



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE TRANSPORTES
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

LUCAS ALVES RAMOS

MODELAGEM DA REDE MULTIMODAL INTEGRADA DO TRANSPORTE PÚBLICO
DE FORTALEZA

FORTALEZA

2017

LUCAS ALVES RAMOS

MODELAGEM DA REDE MULTIMODAL INTEGRADA DO TRANSPORTE PÚBLICO DE
FORTALEZA

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal do Ceará como requisito parcial à obtenção do título de Engenheiro Civil.

Orientador: Prof. Carlos Felipe Grangeiro Loureiro,
Ph.D.

FORTALEZA

2017

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Biblioteca Universitária
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

- R144m Ramos, Lucas Alves.
Modelagem da Rede Multimodal Integrada do Transporte Público de Fortaleza / Lucas Alves Ramos. –
2017.
63 f. : il. color.
- Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia,
Curso de Engenharia Civil, Fortaleza, 2017.
Orientação: Prof. Dr. Carlos Felipe Grangeiro Loureiro.
1. Redes multimodais integradas. 2. Modelagem. 3. Transporte Público. 4. Tranus. 5. TransCAD. I.
Título.

CDD 620

LUCAS ALVES RAMOS

MODELAGEM DA REDE MULTIMODAL INTEGRADA DO TRANSPORTE PÚBLICO
DE FORTALEZA

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal do Ceará como requisito parcial à obtenção do título de Engenheiro Civil.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Carlos Felipe Grangeiro Loureiro, Ph.D. (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Francisco Moraes de Oliveira Neto, Ph.D. (Examinador Interno)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Francelino Franco Leite de Matos Sousa, M.Sc. (Examinador Externo)
Centro Universitário Christus (Unichristus)

AGRADECIMENTO

Primeiramente a minha família, que sempre me motivou e apoiou durante toda a graduação.

Ao Professor Felipe Loureiro, por todo apoio e pela excelente orientação, sendo grande responsável por despertar meu interesse nessa área de estudo e também por meu amadurecimento acadêmico e profissional.

Aos Professores participantes da Banca examinadora Francisco Moraes e Francelino Franco, pelo tempo e pelas valiosas sugestões e colaborações.

Aos amigos do GTTEMA, especialmente ao Franco, ao Renan e ao Fonte, que além de serem grandes amigos, trouxeram inúmeras contribuições e tornaram esse trabalho possível.

Aos meus amigos Filepe, Torquato, Samir, Pedro Victor, Rayssa, Bruna, João Pedro e Pedro Paulo.

RESUMO

O planejamento das redes de transporte público é fundamental para garantir a acessibilidade universal e a modelagem surge como principal ferramenta de auxílio. Dentro da problemática dos baixos níveis de acessibilidade e mobilidade da população de baixa renda de Fortaleza, esse trabalho objetivou realizar a modelagem da rede multimodal integrada do transporte público da cidade. Para realizar a modelagem, foram analisados os dados de operação da rede integrada com objetivo de compreender melhor a realidade modelada. Em seguida, foram analisados dois modelos de rede de transportes, TransCAD e Tranus, que apresentam abordagens distintas, sendo pontuadas as vantagens e limitações de cada modelo. Por fim, para se avaliar os métodos de alocação de viagens, aplicou-se um projeto de experimento que simulou a operação da rede em três níveis diferentes de congestionamento e os custos, bem como a formulação deles, foram comparados. Obteve-se a rede modelada para os dois *softwares* e as análises permitiram avaliar o modelo Tranus mais adequado para modelagem da rede bem como para a alocação de viagens.

Palavras-Chave: Redes multimodais integradas. Modelagem. Transporte Público. Tranus. TransCAD.

ABSTRACT

The planning of transit networks is fundamental to guarantee the universal access and its modeling plays an important role in this process. Within the context of the problematic of the low levels of accessibility and mobility of the population of low income of Fortaleza, the main objective of this work is to model Fortaleza's integrated multimodal transit network. In order to achieve this objective, operational data of the integrated network was analyzed in order to better understand the modeled reality. Then, two transportation network models, TransCAD and Tranus, were analyzed, presenting different approaches, with advantages and limitations of each model being punctuated. Finally, to assess the transit assignment methods, an experiment project was formulated, in which three different levels of congestion and the costs in the network were simulated, and its results, compared. The network was modeled using both techniques and the analysis pointed Tranus' model as more suitable for modeling the network as well as for the assignment of transit trips.

Keywords: Integrated Multimodal Networks. Modelling. Transit. Tranus. TransCAD.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Distribuição dos empregos por bairro em Fortaleza	14
Figura 2 – Distribuição dos domicílios de baixa renda por bairro em Fortaleza.....	14
Figura 3 – Áreas de operação do SIT-FOR.....	16
Figura 4 – Classificação de modelos de oferta.....	17
Figura 5 – Representação das sete pontes de Königsberg.....	18
Figura 6 – Grafo proposto por Euler para resolução do problema	18
Figura 7 – Representação de rede de transportes por grafo direcional	19
Figura 8 – Estrutura do modelo de transportes do Tranus	21
Figura 9 – Exemplo de rota multimodal	23
Figura 10 – Método de Análise da Representação da Rede de Transporte Público	24
Figura 11 – Método de Avaliação dos Modelos de Rede de Transportes.....	25
Figura 12 – Método de Avaliação dos Métodos de Alocação de Viagens.....	27
Figura 13 – Zonas de tráfego de Fortaleza.....	29
Figura 14 – Sistema Integrado de Transporte Público de Fortaleza	30
Figura 15 – Determinação de atributos para um tipo de <i>link</i>	35
Figura 16 – Função de redução de velocidade do Tranus.....	36
Figura 17 – Função do Tempo de Espera no Tranus	37
Figura 18 – Representação da rede de transporte público de Fortaleza no TransCAD	39
Figura 19 – Representação da rede de transporte público de Fortaleza no Tranus	39
Figura 20 – Par OD definido para análise	40
Figura 21 – Alocação de viagens para o cenário 1 no TransCAD.....	44
Figura 22 – Alocação de viagens para o cenário 2 no TransCAD.....	46
Figura 23 – Alocação de viagens para o cenário 3 no TransCAD.....	47
Figura 24 – Variáveis do Subsistema de Transportes do Tranus	49
Figura 25 – Alternativa 1 de caminho gerado pelo Tranus	52
Figura 26 – Alternativa 2 de caminho gerado pelo Tranus	52
Figura 27 – Alternativa 3 de caminho gerado pelo Tranus	53
Figura 28 – Alternativa 4 de caminho gerado pelo Tranus	54

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Histograma das extensões das linhas de transporte público	31
Gráfico 2 – Histograma de <i>Headways</i> das linhas de transporte público.....	32
Gráfico 3 – Histograma de capacidade horária das linhas de transporte público	32
Gráfico 4 - Distribuição das probabilidades por cenário no TransCAD	56
Gráfico 5 – Distribuição das probabilidades por cenário no Transus	57
Gráfico 6 – Evolução dos Custos Generalizado para o melhor caminho.....	58

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Resumo dos resultados do cenário 1 no TransCAD	44
Tabela 2 – Linhas mais carregadas no cenário 1 no TransCAD	45
Tabela 3 – Resumo dos resultados do cenário 2 no TransCAD	46
Tabela 4 – Linhas mais carregadas no cenário 2 no TransCAD	47
Tabela 5 – Resumo dos resultados do cenário 3 no TransCAD	48
Tabela 6 – Linhas mais carregadas no cenário 3 no TransCAD	48
Tabela 7 – Carregamento das linhas para os cenários propostos	55

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	9
1.1	Contextualização.....	9
1.2	Problema de Pesquisa.....	10
1.3	Questões Motivadoras.....	10
1.4	Justificativa.....	11
1.5	Objetivos.....	11
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	13
2.1	Rede Multimodal Integrada de Fortaleza.....	13
2.2	Modelagem da Rede de Transporte.....	16
2.3	Métodos de Alocação da Rede de Transporte Público.....	21
3	MÉTODO.....	24
3.1	Representação da Rede Multimodal Integrada de Fortaleza.....	24
3.2	Avaliação dos Modelos de Rede de Transportes.....	25
3.3	Avaliação dos Métodos de Alocação de Sistema de Transportes.....	26
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	29
4.1	Definição do zoneamento, centroides e conectores.....	29
4.2	Representação da Rede Multimodal Integrada de Fortaleza.....	29
4.3	Análise dos Modelos de Rede de Transportes.....	33
4.3.1	<i>Modelagem dos nós.....</i>	<i>33</i>
4.3.2	<i>Modelagem dos links.....</i>	<i>34</i>
4.3.3	<i>Modelagem das linhas de transporte público.....</i>	<i>38</i>
4.4	Definição do Projeto do Experimento.....	40
4.5	Alocação de viagens no TransCAD.....	41
4.6	Alocação de viagens no Transus.....	48
4.7	Comparação dos Métodos de Alocação.....	56
5	CONCLUSÃO.....	59
	REFERÊNCIAS.....	61

1 INTRODUÇÃO

1.1 Contextualização

O transporte é causado pela demanda de deslocar algo entre localidades, diga-se, de uma origem a um destino (BORNDORFER *et al.*, 1998). Essas demandas de deslocamentos representam necessidades e desejos da população em realizar suas atividades e resultam em fluxos de pessoas e bens. Para que essas demandas por deslocamento sejam atendidas e esses fluxos ocorram em uma cidade, é necessário que essas viagens sejam alocadas de acordo com a oferta de transportes, ou seja, dentro da sua rede de vias, podendo ocorrer individualmente ou coletivamente em veículos motorizados ou não motorizados.

Nas últimas décadas, ocorreu um grande crescimento das populações nas cidades. Em diversos locais, esse processo de urbanização ocorreu sem estar aliado a um planejamento adequado para ocupação dos espaços, ocasionando diversos problemas. Em um cenário comum às cidades brasileiras, essa ocupação desordenada dos espaços resultou num crescimento econômico grande concentrado no centro dessas cidades e em um aumento da ocupação residencial nas periferias, resultando em uma grande quantidade de pessoas morando longe dos locais onde se concentram os empregos e as principais atividades. Em muitos casos, a malha viária dessas cidades não acompanhou essa ocupação de espaços para as periferias, dificultando, então, o acesso dessas pessoas à rede de transportes e até impedindo a realização de algumas viagens.

Proporcionar uma adequada mobilidade para todas as classes sociais constitui uma ação essencial no processo de desenvolvimento econômico e social das cidades (FERRAZ e TORRES, 2004). A necessidade de se deslocar é universal e segundo a Lei N° 12.587 de 2012, a Política Nacional de Mobilidade Urbana tem como objetivo garantir o acesso universal a cidade, com prioridade para os serviços de transporte público coletivo sobre o transporte individual motorizado e dos modos de transportes não motorizados sobre os motorizados. Essas diretrizes, no entanto, não são compatíveis com a realidade de muitas das grandes cidades que, em meio a uma rede viária radial, a população habitante na periferia da cidade, predominantemente de baixa renda, é prejudicada tanto pela limitação financeira em ter acesso a alguns modos de transporte quanto pela falta de acessibilidade a um transporte público de qualidade.

Em termos gerais, o papel do planejamento de transportes é garantir o atendimento de uma determinada demanda por viagens de pessoas e bens com diferentes motivos, em

diferentes momentos do dia e do ano, usando vários modos, dado um sistema de transportes com determinada capacidade de operação (ORTÚZAR e WILLUMSEN, 2011). Com objetivo de cumprir esse papel, é necessário conhecer bem a realidade e a percepção dos atores envolvidos no sistema em estudo. É possível, então, representar essa realidade através de modelos que foquem nos elementos considerados importantes.

