o objetivo de eliminar qualquer tipo de viés existente sobre a geração de caminhos mínimos sobre grades regulares, optou-se por utilizar uma segunda versão das demandas especificadas, com as rotas geradas através de um processo incremental de distribuição das rotas. Para isso, utilizou-se o utilitário *one-shot assignment* presente no pacote do simulador SUMO. Após as novas versões das demandas terem sido simuladas e comparadas com o método proposto, concluiu-se que a correlação diminuiu cerca de 10%, indicando que o método não consegue

explicar a distribuição da demanda para o caso da grade regular.

## 8 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Diante dos resultados obtidos pela realização dos experimentos utilizando as diferentes funções de custo, tipos e volumes de demandas considerados, este capítulo propõe-se a fazer uma análise do desempenho da abordagem proposta. Para isso, inicialmente calculou-se o coeficiente de correlação de Pearson entre os valores de centralidade de intermediação obtidos pelo método proposto, considerando apenas o grafo ponderado com as rotas oriundas da matriz OD, e os valores de centralidade de intermediação calculados sobre os valores de ocupação extraídos da simulação microscópica da demanda. A Tabela 8.1 apresenta uma compilação dos resultados já exibidos parcialmente ao longo dos experimentos.

As Seções 8.1, 8.2 e 8.3 discutem o desempenho observado por cada uma das funções nos diferentes experimentos. A Seção 8.4 apresenta a análise da significância das correlações apresentadas e estende a análise dos experimentos para o coeficiente de correlação de Kendall. Por fim, a Seção 8.5 apresenta um guia de recomendação do uso das funções de acordo com as características das redes e tipos de demanda utilizados.

### 8.1 Análise dos Resultados de POA *Arterials*

Os experimentos sobre a rede POA *Arterials* foram realizados para os volumes de demanda 10%, 25% e 50%, e apresentaram, para as funções propostas ( $F_1$ ,  $F_2$  e  $F_3$ ), resultados superiores à função  $F_5$  (comprimento da via), que corresponde a utilizar o comprimento da via como peso da aresta, e na maior parte dos casos, à função  $F_4$  (unitária). A função linear  $F_3$  demonstrou o melhor desempenho em todas as instâncias da rede POA *Arterials*.

A partir da demanda de 25% da capacidade total da rede, algumas arestas começam a se tornar completamente ocupadas, impedindo a inserção de novos veículos na rede e causando *deadlocks* nas junções. Dessa forma, simulações para demandas acima de 25% da capacidade total da rede começaram a se mostrar irreais, devido ao grande volume de bloqueios ocorridos. Além disso, o simulador possui um parâmetro de tempo de espera máximo que um veículo pode permanecer bloqueado até ser deslocado para o próximo ponto liberado da rodovia (*teleport*). A partir de um volume de 25% da capacidade da rede, além de muitos bloqueios, também começaram a ocorrer muitos *teleports*.

Analisando a Tabela 8.1, é possível observar que as funções  $F_1$ ,  $F_2$  e  $F_3$  apresentaram resultados muito próximos, que parecem equivalentes para a rede em questão. Também é possível observar que, para volumes menores a correlação obtida foi maior, o que pode ser atribuído ao fato da simulação microscópica considerar fatores que o modelo estático não considera, como

Tabela 8.1: Correlação utilizando o método de Pearson entre a centralidade de intermediação calculada pelo método proposto, considerando diferentes funções de custo, e sobre o grafo construído com base nos pesos extraídos no pico de ocupação da simulação microscópica. Funções consideradas:  $F_1$ : Exponencial Decrescente,  $F_2$ :  $\frac{1}{x}$ ,  $F_3$ : Linear Decrescente,  $F_4$ : Unitária e  $F_5$ : Comprimento da Via.

Experimento	Função de Custo				
	$F_1$	$F_2$	$F_3$	$F_4$	$F_5$
POA Arterials DNUBC Vol. 10%	0,96	0,92	0,99	0,98	0,69
POA Arterials DNUBC Vol. 25%	0,80	0,84	0,84	0,81	0,58
POA Arterials DNUBC Vol. 50%	0,76	0,78	0,77	0,74	0,69
Sioux Falls Pico da Manhã	0,61	0,61	0,59	0,54	0,45
Sioux Falls Pico da Tarde	0,67	0,89	0,93	0,87	0,78
Grade 10x10 DNUBC Vol. 10%	0,84	0,79	0,88	0,89	0,89
Grade 10x10 DNUBC Vol. 25%	0,90	0,83	0,91	0,86	0,86
Grade 10x10 DNUBC Vol. 50%	0,91	0,85	0,93	0,80	0,80
Grade 10x10 DNUBC Vol. 75%	0,94	0,80	0,93	0,73	0,73
Grade 10x10 DU Vol. 10%	0,67	0,61	0,67	0,89	0,89
Grade 10x10 DU Vol. 25%	0,63	0,59	0,63	0,91	0,91
Grade 10x10 DU Vol. 50%	0,73	0,73	0,73	0,75	0,75
Grade 10x10 DU Vol. 75%	0,69	0,71	0,67	0,87	0,87
Grade 10x10 DNUCB Vol. 10%	0,90	0,73	0,90	0,88	0,88
Grade 10x10 DNUCB Vol. 25%	0,84	0,82	0,85	0,87	0,87
Grade 10x10 DNUCB Vol. 50%	0,78	0,67	0,78	0,83	0,83
Grade 10x10 DNUCB Vol. 75%	0,90	0,77	0,89	0,81	0,81
Grade 10x10 DNUBC Vol. 10% ( <i>one-shot assign.</i> )	0,77	0,65	0,77	0,86	0,86
Grade 10x10 DNUBC Vol. 25% ( <i>one-shot assign.</i> )	0,78	0,74	0,78	0,85	0,85
Grade 10x10 DNUBC Vol. 50% ( <i>one-shot assign.</i> )	0,79	0,69	0,79	0,84	0,84
Grade 10x10 DNUBC Vol. 75% ( <i>one-shot assign.</i> )	0,14	0,13	0,14	0,24	0,24
Grade 10x10 DU Vol. 10% ( <i>one-shot assign.</i> )	0,52	0,45	0,52	0,83	0,83
Grade 10x10 DU Vol. 25% ( <i>one-shot assign.</i> )	0,68	0,65	0,68	0,90	0,90
Grade 10x10 DU Vol. 50% ( <i>one-shot assign.</i> )	0,61	0,61	0,61	0,84	0,83
Grade 10x10 DU Vol. 75% ( <i>one-shot assign.</i> )	0,56	0,54	0,55	0,83	0,83
Grade 10x10 DNUCB Vol. 10% ( <i>one-shot assign.</i> )	0,81	0,72	0,80	0,87	0,87
Grade 10x10 DNUCB Vol. 25% ( <i>one-shot assign.</i> )	0,78	0,75	0,80	0,83	0,83
Grade 10x10 DNUCB Vol. 50% ( <i>one-shot assign.</i> )	0,80	0,72	0,81	0,80	0,80
Grade 10x10 DNUCB Vol. 75% ( <i>one-shot assign.</i> )	0,81	0,63	0,81	0,81	0,81

por exemplo bloqueios em cruzamentos, fazendo com que a simulação de grandes volumes se distanciasse da abordagem proposta.

## 8.2 Análise dos Resultados de *Sioux Falls*

As funções  $F_2$  ( $\frac{1}{x}$ ) e  $F_3$  (linear), que consideram a demanda, foram as que apresentaram os melhores resultados para a rede *Sioux Falls*. A função  $F_5$  (comprimento da via), foi a que apresentou o pior desempenho. O resultado apresentado pela função  $F_4$  (unitária) superou a função  $F_1$  (exponencial) para o caso *Sioux Falls* Pico da Tarde.

Nesse ponto cabe uma ressalva: as funções  $F_1$  (exponencial decrescente),  $F_2$  ( $\frac{1}{x}$ ) e  $F_3$  (linear decrescente), que consideram a demanda, apresentaram variação nos resultados significativa entre si para a demanda pico da tarde. Esse é o caso onde a velocidade de decaimento da função influenciou no resultado, uma vez que as funções  $F_1$  e  $F_3$ , que possuem decaimento suaves, mostraram resultados inferiores a  $F_2$ , que possui decaimento mais acentuado. Ao comparar os valores de correlação obtidos nesse experimento, pode-se perceber que os melhores resultados foram alcançados pelas funções que consideram a demanda no cálculo da centralidade de intermediação.

### 8.3 Análise dos Resultados de Grade Regular 10x10

Sobre a Grade 10x10 é possível notar que as funções  $F_4$  (unitária) e  $F_5$  (comprimento da via) foram as que apresentaram os melhores resultados. Também é possível observar que as funções  $F_4$  e  $F_5$  apresentaram resultados idênticos. Isso se deve ao fato da grade ser regular e, portanto, todas as vias possuem o mesmo comprimento, o que faz com que a ponderação das redes por essas funções seja equivalente. Nesse caso a função  $F_5$  (comprimento da via) funcionou como se fosse a função  $F_4$  (unitária), que já vinha apresentando desempenho constante nos experimentos anteriores.