O processo de modelagem é uma importante etapa do processo de planejamento, que exige dos analistas não só a compreensão do fenômeno modelado, mas também das premissas e parâmetros dos modelos utilizados. Tais esforços são necessários para que se compreenda os padrões de deslocamento da população e para prever o impacto da implantação de soluções nos problemas urbanos, entre eles a acessibilidade e a mobilidade.

Em uma cidade em que existe uma grande demanda por grandes deslocamentos, o transporte motorizado público surge como uma alternativa mais viável, em detrimento do transporte individual motorizado, para garantir a acessibilidade igualitária a todas as classes sociais.

1.2 Problema de Pesquisa

Em redes de transporte público existem diversos problemas associados à modelagem da escolha de rotas. Estes problemas são, em várias perspectivas, mais complexos do que os encontrados na alocação da demanda de transportes individuais; os requisitos computacionais tendem a ser maiores e até os melhores métodos precisam de premissas simplificadoras importantes (ORTUZAR e WILLUMSEN, 2011).

Os problemas relacionados à modelagem do transporte público consistem não só na dificuldade de representar algumas características complexas da oferta, como também na representação da tomada de decisão dos usuários. A modelagem do transporte público se apresenta como importante ferramenta em apoio ao planejamento urbano, no contexto da problemática de baixos níveis de acessibilidade e mobilidade das pessoas de baixa renda em Fortaleza.

1.3 Questões Motivadoras

- a) Quais são as dificuldades existentes na modelagem da rede multimodal integrada de transporte público de Fortaleza?

- b) Qual o modelo de rede de transportes mais adequado para representar a rede multimodal integrada de transporte público de Fortaleza?
- c) Qual método de alocação de transportes é mais adequado para a rede multimodal integrada de transporte público de Fortaleza?

1.4 Justificativa

O planejamento dos transportes urbanos tem avançado e novos modelos surgiram, através de melhorias nos modelos matemáticos e computacionais, trazendo a perspectiva de melhor representar a realidade. O progresso na utilização desses novos métodos na sociedade, por sua vez, acontece em uma velocidade bem menor, com a tomada de decisão sendo embasada muitas vezes em métodos tradicionais, mas muito limitados ou, muitas vezes, de maneira intuitiva.

Dentro do contexto de redes multimodais, Maia (2013) cita que apesar do método de equilíbrio estocástico ser considerado o estado da arte pela comunidade científica, apresenta algumas limitações. Enquanto Modelística (2012) afirma que seu método de alocação por meio da escolha discreta apresenta muitas vantagens em relação aos métodos tradicionais.

Quanto à problemática da acessibilidade de mobilidade de pessoas, ciente de que a modelagem é ferramenta de auxílio ao planejamento urbano, se destaca o planejamento do transporte público, uma vez que este é um instrumento de democratização do acesso das pessoas. A modelagem do transporte público, principalmente em redes complexas com diversos modos e integrações, ainda apresenta lacunas devido a dificuldades relativas a representações na rede e na tomada de decisão.

1.5 Objetivos

Face aos problemas associados à modelagem da rede de transporte público de Fortaleza, objetiva-se, com este projeto de graduação, realizar a modelagem desta rede. Os objetivos específicos desse trabalho são:

- a) Identificar as dificuldades existentes na modelagem da rede multimodal integrada de transporte público de Fortaleza;
- b) Avaliar os modelos de rede de transportes existentes que possam representar a rede de transporte público de Fortaleza;

- c) Avaliar os métodos de alocação de transportes que possam representar as viagens na rede de transporte público de Fortaleza.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

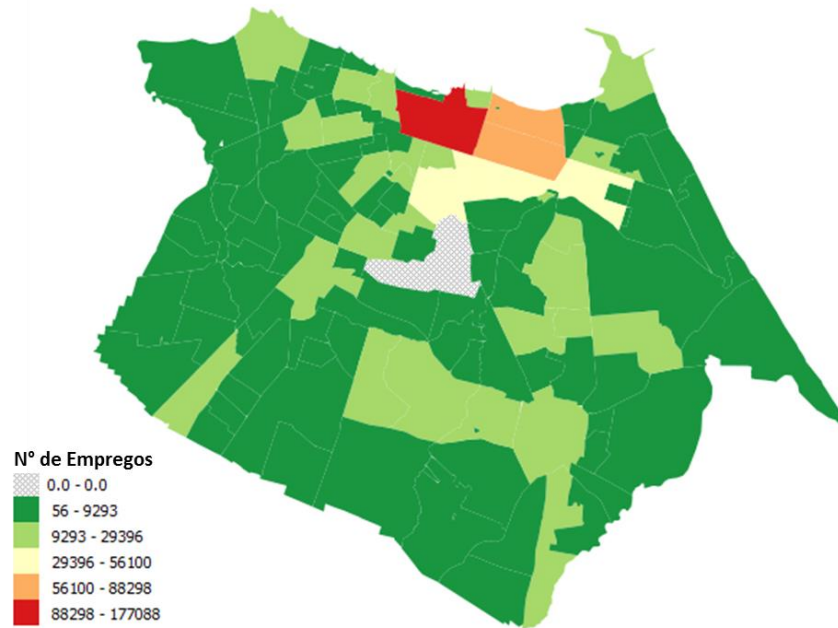
2.1 Rede Multimodal Integrada de Fortaleza

Segundo Ferraz e Torres (2004), o transporte público coletivo é de fundamental importância nas cidades por seu aspecto social e democrático, uma vez que representa o único modo motorizado seguro e cômodo acessível às pessoas de baixa renda, bem como seguro e cômodo para quem não pode dirigir, ou prefere não dirigir. Essa dependência do transporte público pela população de baixa renda torna-os reféns de tarifas elevadas e baixa velocidade operacional (MAIA, 2013).

Apesar da grande importância, o planejamento de transportes não acompanhou o processo de urbanização da maioria das cidades brasileiras, resultando em problemas relacionados à mobilidade e acessibilidade. O processo de planejamento do Sistema de Transporte Público de Passageiros (STPP) de Fortaleza é demarcado por falhas quer seja em relação à continuidade dos estudos, devido ao fato de muitos deles não terem suas propostas implementadas, quer seja pela definição das áreas de estudo, que ora se restringem apenas a Fortaleza, ora englobam toda a Região Metropolitana de Fortaleza (HENRIQUE, 2004).

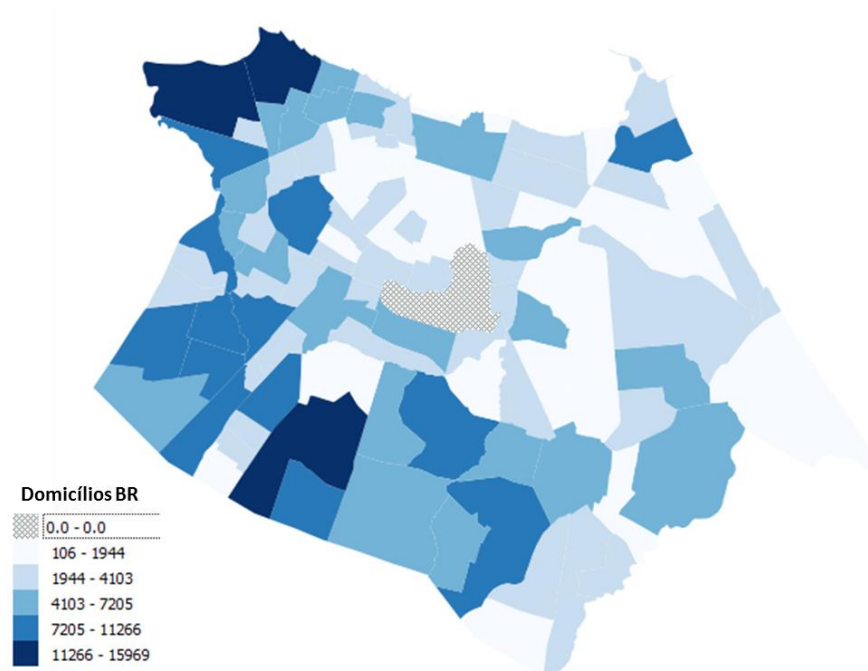
As análises de Andrade (2016) e Lima (2017) apresentam Fortaleza com a perspectiva da representação do sistema de atividades e do uso do solo, assumindo as interações com o sistema de transportes. Nessa perspectiva, a cidade foi caracterizada pela distribuição espacial das atividades e dos domicílios, a partir de dados do Ministério do Trabalho e Emprego (MTE) e do Censo do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) de 2010, bem como as projeções do próprio IBGE. Essa caracterização, observada na Figura 1e na Figura 2, mostrou a concentração espacial das atividades de Fortaleza na região do Centro, Aldeota e Meireles. A análise das autoras permitiu concluir, também, que a população de baixa renda está localizada nas regiões mais periféricas da cidade, regiões essas que apresentam baixos índices de acessibilidade de mobilidade.

Figura 1 – Distribuição dos empregos por bairro em Fortaleza



Fonte: Elaborado pelo Autor

Figura 2 – Distribuição dos domicílios de baixa renda por bairro em Fortaleza



Fonte: Elaborado pelo Autor

A última década registrou um rápido crescimento no número de veículos de baixa capacidade nas cidades brasileiras, considerando esse contexto é necessário conhecer os

aspectos relacionados aos tipos de integração existentes e buscar compreender sua influência sobre a rede (VASCONCELLOS E BALASSIANO, 2004).

Uma rede de transporte pública integrada se refere a possibilidade da realização de transbordos entre linhas. Para Ferraz e Torres (2004), existem 3 possíveis tipos de integração: física, tarifária e temporal. A integração física consiste na possibilidade de transferência de veículo em um ponto comum de parada, a integração tarifária está associada à não necessidade de realizar um novo pagamento ao se trocar de linha ou pagar um valor significativamente menor e a integração temporal consiste na possibilidade de utilizar o mesmo bilhete em diferentes linhas por um determinado tempo para, por exemplo, conectar linhas alimentadoras com uma linha principal.

Existe a necessidade de tornar o transporte público mais atraente com um serviço integrado e de qualidade. Os sistemas de transporte público devem buscar ainda uma integração modal, visto que a combinação de transportes públicos e privados em uma rede multimodal oferece oportunidades para tirar proveito dos pontos fortes de cada um dos subsistemas e contornar suas fraquezas, tornando-se uma alternativa interessante (MAIA, 2013).

O relatório Modelagem no Apoio à Decisão no Planejamento, Operação e Gestão dos Sistemas de Transporte Público e de Circulação Viária de Fortaleza (Universidade Federal do Ceará/Prefeitura Municipal de Fortaleza, 2016) explica que o Sistema Integrado de Transporte Público da cidade de Fortaleza (SIT-FOR) foi implantado no ano de 1992 com a criação de sete terminais de integração, deixando de ser um sistema radial e tornando-se tronco-alimentador. O sistema é operado por ônibus e, desde 2012, está dividido em cinco áreas de operação e uma área neutra, sendo que a operação segue regime consorciado. Na Figura 3 é apresentado o mapa com a divisão das áreas.

Desde o ano de 2013 foi incorporada a integração temporal em todo o sistema, possibilitando realização de um número ilimitado de viagens com transferências em qualquer ponto de acesso à rede, dentro de um período de até duas horas. Tal inovação possibilitou a ocorrência de viagens sem a obrigatoriedade de transferências em terminais.