No que diz respeito às funções de custo que consideram a demanda ( $F_1$ ,  $F_2$  e  $F_3$ ), essas mostraram desempenho superiores ao das funções unitária  $F_4$  e comprimento da via  $F_5$ , apenas no caso Grade 10x10 BNUBC (Borda→Centro). Credita-se isso ao fato de esse ser o único caso em que ocorre convergência na grade regular, partindo as viagens da borda em direção ao centro da grade.

No caso da demanda uniforme (DU), as funções  $F_4$  (unitária) e  $F_5$  (comprimento da via) apresentaram o melhor desempenho em todos os casos. No caso da demanda tipo Centro→Borda (DNUCB), não se pode afirmar qual função obteve o melhor desempenho sendo, portanto, o experimento não conclusivo. Ainda no caso Centro→Borda (DNUCB), as funções  $F_1$ ,  $F_3$ ,  $F_4$  e  $F_5$  apresentaram correlações altas ( $>0,78$ ).

Sobre a queda de desempenho do método proposto ao considerar as demandas geradas pelo *one-shot assignment*, isso pode ser explicado pelo fato do algoritmo de centralidade de intermediação utilizar internamente um algoritmo de cálculo de caminhos mínimos. A partir do momento em que a geração da demanda deixou de ser guiada pela busca de caminhos de menor custo, criou-se uma disparidade entre a centralidade de intermediação calculada pela abordagem proposta e a simulação. Nesse caso, estaria sendo quebrada a premissa de que os usuários

tentam satisfazer suas demandas buscando recursos e serviços que estão fisicamente próximos (KAZERANI; WINTER, 2009a). Dessa forma, de modo a fazer com que o método aqui proposto endereçasse casos como a demanda gerada pelo *one-shot assignment*, o cálculo das rotas realizado internamente pela centralidade de intermediação precisaria ser substituído por algum outro método que realizasse a distribuição de rotas.

#### **8.4 Análise de Significância dos Resultados**

Com o objetivo de analisar a significância dos resultados obtidos, realizaram-se testes estatísticos baseados no coeficiente de correlação produto-momento de Pearson e no coeficiente de correlação de Kendall. Para isso, calculou-se os valores- $p$  e as correlações para cada um dos experimentos descritos, utilizando esses coeficientes. A Subseção 8.4.1 apresenta a análise realizada utilizando o coeficiente de Pearson, enquanto que a Subseção 8.4.2 apresenta a análise com o coeficiente de Kendall.

##### **8.4.1 Análise Baseada no Coeficiente de Correlação Produto-Momento de Pearson**

A fim de analisar a significância dos resultados obtidos, realizou-se um teste estatístico baseado no coeficiente de correlação produto-momento de Pearson. Com isso, calculou-se os valores- $p$  e as correlações para cada um dos experimentos descritos. De um modo geral, o valor- $p$  representa as chances ou a probabilidade da correlação observada ser devida ao acaso, e não a fatores que estão sendo propostos. A Tabela 8.2 exibe a lista dos coeficientes de correlação dos experimentos já apresentados anteriormente, com seus valores- $p$  correspondentes.

A fim de testar a existência de correlação significativa entre os valores de centralidade de intermediação obtidos pelo método proposto, e os valores obtidos a partir das taxas de ocupação extraídas de simulação microscópica, utilizou-se um teste de hipóteses. Como hipótese nula  $H_0$ , considerou-se que não existe associação entre as variáveis, podendo o resultado encontrado ser uma casualidade. Como hipótese alternativa  $H_a$ , considerou-se a existência de associação real entre os resultados indicando, neste estudo, que existe dependência entre a técnica proposta e os resultados obtidos a partir da simulação. Considerou-se ainda um nível de significância  $\alpha = 5\%$ , que representa a probabilidade de ocorrência de erros do Tipo I, ou seja, a probabilidade de rejeitar-se uma hipótese verdadeira.

Com base no teste proposto, observa-se que  $p < \alpha$  na grande maioria dos casos. De fato, como é possível observar pela Tabela 8.2,  $p > 0,05$  ocorre apenas no caso Grade 10x10

DNUBC Vol. 75% (one-shot assign.) para as funções  $F_1$ ,  $F_2$  e  $F_3$ . Para todas as demais instâncias, rejeita-se  $H_0$  com 95% de confiança.

Tabela 8.2: Correlação de Pearson e Valor-p entre a centralidade de intermediação calculada pelo método proposto, considerando diferentes funções de custo, e sobre o grafo construído com base nos pesos extraídos no pico de ocupação da simulação microscópica cada caso. Funções consideradas:  $F_1$ : Exponencial Decrescente,  $F_2$ :  $\frac{1}{x}$ ,  $F_3$ : Linear Decrescente,  $F_4$ : Unitária e  $F_5$ : Comprimento da Via.