Figura 3 – Áreas de operação do SIT-FOR



Fonte: Modelagem no Apoio à Decisão no Planejamento, Operação e Gestão dos Sistemas de Transporte Público e de Circulação Viária de Fortaleza – UFC/PMF, 2016.

Na sua análise de redes multimodais integradas de transporte público, Maia (2013) concluiu que existem maiores dificuldades na modelagem desse tipo de rede devido a sua complexidade e à dificuldade de representar além das características do transporte público, os diversos tipos de integração. A autora ainda destaca aspectos relacionados ao zoneamento e à representação da oferta na rede como importantes para obter uma boa representação da rede.

2.2 Modelagem da Rede de Transporte

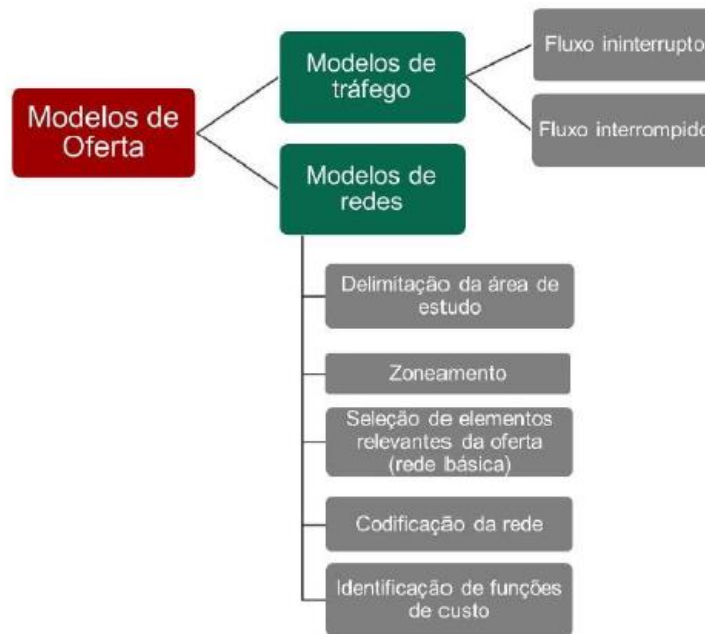
Para Cascetta (2009), um sistema de transporte pode ser definido como um conjunto de elementos e interações entre eles que produzem tanto uma demanda por viagens dentro de uma determinada área como a prestação de serviços de transportes para atender essa demanda. Quase todos os elementos têm algum impacto, porém, é impossível considerar todos em um problema de transporte. Ao propor sua representação conceitual de rede de transportes, o autor explica que a abordagem para o sistema em análise é, no geral, agrupar os aspectos mais importantes e suas inter-relações, tratando os demais elementos como externos.

Ortúzar e Willumsen (2011) definem essa representação de uma parcela da realidade como modelagem e que esta considera apenas os aspectos importantes a serem focados na análise, portanto só representam bem a realidade sobre uma perspectiva particular. Os autores ressaltam, ainda, que esse processo de modelagem pode auxiliar na tomada de decisão e no planejamento de sistemas de transportes.

Um sistema de transportes consiste em dois principais componentes: Demanda e Oferta (CASCETTA, 2009). Ortúzar e Willumsen (2011) definem a demanda por transporte como uma derivação dos desejos ou necessidades das pessoas em realizarem uma atividade em uma determinada localização. Os autores destacam, ainda, que para compreender bem essa demanda é importante que se compreenda a distribuição espacial das atividades. Quanto a oferta de transportes, Cascetta (2009) define como a produção de oportunidades de viagens, composta por facilidades (estradas, estacionamentos, etc.), serviços (linhas de transporte público), regulamentos (normas de circulação e de estacionamento) e preços (tarifas de transporte público, preço de estacionamento, pedágio, etc).

Segundo Maia (2013), a modelagem da oferta normalmente é definida pela combinação entre modelos de tráfego e modelos de rede. Conforme a Figura 4, os modelos de tráfego são usados para analisar e simular os efeitos das interações entre os veículos, enquanto os modelos de rede são utilizados para representar a estrutura topológica e funcional da rede.

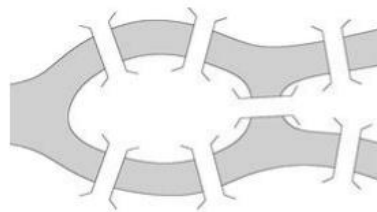
Figura 4 – Classificação de modelos de oferta



Oppenheim (1995) definiu viagens como atividades que acontecem de uma localização geográfica a outra, dentro de uma rede de transportes. Representações por rede surgem em diversas aplicações. Redes físicas, o tipo de rede mais facilmente identificável, aparecem em diferentes tipos de sistemas: de comunicação, hidráulicos, mecânicos, eletrônicos e de transportes (AHUJA, 1993). Por serem usadas também na representação de sequência de atividades em processos produtivos, uma área bem coberta por pesquisas, foi desenvolvida uma nova área de estudos matemáticos: a Teoria dos Grafos (DE LA BARRA, 1989).

A análise de sistemas de transportes foi proposta se apoiando fortemente na Teoria dos Grafos e em técnicas de outras áreas de estudo, mas isso pode gerar algumas confusões, visto que um sistema de transportes tem muitas peculiaridades (DE LA BARRA, 1989). A base da Teoria dos Grafos vem da solução matemática desenvolvida por Leonhard Euler com o propósito de resolver o histórico problema matemático conhecido como as Sete Pontes de Königsberg. O problema consistia na possibilidade de cruzar as sete pontes (Figura 5) que ligavam regiões desse então território da Prússia, com a restrição de que não se cruzasse uma ponte mais de uma vez. Newton (2010) explica que o problema, apesar de atualmente parecer trivial, intrigou bastante as pessoas em 1736.

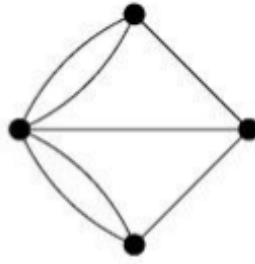
Figura 5 – Representação das sete pontes de Königsberg



Fonte: Newton (2010)

Newton (2010) diz que a proposta de Euler para provar que o problema histórico não havia solução é uma das mais antigas provas que embasam a Teoria dos Grafos. Euler (1741) criou uma representação do mesmo por um conjunto de arcos e pontos, vistos na Figura 6, na qual os vértices representam as massas terrestres e os arcos representam as pontes.

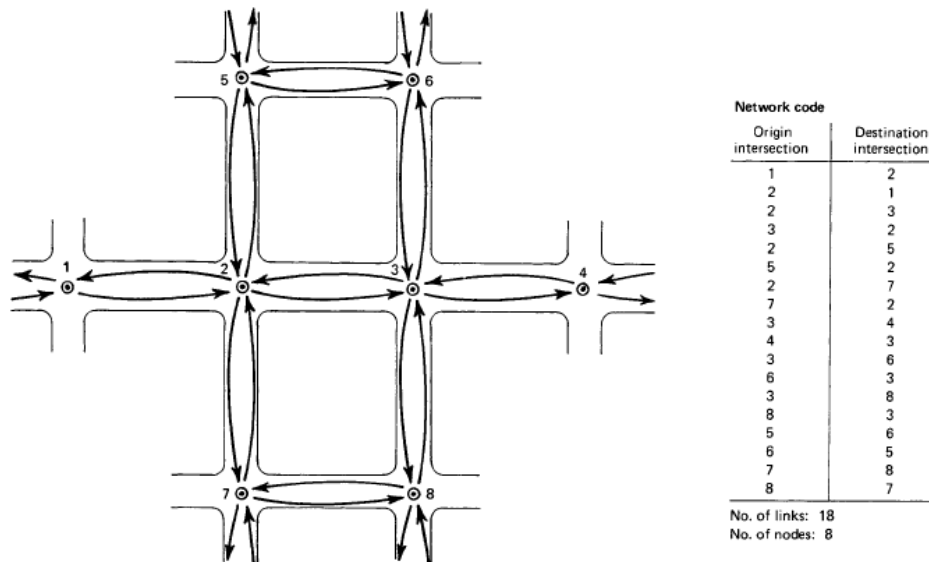
Figura 6 – Grafo proposto por Euler para resolução do problema



Fonte: Newton (2010)

Em termos gerais, uma rede de transportes é definida como um grafo direcionado, ou seja, um conjunto de nós conectados por arcos direcionais, como mostrado na Figura 7. Na concepção mais simples, uma rede de transportes representa uma infraestrutura física, na qual os arcos ou *links* representam as vias e os nós representam as interseções. (DE LA BARRA, 1989). Os nós e arcos em uma rede podem estar associados a diversas características para capturar mais detalhes do sistema, mas, mesmo assim, normalmente se perde muita informação nesse processo de transformar um sistema inteiro em uma representação de rede (NEWTON, 2010).

Figura 7 – Representação de rede de transportes por grafo direcional



Fonte: De la Barra (1989)

Cascetta (2009) define esse conjunto de elementos físicos como Rede Básica, na qual facilidades e serviços podem estar relacionados a um ou a vários modos de transporte. O

primeiro tipo é chamado de rede unimodal e o segundo de rede multimodal. Para casos gerais, o autor propõe que a modelagem da rede aconteça por meio das seguintes fases:

- a) Delimitação da área de estudo;
- b) Definição do zoneamento;
- c) Seleção dos elementos relevantes da oferta de transportes (Rede Básica);
- d) Elaboração do Grafo;
- e) Identificação das funções de desempenho e custo;
- f) Identificação das funções de impacto.

Cascetta (2009) ressalta que o nível de agregação deve ser coerente com o detalhamento da rede viária, citando que os resultados de um modelo muito agregado com uma rede muito detalhada podem subestimar o carregamento das vias locais e os resultados de um modelo muito desagregado com uma rede pouco detalhada podem superestimar o carregamento das vias principais.

Dentro da temática de modelagem de redes, Ortúzar e Willumsen (2011) caracterizam os problemas relacionados às redes de transporte público como muito mais complexos do que os relacionados ao transporte individual, mas ressaltam que nos anos mais recentes, houve um avanço nessa modelagem.

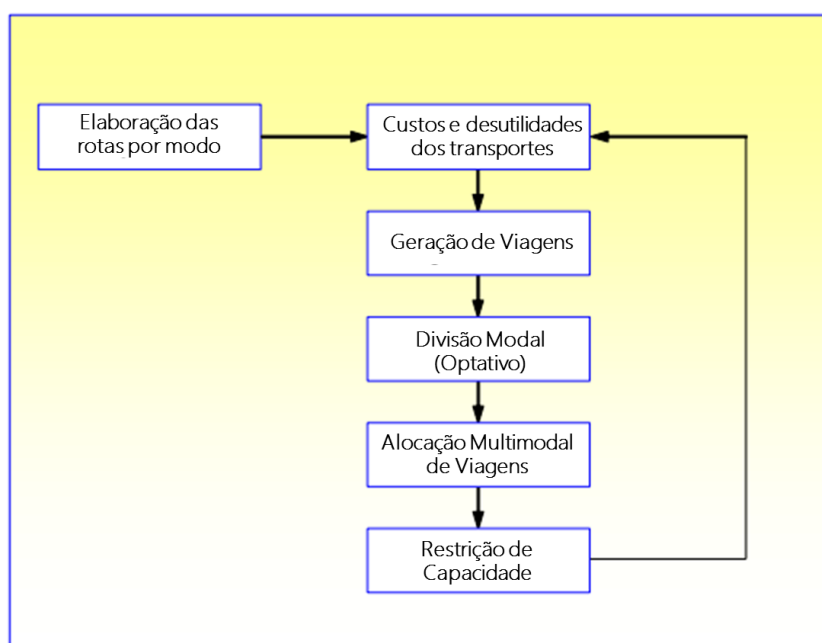
Uma rede de transporte público precisa de representações bem mais específicas, com arcos e nós sendo definidos por muitas características (DE LA BARRA, 1989). Nesse tipo de rede, a complexidade da modelagem aumenta devido à dificuldade de representar, além das características do transporte público, de modelar as viagens que incorporam as particularidades associadas a cada tipo de integração (MAIA, 2013).

O modelo TransCAD tem um amplo conjunto de ferramentas e processos para a criação e análise das redes de transporte público. Essas redes são criadas usando informações de rotas, dos pontos de parada e das camadas geográficas de linhas (vias, ferrovias, camada de nós, etc.) (CALIPER, 2013).

O Transus é uma plataforma de modelagem integrada de transportes e uso do solo, cujo modelo de transportes,

Figura 8, é capaz de representar os movimentos de passageiros e cargas, em modos privados e públicos, todos em uma rede comum com diferentes veículos competindo por espaço (MODELÍSTICA, 2012).

Figura 8 – Estrutura do modelo de transportes do Transus



Fonte: Adaptado de MODELÍSTICA, 2012.

2.3 Métodos de Alocação da Rede de Transporte Público

A análise dos métodos de alocação representa a análise dos modelos de interação entre oferta e demanda realizada pelos modelos de sistema de transportes.

Geralmente, os atributos usados em modelos de oferta baseados em linhas de transporte público são componentes associados ao tempo, relacionados às etapas da viagem e custos monetários. O tempo de viagem pode ser decomposto em tempo no veículo, tempo em que o veículo se encontra parado para embarque e desembarque (*dwelling time*), tempo de espera, tempo de embarque, tempo de desembarque e tempo de acesso ou difusão a linhas de transporte público. Cada componente do tempo de viagem geralmente possui um coeficiente que transmite a ideia de que há uma desutilidade diferente (MAIA, 2013).

Ortúzar e Willumsen (2011) citam que em redes de transporte público, as parcelas do tempo se organizam para compor o custo da maneira que se pode observar em (1):

$$C_{ij} = a_1 t_{ijv} + a_2 t_{ijw} + a_3 t_{ijt} + a_4 t_{ijn} + a_1 \delta_n + a_5 F_{ij} \quad (1)$$

onde:

C: custo generalizado do deslocamento;

t_{ijv} : tempo no veículo entre i e j;

t_{ijw} : tempo de caminhada de acesso e difusão;

t_{ijt} : tempo de espera na parada;

t_{ijn} : tempo de transbordo; δ_n : penalidade do transbordo;

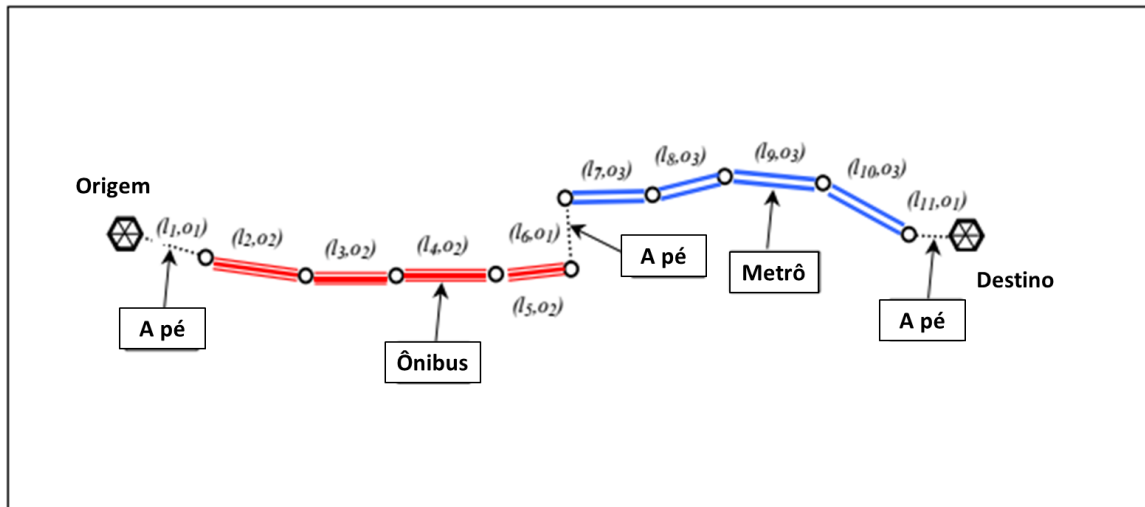
F_{ij} : tarifa cobrada para ir de i a j;

a_1, a_2, a_3, a_4 e a_5 : coeficientes (pesos) associados aos elementos descritos acima.

A formulação de custos pode ocorrer de diferentes maneiras e representa a percepção do usuário, percepção esta que Cascetta (2009) aponta como possivelmente diferente para um mesmo *link* de acordo com o usuário. A incorporação de variações às parcelas do custo tenta representar essas diferenças nas percepções dos usuários, como acontece no método do Equilíbrio Estocástico do Usuário (CALIPER, 2013), método considerado tradicionalmente pela comunidade científica como estado da arte (MAIA, 2013).

Maia (2013) reconhece que o Equilíbrio Estocástico do Usuário, apesar de complexo, apresenta limitações e em determinadas condições, como de baixa demanda, pode se aproximar de um método de alocação simples como o Tudo ou Nada. Modelistica (2012) aponta que a utilização do modelo de escolha discreta do Transus para decisões de rota vem se mostrando mais vantajosa do que a utilização dos modelos de Equilíbrio de Usuário, além de permitirem a escolha conjunta de rota/modo, escolha conjunta que Maia (2013) como uma formulação que permite a integração multimodal na rede, como acontece na Figura 9.

Figura 9 – Exemplo de rota multimodal



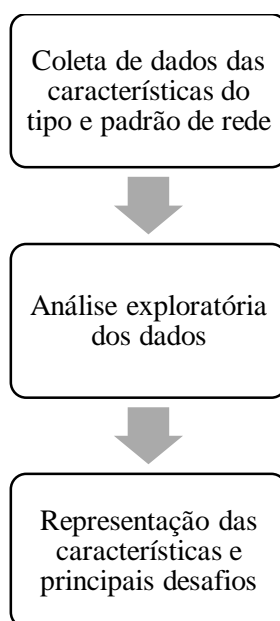
Fonte: Adaptado de MODELÍSTICA, 2012

3 MÉTODO

3.1 Representação da Rede Multimodal Integrada de Fortaleza

A análise da representação da rede de transporte público de Fortaleza, resumida na Figura 10, foi iniciada com uma revisão da literatura, na qual foi buscada, através de análises já realizadas, a contextualização do sistema de transporte público de Fortaleza. Foi importante, também, ter buscado, por meio da literatura, conhecer o contexto no qual está inserida a rede de transporte da cidade, com fim de identificar os desafios para a modelagem. Para esta etapa e para o experimento a ser realizado foi necessária uma análise de dados sobre a rede de transporte público, obtendo, além dos traçados das linhas, dados da operação do transporte público de Fortaleza.

Figura 10 – Método de Análise da Representação da Rede de Transporte Público



Fonte: Elaborado pelo Autor

Primeiramente foi realizada uma análise da cobertura da rede de transporte público na cidade, obtendo o desenho da rede e a distribuição dos pontos de parada.

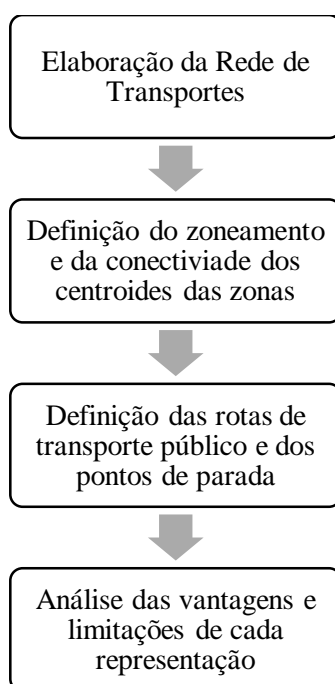
Foram analisados, também, como acontecem as integrações no sistema de transporte público local. Foram, então, localizados os pontos de integração física/tarifária e realizado estudos quanto ao modelo de integração temporal existente. Outro fator pesquisado foi como ocorrem integrações do transporte público com outros modos de transporte.

Dados de operação como dados de frequência das linhas de ônibus, capacidade dos ônibus, tempo parado em serviço e preço da tarifa foram usados para caracterizar a oferta existente de transporte público. Isso embasou a análise das principais necessidades em como adequar os modelos à realidade da cidade.

3.2 Avaliação dos Modelos de Rede de Transportes

Os modelos de Rede de Transportes analisados neste trabalho foram aqueles que se encontram nos softwares TransCAD e Transus. Com fim de tornar possível a avaliação, foram construídas as redes em ambos os softwares, partindo de uma coleta de dados dos dados de oferta de transporte público na cidade. O método descrito se encontra resumido na Figura 11.

Figura 11 – Método de Avaliação dos Modelos de Rede de Transportes



Fonte: Elaborado pelo Autor

A construção dos modelos se iniciou com a definição da área de estudo e da elaboração da rede, utilizando os dados coletados para representação das vias, através de nós e *links*, de maneira a garantir que ambos modelos estavam simulando a mesma rede viária em um mesmo momento temporal, ou seja, que os modelos representavam o mesmo cenário.

Após a elaboração da rede, fez-se necessário definir o nível de agregação para o zoneamento da região em estudo. Uma vez que um número muito grande de pontos para origens e destinos pode inviabilizar a modelagem, se fez necessária a definição de zonas de tráfego, nas quais foram agregadas todas as viagens da região em um centroide. A definição das regiões é uma etapa importante no processo de modelagem, uma vez que o nível de agregação impacta diretamente na calibração dos modelos e na compreensão dos resultados.

Aplicado o zoneamento para os dois modelos em estudo, serão, então, definidos os conectores de centroides para a rede viária. Os conectores representam os deslocamentos dos usuários do centroide das suas respectivas zonas de origem até a rede viária. Para representá-los, novos links foram criados ligando os centroides ao ponto mais próximo na rede viária e com custos de viagem extremamente reduzidos, com fim de representar que não existe impedância nos deslocamentos por esse tipo de via, uma vez que são fictícias.

Com os centroides conectados à rede, foram, então, inseridas as rotas de transporte público. É importante que as rotas inseridas sejam compatíveis com a rede viária, uma vez que estas são elementos da oferta de transporte de um mesmo período e região. Foi também definida, para o Transcad e para o Tranus, a representação das paradas de ônibus, indicando assim onde cada rota terá seus pontos de embarque e desembarque. Foram definidas atentamente a localização das paradas visando, principalmente, a compatibilidade entre as redes elaboradas.