Experimento	Função de Custo									
	$F_1$		$F_2$		$F_3$		$F_4$		$F_5$	
	Corr.	Valor-p	Corr.	Valor-p	Corr.	Valor-p	Corr.	Valor-p	Corr.	Valor-p
POA Arterials DNUBC Vol. 10%	0,96	0	0,92	0	0,99	0	0,98	0	0,69	7,62E-10
POA Arterials DNUBC Vol. 25%	0,80	1,33E-14	0,84	0	0,85	0	0,81	1,33E-15	0,58	1,18E-06
POA Arterials DNUBC Vol. 50%	0,76	1,15E-12	0,78	1,70E-13	0,77	5,25E-13	0,74	1,21E-11	0,69	5,80E-10
Sioux Falls Pico da Manhã	0,61	1,57E-03	0,61	1,50E-03	0,59	2,47E-03	0,54	7,02E-03	0,45	2,64E-02
Sioux Falls Pico da Tarde	0,67	3,07E-04	0,89	7,82E-09	0,93	3,44E-11	0,87	2,67E-08	0,78	7,53E-06
Grade 10x10 DNUBC Vol. 10%	0,88	0	0,79	0	0,88	0	0,89	0	0,89	0
Grade 10x10 DNUBC Vol. 25%	0,91	0	0,83	0	0,91	0	0,86	0	0,86	0
Grade 10x10 DNUBC Vol. 50%	0,91	0	0,85	0	0,91	0	0,80	0	0,80	0
Grade 10x10 DNUBC Vol. 75%	0,94	0	0,80	0	0,93	0	0,73	0	0,73	0
Grade 10x10 DU Vol. 10%	0,90	0	0,73	0	0,90	0	0,88	0	0,88	0
Grade 10x10 DU Vol. 25%	0,84	0	0,82	0	0,85	0	0,87	0	0,87	0
Grade 10x10 DU Vol. 50%	0,78	0	0,67	2,98E-14	0,78	0	0,83	0	0,83	0
Grade 10x10 DU Vol. 75%	0,90	0	0,77	0	0,89	0	0,81	0	0,81	0
Grade 10x10 DNUCB Vol. 10%	0,90	0	0,73	0	0,90	0	0,88	0	0,88	0
Grade 10x10 DNUCB Vol. 25%	0,84	0	0,82	0	0,85	0	0,87	0	0,87	0
Grade 10x10 DNUCB Vol. 50%	0,78	0	0,67	2,98E-14	0,78	0	0,83	0	0,83	0
Grade 10x10 DNUCB Vol. 75%	0,90	0	0,77	0	0,89	0	0,81	0	0,81	0
Grade 10x10 DNUBC Vol. 10% (one-shot assign.)	0,77	0	0,65	2,68E-13	0,77	0	0,86	0	0,86	0
Grade 10x10 DNUBC Vol. 25% (one-shot assign.)	0,78	0	0,74	0	0,78	0	0,85	0	0,85	0
Grade 10x10 DNUBC Vol. 50% (one-shot assign.)	0,79	0	0,69	2,00E-15	0,79	0	0,84	0	0,84	0
Grade 10x10 DNUBC Vol. 75% (one-shot assign.)	0,14	1,56E-01	0,13	1,90E-01	0,14	1,76E-01	0,24	1,72E-02	0,24	1,63E-02
Grade 10x10 DU Vol. 10% (one-shot assign.)	0,81	0	0,72	0	0,80	0	0,87	0	0,87	0
Grade 10x10 DU Vol. 25% (one-shot assign.)	0,78	0	0,75	0	0,80	0	0,83	0	0,83	0
Grade 10x10 DU Vol. 50% (one-shot assign.)	0,80	0	0,72	0	0,81	0	0,80	0	0,80	0
Grade 10x10 DU Vol. 75% (one-shot assign.)	0,81	0	0,63	2,86E-12	0,81	0	0,81	0	0,81	0
Grade 10x10 DNUCB Vol. 10% (one-shot assign.)	0,81	0	0,72	0	0,80	0	0,87	0	0,87	0
Grade 10x10 DNUCB Vol. 25% (one-shot assign.)	0,78	0	0,75	0	0,80	0	0,83	0	0,83	0
Grade 10x10 DNUCB Vol. 50% (one-shot assign.)	0,80	0	0,72	0	0,81	0	0,80	0	0,80	0
Grade 10x10 DNUCB Vol. 75% (one-shot assign.)	0,81	0	0,63	2,86E-12	0,81	0	0,81	0	0,81	0

#### 8.4.2 Análise Baseada no Coeficiente de Correlação de Kendall

O coeficiente de correlação  $Tau$  de Kendall corresponde à concordância entre os pares nos conjuntos de dados. O coeficiente  $Tau-b$  é uma variação do coeficiente de correlação de Kendall criado para lidar com empates. Alternativamente, o coeficiente indica a probabilidade de que dois pontos sorteados na distribuição conjunta sejam concordantes. Esse coeficiente considera, no cálculo da correlação, a ordenação (*ranking*) dos elementos. Dessa forma, o coeficiente  $Tau-b$  de Kendall apresentará altos valores caso a lista de valores da centralidade de intermediação obtida pela técnica proposta for concordante com os valores obtidos pela simulação.

A Tabela 8.3 exibe os valores do coeficiente de correlação de Kendall e os valores- $p$  obtidos pelo teste  $Tau-b$  de Kendall. Utilizando o mesmo teste de hipóteses apresentado na Subseção 8.4.1, é possível notar que  $p < \alpha$  para a grande maioria dos casos. De fato, o valor de  $p$  ocorre maior do que 0,05 apenas na instância Sioux Falls Pico da Tarde para a função  $F_1$ .

Os coeficientes de correlação de Kendall, exibidos na Tabela 8.3, apresentaram grandezas inferiores aos coeficientes de correlação de Pearson, apresentados na Tabela 8.2, pois o cálculo da correlação considerando a concordância entre a ordem dos pares impõe uma maior restrição. Quando há interesse em encontrar os  $k$  pontos que recebem maior volume de demanda, a ordem é relevante. Nesse caso, o coeficiente de Kendall mostrar-se-ia o mais adequado na avaliação das funções.

Tabela 8.3: Correlação de Kendall e Valor-p entre a centralidade de intermediação calculada pelo método proposto, considerando diferentes funções de custo, e sobre o grafo construído com base nos pesos extraídos no pico de ocupação da simulação microscópica cada caso. Funções consideradas:  $F_1$ : Exponencial Decrescente,  $F_2$ :  $\frac{1}{x}$ ,  $F_3$ : Linear Decrescente,  $F_4$ : Unitária e  $F_5$ : Comprimento da Via.

Experimento	Função de Custo									
	$F_1$		$F_2$		$F_3$		$F_4$		$F_5$	
	Corr.	Valor-p	Corr.	Valor-p	Corr.	Valor-p	Corr.	Valor-p	Corr.	Valor-p
POA Arterials DNUBC Vol. 10%	0,85	0	0,78	0	0,93	0	0,90	0	0,67	5,55E-14
POA Arterials DNUBC Vol. 25%	0,65	3,95E-13	0,67	1,75E-13	0,73	4,44E-16	0,70	5,55E-15	0,64	7,94E-13
POA Arterials DNUBC Vol. 50%	0,64	2,16E-12	0,63	2,83E-12	0,67	5,84E-14	0,64	8,32E-13	0,68	4,22E-14
Sioux Falls Pico da Manhã	0,41	5,01E-03	0,40	5,92E-03	0,33	2,28E-02	0,34	1,99E-02	0,29	4,93E-02
Sioux Falls Pico da Tarde	0,26	7,81E-02	0,54	1,07E-04	0,61	9,73E-06	0,64	2,89E-06	0,59	2,27E-05
Grade 10x10 DNUBC Vol. 10%	0,74	0	0,62	0	0,74	0	0,85	0	0,85	0
Grade 10x10 DNUBC Vol. 25%	0,67	0	0,64	0	0,67	0	0,80	0	0,80	0
Grade 10x10 DNUBC Vol. 50%	0,72	0	0,68	0	0,72	0	0,73	0	0,73	0
Grade 10x10 DNUBC Vol. 75%	0,70	0	0,69	0	0,70	0	0,77	0	0,77	0
Grade 10x10 DU Vol. 10%	0,72	0	0,58	0	0,72	0	0,86	0	0,86	0
Grade 10x10 DU Vol. 25%	0,68	0	0,66	0	0,67	0	0,83	0	0,83	0
Grade 10x10 DU Vol. 50%	0,71	0	0,62	0	0,71	0	0,80	0	0,80	0
Grade 10x10 DU Vol. 75%	0,69	0	0,66	0	0,69	0	0,75	0	0,75	0
Grade 10x10 DNUCB Vol. 10%	0,72	0	0,58	0	0,72	0	0,86	0	0,86	0
Grade 10x10 DNUCB Vol. 25%	0,68	0	0,66	0	0,67	0	0,83	0	0,83	0
Grade 10x10 DNUCB Vol. 50%	0,71	0	0,62	0	0,71	0	0,80	0	0,80	0
Grade 10x10 DNUCB Vol. 75%	0,69	0	0,66	0	0,69	0	0,75	0	0,75	0
Grade 10x10 DNUBC Vol. 10% (one-shot assign.)	0,61	0	0,57	0	0,61	0	0,81	0	0,81	0
Grade 10x10 DNUBC Vol. 25% (one-shot assign.)	0,62	0	0,58	0	0,63	0	0,78	0	0,78	0
Grade 10x10 DNUBC Vol. 50% (one-shot assign.)	0,62	0	0,61	0	0,62	0	0,77	0	0,77	0
Grade 10x10 DNUBC Vol. 75% (one-shot assign.)	0,22	9,77E-04	0,21	2,29E-03	0,22	1,17E-03	0,25	3,04E-04	0,25	3,04E-04
Grade 10x10 DU Vol. 10% (one-shot assign.)	0,68	0	0,58	0	0,68	0	0,84	0	0,84	0
Grade 10x10 DU Vol. 25% (one-shot assign.)	0,63	0	0,60	0	0,64	0	0,80	0	0,80	0
Grade 10x10 DU Vol. 50% (one-shot assign.)	0,61	0	0,57	0	0,61	0	0,77	0	0,77	0
Grade 10x10 DU Vol. 75% (one-shot assign.)	0,63	0	0,54	2,66E-15	0,63	0	0,75	0	0,75	0
Grade 10x10 DNUCB Vol. 10% (one-shot assign.)	0,68	0	0,58	0	0,68	0	0,84	0	0,84	0
Grade 10x10 DNUCB Vol. 25% (one-shot assign.)	0,63	0	0,60	0	0,64	0	0,80	0	0,80	0
Grade 10x10 DNUCB Vol. 50% (one-shot assign.)	0,61	0	0,57	0	0,61	0	0,77	0	0,77	0
Grade 10x10 DNUCB Vol. 75% (one-shot assign.)	0,63	0	0,54	2,66E-15	0,63	0	0,75	0	0,75	0