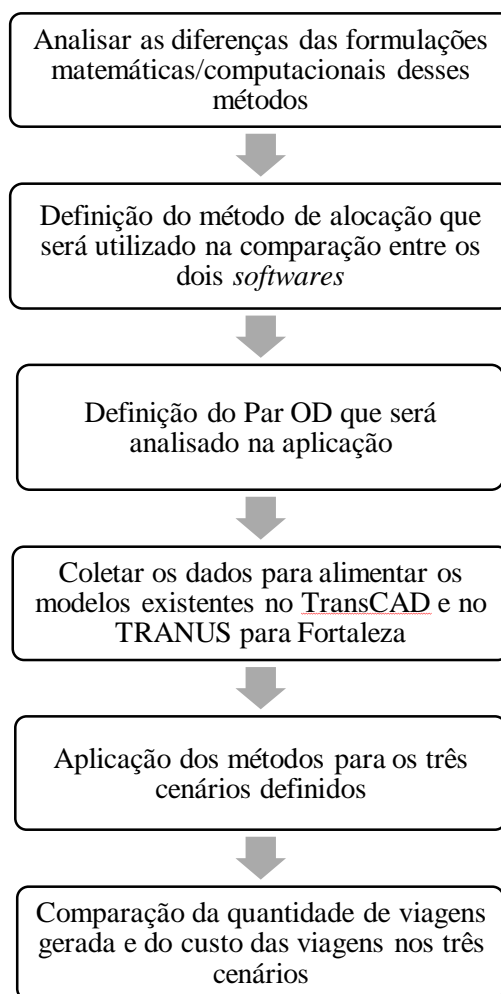
Por fim, foram selecionados os dados referentes à operação do sistema integrado de transporte público, que, por sua vez, serviram como dados de entrada para os modelos. A representação que cada modelo tem para as características de operação da rede são aspectos essenciais nesse projeto, então, na análise dos modelos de rede, foram levantadas as particularidades de cada uma das representações. Foram discutidas as vantagens e limitações de cada uma delas e serão comparados os modelos matemáticos/computacionais que são usados para representar as características da rede de transporte público como a penalização de transbordos, a possibilidade de integração e os tempos de embarque/desembarque nas paradas. A avaliação dos modelos de rede foi realizada na modelagem da rede multimodal integrada nos dois programas.

3.3 Avaliação dos Métodos de Alocação de Sistema de Transportes

A análise dos métodos de alocação representa a análise dos modelos de interação entre oferta e demanda que é realizada nos modelos de sistema de transportes. Foram levantadas

as diferenças nas formulações e no que estas representam ao modelo. Essa análise permitiu, ainda, a verificação da adequabilidade desses métodos à região em estudo. O processo utilizado se encontra resumido na Figura 12.

Figura 12 – Método de Avaliação dos Métodos de Alocação de Viagens



Fonte: Elaborado pelo Autor

Para o projeto do experimento, foi realizada uma revisão da literatura e dos manuais dos *softwares* Transus e Transcad para definir quais são os métodos de alocação mais avançados existentes em cada modelo. Uma vez definidos, esses métodos foram utilizados nas suas respectivas bases computacionais, com mesmas condições de carregamento da rede. Como o objetivo principal desse projeto é a análise comparativa da interação oferta-demanda, foi essencial que fosse garantida ao máximo a similaridade na representação da rede viária e do sistema de transporte público.

A alocação de viagens de transporte público resulta em um determinado carregamento das linhas de ônibus e, por consequência, da rede viária. Como rede de transportes é um elemento da representação da oferta para toda região em análise, o carregamento dessa rede por uma matriz Origem-Destino (OD) representaria a alocação de todas as viagens da cidade. Com o intuito de isolar os efeitos da superposição desses carregamentos na análise, foi escolhido apenas um par OD. Com a análise pautada apenas nesse conjunto de viagens, é recomendado que a escolha seja pautada na confiabilidade dos dados de entrada nos modelos de rede e na variabilidade de opções de rotas/modos. Com opções variadas de combinação de rotas aos usuários.

A execução do projeto se deu com a análise do resultado dos métodos de alocação de viagens de transporte público para o carregamento desse par OD na rede em três diferentes cenários:

- a) Cenário 1: Rede sem congestionamento: demanda para qual a velocidade de fluxo livre é preservada em ambos os métodos;
- b) Cenário 2: Rede com baixo nível de congestionamento: relação entre demanda e capacidade igual 0,75;
- c) Cenário 3: Rede com alto nível de congestionamento: relação demanda/capacidade igual 1,25.

Os valores foram modelados no TransCAD e foram referência para a aplicação no Transus. Com os valores modelados, foi possível uma maior compreensão de como esses métodos funcionam, complementando, assim, a análise previamente realizada das respectivas formulações matemáticas/computacionais. Foi possível, também, o estudo dos efeitos do congestionamento da rede entre os modelos. A partir de uma comparação entre as quantidades e os custos de viagens resultantes da aplicação dos dois métodos foi possível realizar a avaliação da adequabilidade à realidade da cidade.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Definição do zoneamento, centroides e conectores

O nível de zoneamento deve ser compatível com o detalhamento da rede modelada, uma vez que existe um impacto causado por essa incompatibilidade. Quanto a modelagem desses pontos fictícios na rede, bem como a dos conectores de centroide, foi possível representar a mesma realidade.

Para o caso em estudo, foi adotado o zoneamento proposto por Lima (2017), Figura 13, que dividiu a cidade de Fortaleza em 241 zonas utilizando como critério a recomendação do manual do usuário do Transus (Modelística, 2014) de ter uma agregação na ordem de 100 zonas por milhão de habitantes.

Figura 13 – Zonas de tráfego de Fortaleza



Fonte: Adaptado de Lima, 2017

4.2 Representação da Rede Multimodal Integrada de Fortaleza

A rede de transporte público de Fortaleza foi analisada a partir dos dados disponibilizado no Relatório Final do Transporte Metropolitano, elaborado em 2012 por

Governo do Estado do Ceará, Secretária de Infraestrutura (SEINFRA), Agência Reguladora de Serviços Públicos Delegados do Estado do Ceará (ARCE), Departamento Estadual de Trânsito do Ceará (DETRAN/CE) e Companhia Cearense de Transporte Metropolitano (METROFOR). Os dados originais correspondem aos dados de operação para Região Metropolitana de Fortaleza e foram adaptados para a área de estudo que, no caso, é representada pela cidade de Fortaleza.

Foram georreferenciadas para a região, como pode-se observar na Figura 14, as 510 rotas de transporte público que cobrem a cidade, sendo aqui consideradas rotas diferentes para os trajetos de ida e volta de uma mesma linha de operação. Essas 510 rotas são distribuídas em 472 rotas do Serviço de Transporte Coletivo por Ônibus (STCO), 34 linhas do Serviço de Transporte Público Complementar (STPC), 2 rotas de Trem referentes à linha Oeste e 2 rotas de Metrô referentes à linha Sul.

Figura 14 – Sistema Integrado de Transporte Público de Fortaleza



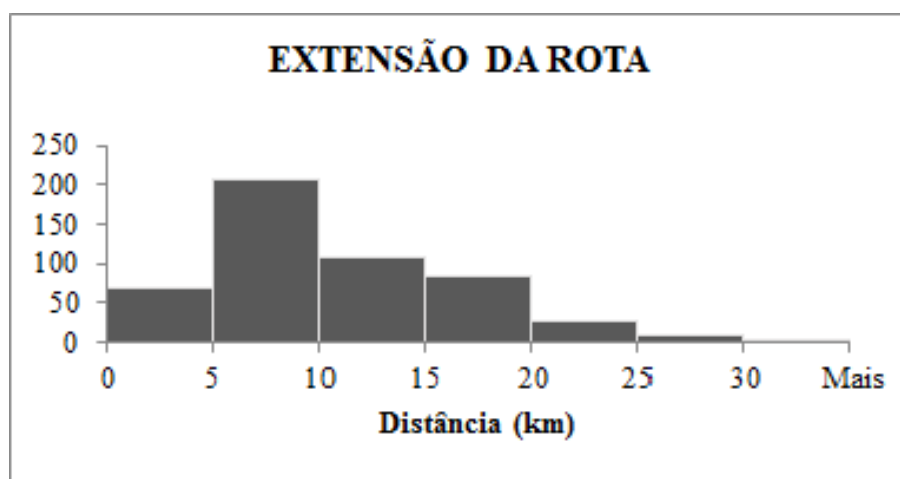
Fonte: Elaborado pelo Autor

Fortaleza tem uma rede tronco-alimentadora que conta com 9 terminais como pontos de apoio à operação e como pontos de integração física. São 7 terminais fechados de integração: Antônio Bezerra; Conjunto Ceará; Lagoa; Messejana; Papicu; Parangaba e Siqueira. Como foi mostrado na Figura 3, outros 2 terminais abertos completam o sistema: Praça Coração de Jesus e Praça da Estação.

Além dos terminais de integração física, existe um sistema de integração temporal, o Bilhete único, no qual se encontram integradas as linhas do transporte coletivo por ônibus e do transporte complementar. Para toda a cidade de Fortaleza, o valor da tarifa do STCO, do STPC, da tarifa integrada dos dois sistemas e da tarifa do Metrô é de R\$ 3,20. Já para a linha Oeste de Trem, a tarifa é de R\$ 1,00.

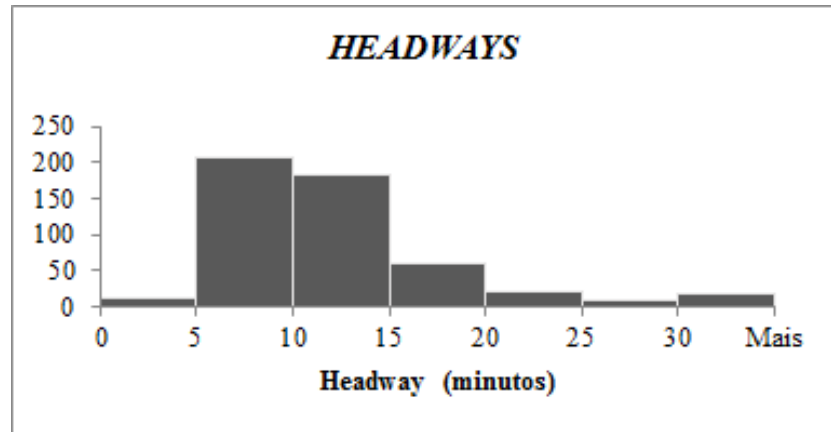
Analisando essas 510 rotas, tem-se uma cobertura de aproximadamente 5650 km de extensão. A partir do Gráfico 1, pode-se observar que a maior parte das linhas tem uma extensão de até 10 quilômetros. A extensão média encontrada foi de 11 quilômetros com um desvio padrão de 6,6 quilômetros, o que resultou em um coeficiente de variação de 59%.

Gráfico 1 – Histograma das extensões das linhas de transporte público



Fonte: Elaborado pelo Autor

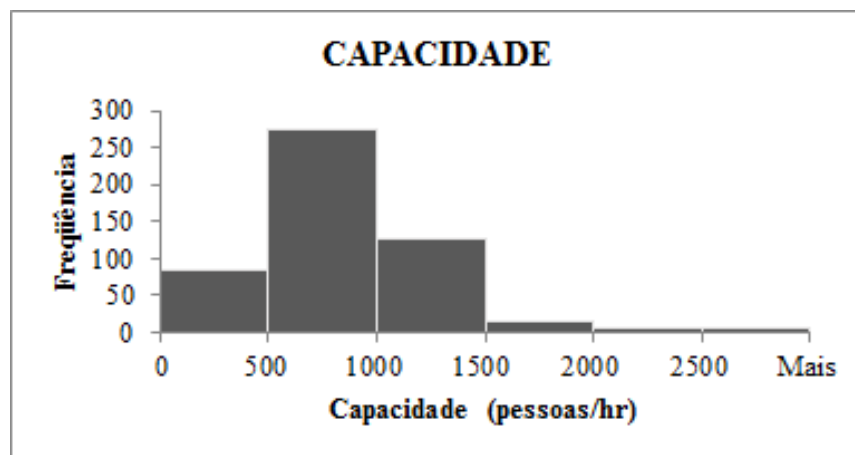
Outra característica de análise dessa rede foi a dos intervalos planejados entre as chegadas dos veículos das linhas, os *headways*. No Gráfico 2, pode-se observar que a maior parte das linhas tem *headways* de 5 a 15 minutos, mas podem ser observadas linhas com *headways* de 2 até 47 minutos. O *headway* médio encontrado foi de 12 minutos e 39 segundos com um desvio padrão de 6 minutos e 47 segundos, o que resultou em um coeficiente de variação de 53,5%.