## 8.5 Recomendação de Uso das Funções

Com base nos experimentos realizados, desenvolveu-se um guia de recomendação das funções de custo a serem utilizadas de acordo com a topologia da rede e o tipo da demanda aplicada. No que refere-se à topologia, dividiu-se as redes em regulares (*POA Arterials*, *Sioux Falls* e não regulares (Grade 10x10)).

Em relação ao tipo da demanda, dividiu-se os experimentos em demandas convergindo para um distrito alvo e distribuídas. Demandas convergentes são as que possuem um padrão no qual os motoristas partem de diversos distritos em direção a alguns poucos distritos de destino. Demandas distribuídas são as que os distritos de origens e destinos das viagens ocorrem uniformemente distribuídos sobre as redes, ou que existem poucos distritos atuando como origem e muitos como destino. A Tabela 8.4 exhibe a adequação de cada uma das funções de custo a cada combinação de tipo de rede e demanda.

Tabela 8.4: Adequação das funções de custo a cada combinação de tipo de rede e demanda. Funções consideradas:  $F_1$ : Exponencial Decrescente,  $F_2$ :  $\frac{1}{x}$ ,  $F_3$ : Linear Decrescente,  $F_4$ : Unitária e  $F_5$ : Comprimento da Via.

Tipo da Rede / Tipo da Demanda	$F_1$	$F_2$	$F_3$	$F_4$	$F_5$
Não Regular / Conv. p/ 1 Distrito	BOA	BOA	BOA	BOA	RUIM
Não Regular / Distribuída	REGULAR	REGULAR	BOA	BOA	REGULAR
Regular / Conv. p/ 1 Distrito	BOA	BOA	BOA	BOA	BOA
Regular / Distribuída	BOA	REGULAR	BOA	BOA	BOA

## 9 CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS

O problema abordado ao longo deste trabalho foi a identificação de pontos centrais em redes viárias usando centralidade de intermediação combinado a demandas de tráfego. Foi relatado que alguns autores tentaram utilizar a centralidade de intermediação para explicar os fluxos de tráfego em redes viárias, mas que esses não atingiram resultados satisfatórios por essa medida assumir uma distribuição uniforme da demanda. Dessa forma, o método proposto consistiu em combinar o algoritmo de cálculo da centralidade de intermediação com demandas de tráfego de modo que esse atribuísse altos valores de centralidade para os pontos da rede que recebem maior demanda.

O método proposto foi testado em três redes, e uma simulação microscópica foi realizada em cada uma dessas. As taxas de ocupação das vias foram extraídas das simulações em seus picos de ocupação e utilizadas para ponderar um grafo de ocupação sobre o qual foi calculado a centralidade de intermediação. Os valores de centralidade calculados sobre as simulações foram, então, correlacionados com os valores obtidos pelo método proposto. Em geral, as funções de custo exponencial decrescente e linear decrescente apresentaram melhores resultados entre as funções estudadas, para demandas não uniformes sobre as redes POA *Arterials* e *Sioux Falls* e para o caso Borda→Centro da Grade 10x10, onde há convergência das rotas presentes na demanda.