Gráfico 2 – Histograma de *Headways* das linhas de transporte público

Fonte: Elaborado pelo Autor

Outra característica analisada foi a capacidade horária das linhas. No Gráfico 3, pode-se observar que maior parte das linhas tem capacidade de 500 a 1000 pessoas por hora. O somatório da capacidade horária de todas as rotas resulta numa capacidade horária total de 464391 passageiros, referente ao limite de atendimento da rede. A capacidade média encontrada foi de 911 pessoas por hora com um desvio padrão de 1261 pessoas, resultando em um coeficiente de variação de 138%.

Gráfico 3 – Histograma de capacidade horária das linhas de transporte público



Fonte: Elaborado pelo Autor

4.3 Análise dos Modelos de Rede de Transportes

As redes de transporte são normalmente modeladas a partir das representações dos nós e *links*. As redes de transporte público, por sua vez, necessitam que sejam incorporadas ainda as informações das rotas existentes.

4.3.1 Modelagem dos nós

No TransCAD, a representação dos nós é importante em diversos aspectos, uma vez que eles compõem a referência espacial dos *links*, são base para criação dos centroides das zonas e são referências para o sistema de rotas de transporte público.

Os pontos de paradas são representados nas camadas *Stops* existentes no Transcad, os quais são específicos de cada rota de transporte público, ou seja, não existe um ponto de parada que sirva a duas rotas distintas. Esses pontos de parada são atrelados ao nó mais próximo existente na rede viária através da função *nearnode*. Esses pontos específicos de cada rota são então agregados em pontos de parada físicos, na camada *Physical Stops*, na qual se encontram informações de localização e do sentido da via no qual a parada se localiza.

Essa representação das paradas constitui um aspecto da oferta do transporte público, uma vez que elas impactam no tempo de viagem através do tempo de espera na parada e do tempo de serviço (*Dwelling Time*). O tempo de espera é função do *Headway* que, apesar de ser um dado de entrada para rota de transporte público, o modelo incorpora pequenas variações dos valores através de uma distribuição normal de probabilidade e do *Interarrival Parameter*, que se refere à proporção do *Headway* da rota que será atribuída ao tempo de espera, como é mostrado a seguir:

$$w = \alpha * h \quad (2)$$

Em que:

w: Tempo de Espera na parada;

h: *Headway* do veículo;

α : *Interarrival parameter*.

Quanto ao *Dwelling Time*, como pode ser observado abaixo, ele é composto de três parcelas: uma delas é fixa, uma constante que corresponde ao tempo mínimo gasto para o ônibus parar e voltar à via; as outras duas correspondem aos tempos gastos para embarque e

desembarque de passageiros, ou seja, são funções do volume de embarque e desembarque, respectivamente.

$$d = c_o + c_1 * v_{on} + c_2 * v_{off} \quad (3)$$

d : *Dwelling Time*;

c_o : Tempo mínimo de parada;

c_1 : Peso para o volume de embarque;

v_{on} : Volume de embarque;

c_2 : Peso para o volume de desembarque;

v_{off} : Volume de desembarque.

Os nós no TransCAD ainda podem incorporar um aspecto de oferta da rede, quando este representa uma interseção e a ela é atribuída uma capacidade referente aos volumes de tráfego que a utilizam. Essa relação Volume/Capacidade do nó pode resultar na geração de atrasos naquela interseção e impactar no tempo de viagem total dos usuários.

No Transus, os nós também são base da rede, servindo de referência espacial para os *links* e rotas, mas limitando-se a representar as interseções da rede e os centroides das zonas, não impactando diretamente na oferta do transporte público.

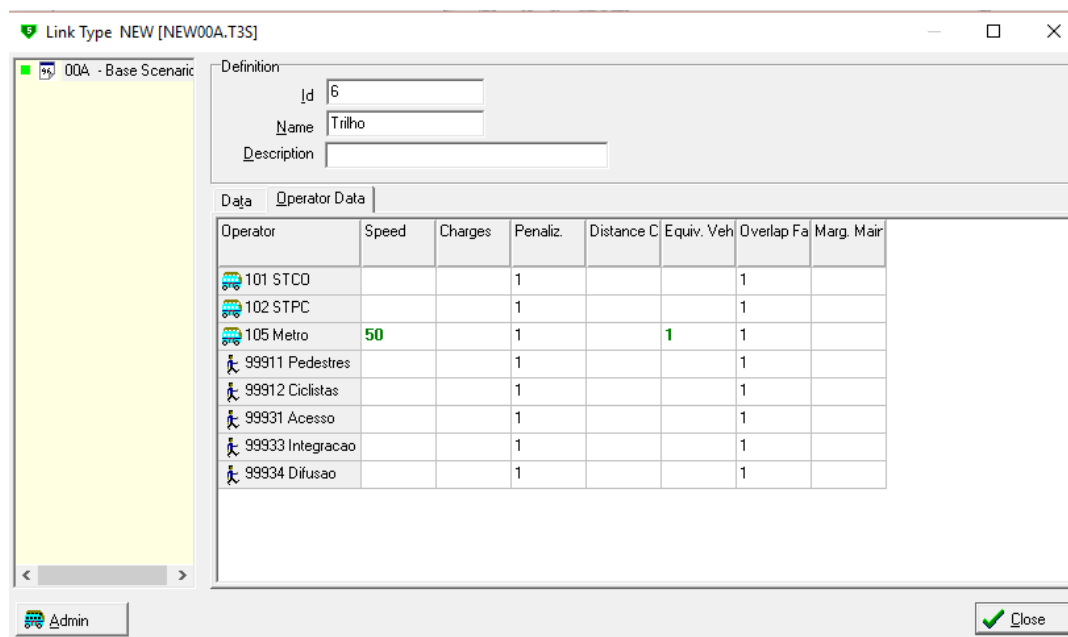
4.3.2 Modelagem dos links

No TransCAD, os *links* podem incorporar diversas características das vias como: comprimento; sentido; tipo; nome; classificação; velocidade de fluxo livre; tempo de caminhada; entre outros. O detalhamento e precisão dessas características irá impactar diretamente na qualidade dos resultados da alocação, uma vez que as mesmas são fundamentais para o cálculo do tempo de viagem.

No Transus, os *links* representam as características já citadas para o TransCAD, mas com uma sistematização diferente para os tipos de *link*, em que diversos atributos operacionais são especificados por tipo de *link* e por tipo de modo. É possível, assim, variar esses atributos para cada modo disponível, proibir a utilização de um determinado modo, variar o administrador disponível por aquele trecho, mudar o fator de equivalência veicular e até mudar os custos do modo. Por exemplo, na Figura 15, tem-se uma das janelas de atributos possíveis para os tipos de *link*, nela se observa a modelagem de uma via férrea, na qual o único modo

possível para realizar os deslocamentos é o Metrô, aqui com velocidade de 50km/h. Como os demais modos não tem velocidade determinada, ficam impedidos de se deslocar na rede utilizando esse tipo de *link*.

Figura 15 – Determinação de atributos para um tipo de *link*

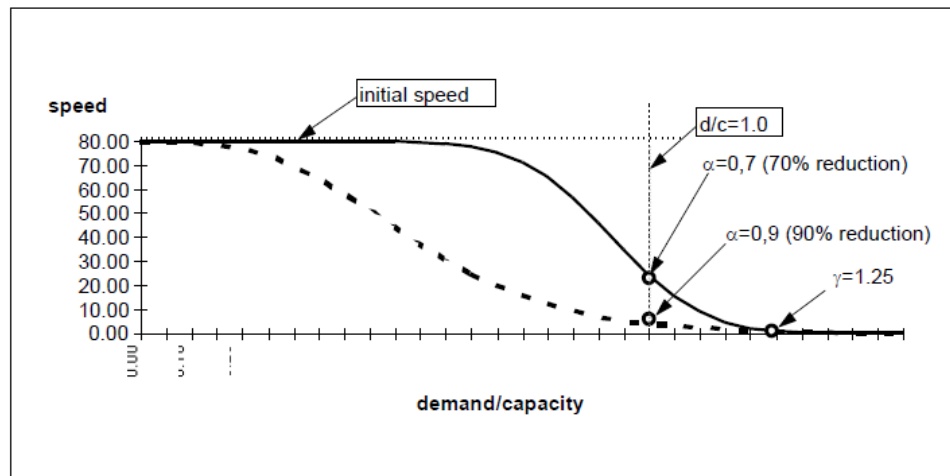


Fonte: Elaborado pelo Autor

Quanto às funções de desempenho da oferta, o modelo de custo generalizado do TransCAD usa uma função do tipo BPR (*Bureau of Public Roads*) para representar o aumento do tempo de viagem em função da demanda de pessoas pela capacidade dos veículos, enquanto a função desenvolvida originalmente pelo Administração Federal de Rodovias dos Estados Unidos buscava representar o aumento do tempo de viagem em função do congestionamento nos *links*, ou seja, em função da relação do volume de veículos e da capacidade da via.

Para o Transus, os *links* apresentam duas funções de desempenho da oferta, uma para representar o congestionamento das vias e uma segunda que representa o aumento de tempo de espera nas paradas em função do aumento da relação demanda por capacidade. A função de redução da velocidade aproxima uma BPR, mas tem como vantagem a utilização de uma equação simples sem pontos de inflexão, como se observa na Figura 16, além de, segundo Modelística (2012), produzir resultados mais realísticos em diversos testes empíricos.

Figura 16 – Função de redução de velocidade do Transus



Fonte: MODELISTICA, 2012

O tempo atraso da fila em um *link* congestionado aproxima uma curva de Poisson usando os seguintes parâmetros:

$$QD(l) = \text{Poisson}(S, F, C) \quad (4)$$

Em que:

QD (l): Atraso da fila no *link* l;

S: Tempo de atendimento (1/VFL)

F: Volume no *link* l;

C: Capacidade do *link* l.