A melhoria causada pelo método proposto se dá basicamente por dois fatores. Primeiro, os caminhos mínimos calculados pelo algoritmo de centralidade de intermediação foram influenciadas pelas rotas geradas a partir da demanda. O segundo fator é creditado ao uso de funções de custo decrescentes, que fizeram com que o peso das arestas diminuíssem em função da quantidade de rotas que passaram pelas mesmas. A combinação desses fatores fez com que os caminhos mínimos computados durante o cálculo da centralidade de intermediação fossem incentivados a passar pelas arestas de menor custo, aumentando o valor da centralidade dos vértices presentes nesses caminhos.

A ideia de focar na modificação dos pesos foi, portanto, motivada por manter o cálculo da centralidade de intermediação inalterado, permitindo que fossem reaproveitados pacotes de software otimizados para lidar com grafos densos e que já trazem diversas métricas implementadas, sendo a centralidade de intermediação uma delas. Além disso, uma vez que o mesmo já é utilizado em diversos trabalhos (GALAFASSI; BAZZAN, 2013; GAO et al., 2013; KAZERANI; WINTER, 2009a; DERRIBLE; KENNEDY, 2009; DERRIBLE, 2012), isso permite uma futura comparação com outros trabalhos da literatura.

No entanto, cabe aqui uma ressalva: em alguns experimentos pôde-se constatar a ocorrência de situações onde as funções de custo que consideravam a demanda -  $F_1$  (exponencial),  $F_2 (\frac{1}{x})$  e  $F_3$  (linear) - apresentaram desempenho inferior à função  $F_4$  (unitária). A função unitária demonstrou desempenho satisfatório nos experimentos sobre a grade regular em casos onde não ocorria a convergência da demanda para pontos específicos, o que se assemelhou ao caso uniforme. No entanto, em experimentos como os executados sobre a rede *Sioux Falls*, onde a demanda foi gerada por um processo iterativo em que se buscou alcançar a distribuição das rotas, os melhores resultados foram alcançados pelo método proposto.

Apesar da técnica proposta neste estudo auxiliar na identificação de pontos centrais em redes de transporte, trata-se apenas de uma etapa inserida em um objetivo maior, que é o de diminuir o tempo de viagem dos usuários. Dessa forma, uma possível extensão deste estudo seria a de avaliar se uma atuação semafórica nesses pontos melhoraria o tempo de viagem médio dos motoristas, e se os pontos identificados com maior valores de centralidade de intermediação são, de fato, os mais críticos.

Outro aspecto que poderia ser investigado é o uso de um coeficiente de correlação ponderado em relação à capacidade de cada vértice. A capacidade de um vértice poderia ser estimada pela capacidade dos seus vértices incidentes. Dessa forma, vértices com maior capacidade receberiam maior peso no cálculo da correlação.

Outra possível extensão deste trabalho é analisar a ocupação das arestas individualmente durante a simulação microscópica e aproximar uma função que modela o seu comportamento. Essa função poderia ser então usada no método proposto neste trabalho de forma que seu desempenho pudesse ser comparado com as demais funções aqui abordadas.

## REFERÊNCIAS

- ALBERT, R.; JEONG, H.; BARABÁSI, A.-L. Internet: Diameter of the world-wide web. **Nature**, Nature Publishing Group, v. 401, n. 6749, p. 130–131, 1999.
- BARABÁSI, A.-L.; ALBERT, R. Emergence of scaling in random networks. **science**, American Association for the Advancement of Science, v. 286, n. 5439, p. 509–512, 1999.
- BARABÁSI, A.-L. L.; BONABEAU, E. Scale-free networks. **Scientific American**, v. 288, n. 5, p. 60–69, 2003.
- BAZZAN, A. L.; KLÜGL, F. Introduction to intelligent systems in traffic and transportation. **Synthesis Lectures on Artificial Intelligence and Machine Learning**, Morgan & Claypool Publishers, v. 7, n. 3, p. 1–137, 2013.
- BEHRISCH, M. et al. Sumo-simulation of urban mobility-an overview. In: **International Conference on Advances in System Simulation, 3. Proceedings...** [S.l.: s.n.], 2011. p. 55–60.
- BELLMAN, R. On a routing problem. **Quarterly of Applied Mathematics**, v. 16, p. 87–90, 1958.
- BRANDES, U. A faster algorithm for betweenness centrality\*. **Journal of Mathematical Sociology**, Taylor & Francis, v. 25, n. 2, p. 163–177, 2001.
- BUREAU, O. P. R. **Traffic Assignment Manual**. Washington, DC, 1964.
- CHAKIROV, A.; FOURIE, P. Enriched sioux falls scenario with dynamic and disaggregate demand. **Technical report, Future Cities Laboratory, Singapore-ETH Centre (SEC), Singapore**, 2014.
- COSTA, L. da F. et al. Characterization of complex networks: A survey of measurements. **Advances in Physics**, v. 56, n. 1, p. 167–242, 2007.
- CRUCITTI, P.; LATORA, V.; PORTA, S. Centrality in networks of urban streets. **Chaos: an interdisciplinary journal of nonlinear science**, AIP Publishing, v. 16, n. 1, p. 015113, 2006.
- DERRIBLE, S. Network centrality of metro systems. **PloS one**, Public Library of Science, v. 7, n. 7, p. e40575, 2012.
- DERRIBLE, S.; KENNEDY, C. Network analysis of world subway systems using updated graph theory. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**, Trans Res Board, v. 2112, n. 1, p. 17–25, 2009.
- DERRIBLE, S.; KENNEDY, C. The complexity and robustness of metro networks. **Physica A: Statistical Mechanics and its Applications**, Elsevier, v. 389, n. 17, p. 3678–3691, 2010.
- DERRIBLE, S.; KENNEDY, C. Applications of graph theory and network science to transit network design. **Transport reviews**, Taylor & Francis, v. 31, n. 4, p. 495–519, 2011.
- DIJKSTRA, E. W. A note on two problems in connexion with graphs. **Numerische mathematik**, Springer, v. 1, n. 1, p. 269–271, 1959.
- ERDÖS, P.; RÉNYI, A. On random graphs i. **Publ. Math. Debrecen**, v. 6, p. 290–297, 1959.