Os atrasos no congestionamento são adicionados ao custo da rota, aumentando, assim o custo generalizado e, por consequência, diminuindo a atratividade nesse *link*. A velocidade de todos os modos que passam por tal *link* é reduzida de acordo com o conjunto de equações que definem uma secante hiperbólica.

$$V_m^\tau = V_m^0 - \text{sech}[\rho(DC_l)^\beta] \quad (5)$$

$$\rho = \text{sech}^{-1}(1 - \alpha) \quad (6)$$

$$\beta = \frac{\ln\left[\frac{\text{sech}^{-1}(v)}{\rho}\right]}{\ln \gamma} \quad (7)$$

Em que:

m: combinação de um modo *o* com um *link* l;

V_m^τ : velocidade do operador *o* no *link* l na interação τ ;

V_m^0 : velocidade do operador o no *link* l no fluxo livre;

DC_l : razão demanda/capacidade no *link* l ;

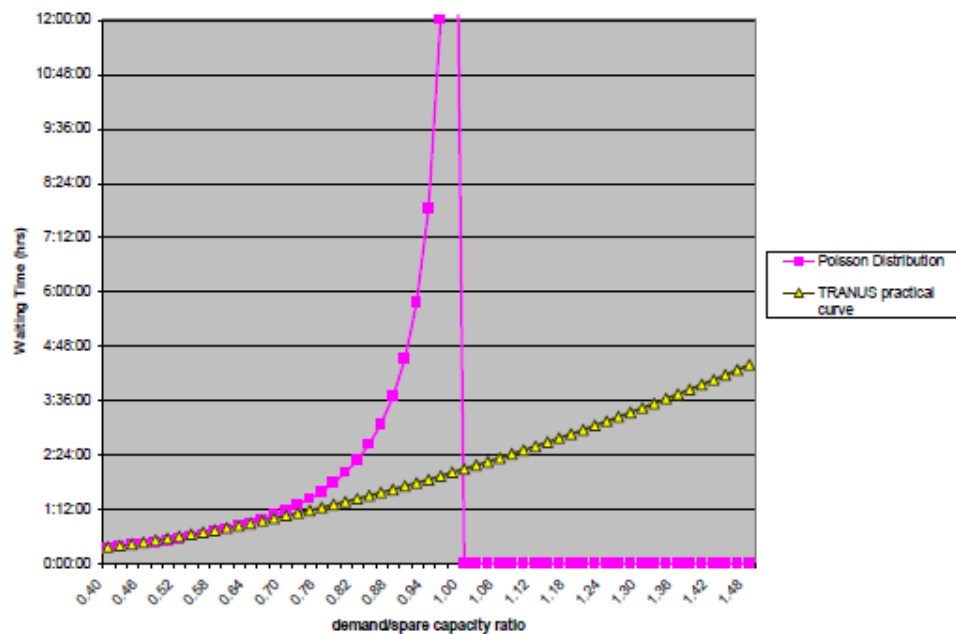
α : proporção de redução da velocidade inicial quando demanda/capacidade = 1;

v : proporção de redução da velocidade inicial quando demanda/capacidade = γ ;

γ : demanda/capacidade para quando a velocidade inicial é reduzida para o valor mínimo.

Os *links* no Transus também representam algumas das características que no TransCAD eram representadas nos nós e que se referem a oferta por transportes como o *Dwelling Time* e o tempo de espera na parada. O tempo de espera na parada, apresenta uma função de desempenho da oferta que se apresenta como uma suavização da distribuição de Poisson, como se observa na Figura 17.

Figura 17 – Função do Tempo de Espera no Transus



Fonte: MODELISTICA, 2012

O fenômeno de tempo de espera é representado com um modelo de teoria das filas, em que os passageiros chegam aleatoriamente enquanto o atendimento segue um regime de chegadas constante e pode ser formulado com:

$$TW_m = MW_m + \frac{\rho_m}{1 - \rho_m} \frac{1}{f} \quad (8)$$

Em que:

TW_m : tempo de espera;

MW_m : tempo de espera mínimo definido como *input*;

ρ_m : razão demanda/capacidade;

f: frequência do atendimento.

Quanto ao *Dwelling Time*, assim como foi formulado para o TransCad, ele também é composto de três parcelas: uma fixa, uma constante de corresponde ao tempo mínimo gasto para o ônibus parar e voltar à via; e as outras duas correspondem aos tempos gastos para embarque e desembarque de passageiros.

4.3.3 Modelagem das linhas de transporte público

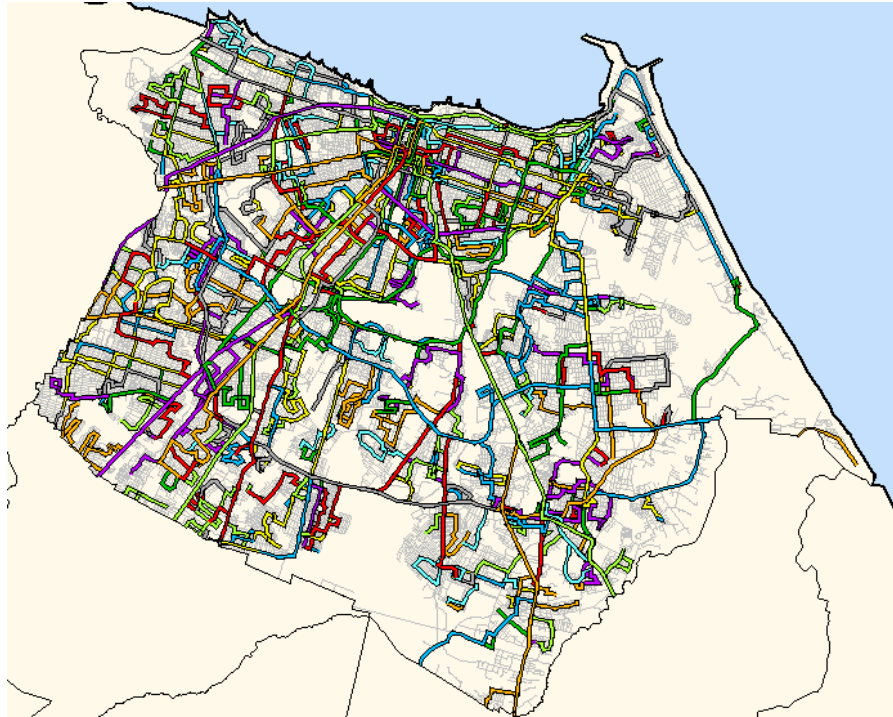
A representação das linhas de transporte público acontece com o referencial dos pontos pelos quais ela passa e cada linha apresenta seus dados de operação, como capacidade, *headways*, extensão e velocidade.

É importante citar que, no TransCAD, a representação dos *Headways* das linhas sofre uma variação a partir de uma distribuição de probabilidades que, no *default* do programa é uma distribuição normal. A ideia dessa distribuição é causar uma variação que simule uma parcela da aleatoriedade do sistema.

A capacidade das rotas, tanto no Transus como no TransCAD, representam uma característica importante para os modelos de desempenho da oferta, impactando no tempo de viagem, para o TransCAD ou no aumento do tempo de espera, para o Transus.

As linhas de transporte público são originais de uma base no TransCAD, Figura 18, e foram exportadas e adaptadas para representar a mesma oferta por transportes no Transus, como se observa na Figura 19.

Figura 18 – Representação da rede de transporte público de Fortaleza no TransCAD



Fonte: Elaborado pelo Autor

Figura 19 – Representação da rede de transporte público de Fortaleza no Trans



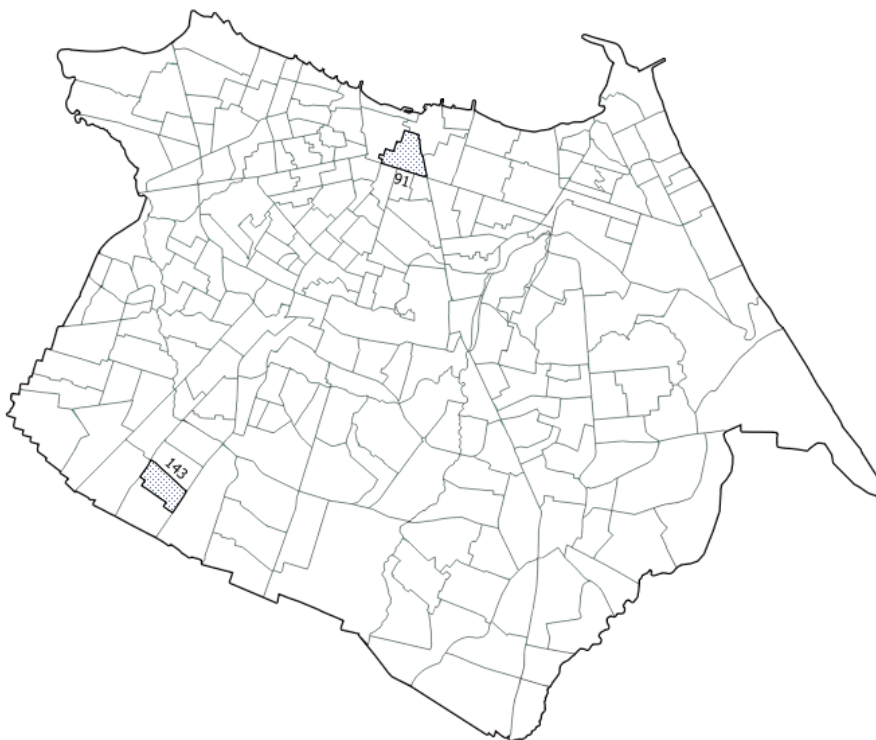
Fonte: Elaborado pelo Autor

4.4 Definição do Projeto do Experimento

Para o projeto do experimento foi necessário que se escolhesse, dentro do método proposto e do zoneamento já definido, as zonas que formariam o par Origem-Destino nas alocações de viagens. Buscou-se representar, aqui, um deslocamento coerente com a distribuição espacial das atividades e das pessoas na cidade, dados obtidos a partir das análises realizadas por Lima (2017) dos dados do Censo/IBGE (2010) e da RAIS/MTE (2015).

Para definição da origem da viagem, buscou-se uma zona periférica ocupada por muitos cativos do transporte público, utilizando o número de domicílios de baixa renda como *proxy*. A zona 143, que representa o bairro Parque Santa Rosa, no sul da cidade, foi escolhida como zona de origem, concentrando nela aproximadamente 2979 domicílios de baixa renda. A zona 91, subdivisão do bairro Centro, foi escolhida como destino dessas viagens, uma vez que essa é a zona com maior número de empregos, um total de 58259, e representa uma grande atratividade. Além disso, o deslocamento entre as duas regiões tem possibilidade de se alocar em rotas do sistema de transporte coletivo por ônibus, de transporte público complementar e no sistema metroferroviário, permitindo uma melhor avaliação dos modelos.

Figura 20 – Par OD definido para análise



Fonte: Elaborado pelo Autor

Algumas características referentes ao comportamento e a percepção dos usuários de transporte público foram também calibrados no Relatório Final do Transporte Metropolitano

(2012). As informações foram úteis para representação desses usuários nos dois modelos, mas é importante ressaltar que os parâmetros da função BPR estão presentes apenas na equação de custo generalizado do Transcad, não sendo utilizados no Transus. Os dados utilizados foram:

- a) Valor do tempo dentro do veículo: R\$ 0,03/minuto ou R\$ 1,8/hora;
- b) Peso do tempo de caminhada: 3,25;
- c) Peso do tempo de espera: 1,4;
- d) Peso do tempo de transbordo: 1,4;
- e) Penalidade para transbordo: 13,7 minutos;
- f) α (Função BPR): 1;
- g) β (Função BPR): 6.

Alguns testes iniciais de alocação no TransCAD foram realizados com fim de testar a capacidade da rede e, assim, foram determinados os valores de fluxo para os três cenários propostos no método:

- a) Cenário 1: 750 pessoas;
- b) Cenário 2: 1300 pessoas;
- c) Cenário 3: 3800 pessoas.