- FLOYD, R. W. Algorithm 97: shortest path. **Communications of the ACM**, ACM, v. 5, n. 6, p. 345, 1962.
- FORD, L. R. Network flow theory. [S.l.]: Rand Corporation, 1956.
- FREEMAN, L. C. A set of measures of centrality based on betweenness. **Sociometry**, JSTOR, p. 35–41, 1977.
- GALAFASSI, C.; BAZZAN, A. L. C. Analysis of traffic behavior in regular grid and real world networks. In: **International Workshop on Emergent Intelligence on Networked Agents, 5. Proceedings...** [s.n.], 2013. Disponível em: <[www.inf.ufrgs.br/maslab/pergamus/pubs/GalafassiBazzan2013-wein.pdf](http://www.inf.ufrgs.br/maslab/pergamus/pubs/GalafassiBazzan2013-wein.pdf)>.
- GAO, S. et al. Understanding urban traffic-flow characteristics: a rethinking of betweenness centrality. **Environment and Planning B: Planning and Design**, Pion Ltd, London, v. 40, n. 1, p. 135–153, 2013.
- GAWRON, C. An iterative algorithm to determine the dynamic user equilibrium in a traffic simulation model. **International Journal of Modern Physics C**, World Scientific, v. 9, n. 03, p. 393–407, 1998.
- HOLME, P. Congestion and centrality in traffic flow on complex networks. **Advances in Complex Systems**, World Scientific, v. 6, n. 02, p. 163–176, 2003.
- KAZERANI, A.; WINTER, S. Can betweenness centrality explain traffic flow. In: **International Conference on GIS, 12. Proceedings...** [s.n.], 2009. Disponível em: <<http://www.plone.itc.nl/agileold/Conference/2009-hanover/pdfs/111.pdf>>.
- KAZERANI, A.; WINTER, S. Modified betweenness centrality for predicting traffic flow. In: **International Conference on GeoComputation, 10. Proceedings... Sydney, Australia, November 30–December**. [s.n.], 2009. v. 2. Disponível em: <[http://www.science.mcmaster.ca/~igu-cmgs/publications/geocomputation/Kazerani\\_and\\_Winter.pdf](http://www.science.mcmaster.ca/~igu-cmgs/publications/geocomputation/Kazerani_and_Winter.pdf)>.
- PARK, K. et al. Jamming in complex gradient networks. **Physical Review E**, APS, v. 71, n. 6, p. 065105, 2005.
- RAPOPORT, A. Nets with distance bias. **The bulletin of mathematical biophysics**, Springer, v. 13, n. 2, p. 85–91, 1951.
- SHANNON, C. A mathematical theory of communication. **Bell Sys. Tech. J.**, v. 27, p. 379–423, 1948.
- WARSHALL, S. A theorem on boolean matrices. **Journal of the ACM (JACM)**, ACM, v. 9, n. 1, p. 11–12, 1962.
- WATTS, D. J.; STROGATZ, S. H. Collective dynamics of ‘small-world’ networks. **nature**, Nature Publishing Group, v. 393, n. 6684, p. 440–442, 1998.
- XIE, F.; LEVINSON, D. Measuring the structure of road networks. **Geographical analysis**, Wiley Online Library, v. 39, n. 3, p. 336–356, 2007.