4.5 Alocação de viagens no TransCAD

Para a alocação das viagens de transporte público no software TransCAD 4.5, é necessário que se tenha uma matriz com informações de origem e destino para esse determinado modo, dificultando assim a alocação de viagens multimodais. O método mais sofisticado de alocação de viagens do TransCAD é o Equilíbrio Estocástico do Usuário (EEU), que implementa efeitos do congestionamento e da aleatoriedade do sistema. Segundo CALIPER (2013), o custo generalizado do método EEU em redes de transporte público é obtido por meio da equação:

$$c_k = \sum_{l \in L} [\gamma_f f_l + VOT * (\gamma_w W_l + \gamma_x x_l)] + \sum_{i \in L} [VOT * (\gamma_d d_i + \gamma_v t_i * (1 + \alpha_i \left(\frac{v_i}{c_i}\right)^{\beta_i}))] \quad (9)$$

$$+ \sum_{j \in J} [VOT * (\gamma_k k_j)]$$

Onde:

c_k : Custo total do caminho k ;

l : Índice de uma linha de transporte público utilizada no caminho k ;

L : Conjunto de linhas de transporte público usadas no caminho k ;

γ_f : Peso da tarifa;

f_l : Tarifa da linha l ;

VOT: Valor do tempo;

γ_w : Peso do tempo de espera;

W_l : Tempo de espera;

γ_x : Peso do tempo de penalidade de transbordo;

x_l : Tempo de penalidade de transbordo para a linha l ;

i : Índice de um link pelo qual o caminho k passa;

I : Conjunto de links usados no caminho k ;

γ_d : Peso do dwelling time;

d_i : Dwelling time nas paradas associadas ao link i ;

γ_v : Peso do tempo no veículo;

t_i : Tempo no veículo no link i ;

α : Parâmetro α na função BPR para o link i ;

v_i : Volume no link i ;

C_i : Capacidade horária dos veículos que servem o link i ;

β : Parâmetro β na função BPR para o link i ;

γ_k : Peso do tempo de caminhada;

k_j : Tempo de caminhada no link j .

Os parâmetros da função foram identificados no *software* e então preenchidos de acordo com os dados coletados. Foram necessários alguns testes para identificar como estava ocorrendo a composição do custo generalizado e quais limitações decorriam desse método. Nesse processo de testes, percebeu-se inconsistências no parâmetro “*Transfer Penalty (Time)*”, resolveu-se então monetizar essa penalização, o que resultou em R\$0,58, e aplica-la na tabela de transferências.

Deve-se destacar a utilização de uma função do tipo BPR para representar o aumento do tempo de viagem em função da demanda de pessoas pela capacidade dos veículos. A utilização desse tipo de função para representar pessoas implica em uma forte premissa de

que o congestionamento de pessoas nas linhas de ônibus tem um comportamento semelhante ao congestionamento de veículos em *highways* americanas.

A construção de rotas é um processo fundamental para permitir a compreensão dos resultados da alocação de viagens. Para o processo de alocação, o TransCAD oferece alguns métodos de procura de caminhos como o Caminhos Mínimos, Estratégias ótimas, *Pathfinder* e o Equilíbrio Estocástico do Usuário (EEU). Para o EEU, o algoritmo seleciona o caminho ótimo e alguns outros caminhos considerados atrativos de acordo com a função de custo e vai realizando a alocação por meio de um processo iterativo no qual a função de desempenho da oferta impacta nos custos a cada iteração.

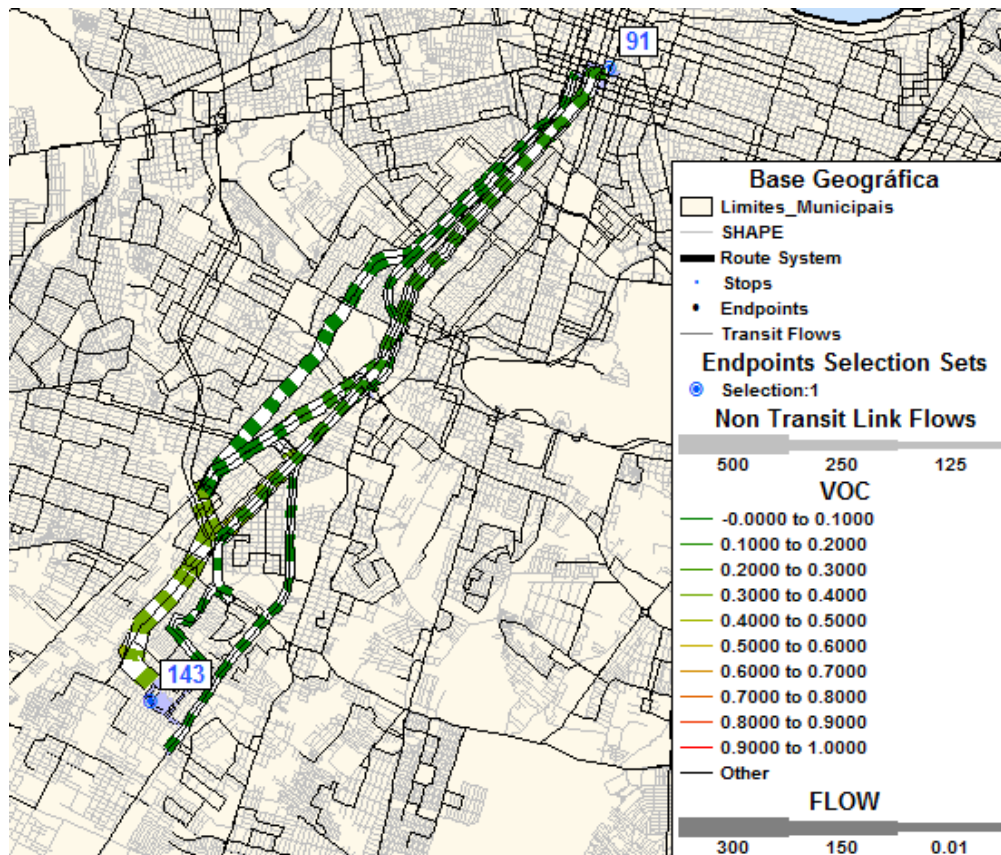
Um dado interessante para a análise é como a criação de rotas aconteceu, mas existe uma dificuldade de analisar este aspecto uma vez que o programa gera como resultado da alocação um arquivo detalhado apenas do melhor caminho (*Transit Skim*) quando, na verdade, ele aloca viagens em diversas outras rotas. A reconstrução dessas rotas só é possível, ainda com algumas imprecisões, através de uma análise detalhada dos seguintes arquivos gerados na alocação:

- a) *Transit Flows* – Fluxo de pessoas nas linhas de transporte público;
- b) *Boarding Counts* – Contagem de subidas e descidas por ponto de parada;
- c) *Walk Flow Table* – Fluxo de caminhada por *link* da rede.

Com o projeto do experimento pronto, foi alocado o primeiro cenário, com um fluxo OD de 750 pessoas, os resultados dessa alocação podem ser observados na

Figura 21, na qual é possível observar a distribuição espacial das rotas, o fluxo em cada uma delas e o nível de congestionamento, a Tabela 1 resume os tempos e custos da rota ótima e a Tabela 2 mostra as linhas de ônibus mais congestionadas.

Figura 21 – Alocação de viagens para o cenário 1 no TransCAD



Fonte: Elaborado pelo Autor

Tabela 1 – Resumo dos resultados do cenário 1 no TransCAD

TABELA RESUMO – EEU

Variáveis	Valores
Custo Generalizado	6,76
Tarifa (R\$)	3,2
Tempo de Acesso (min)	5,98
Tempo de espera Inicial (min)	4,5
Tempo nos veículos (min)	40,85
Tempo de transbordo (min)	2,35
Tempo de caminhada para efetuar os transbordos (min)	0
Tempo de Difusão (min)	5,61
Tempo total de Viagem sem penalidade (min)	75,17
Tempo total de viagem com penalidade (min)	88,87
Distância percorrida (km)	14,23

Fonte: Elaborado pelo Autor

Tabela 2 – Linhas mais carregadas no cenário 1 no TransCAD

Linhas mais carregadas		
ID	V/C	Fluxo
158	0,42	276
160	0,3	276
109	0,14	118

Fonte: Elaborado pelo Autor

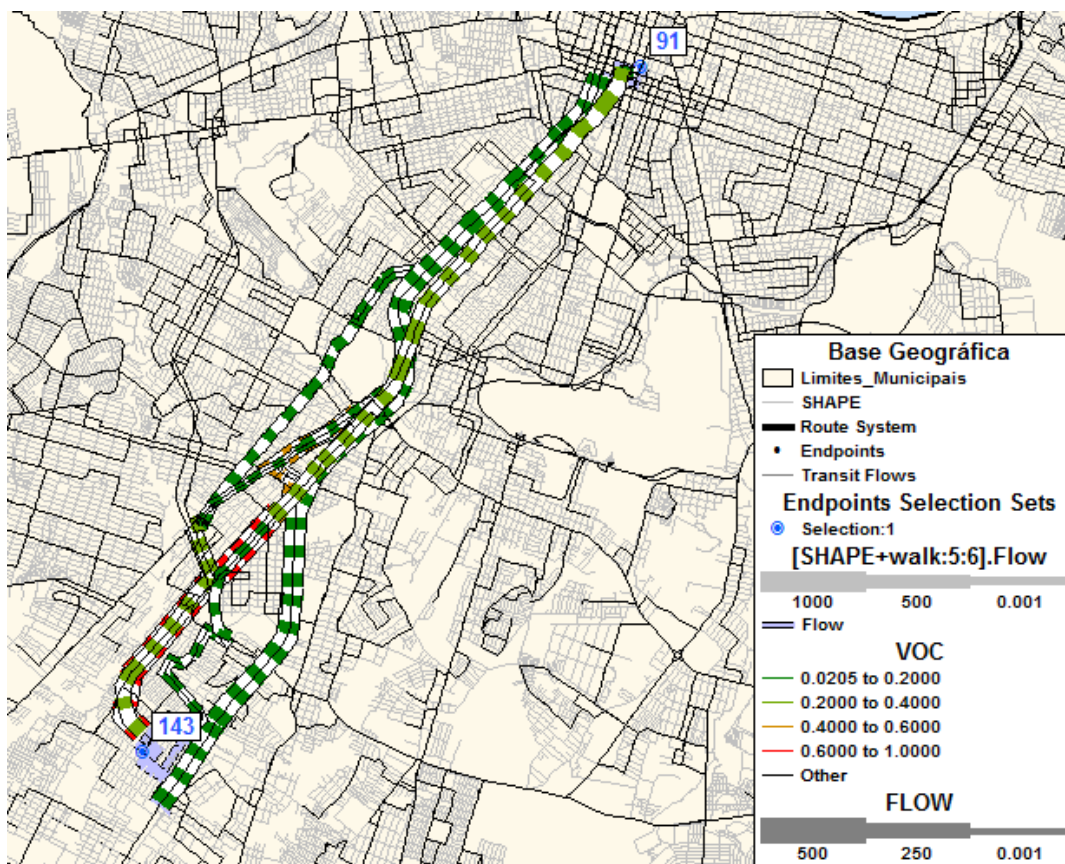
O primeiro cenário visava alocar um fluxo que não congestionasse a rede, sendo aqui obtido uma relação máxima de Volume/Capacidade de 0,42. Pode-se observar também, que os dados do caminho ótimo revelam um custo generalizado mínimo de R\$ 6,76. Além disso, realizando um processo de reconstrução de rotas, observou-se que foram criados, ao menos, seis caminhos distintos. Na realidade, o número de possibilidades é maior que seis, mas para essa análise foram considerados que um mesmo conjunto de linhas formava uma única opção, agregando pessoas cujas rotas se distinguiam apenas por um ponto de parada adjacente.

Para o segundo cenário de alocação, com um fluxo de 1300 pessoas, os resultados estão dispostos na Figura 22, na Tabela 3 e na Tabela 4.

O segundo cenário visava alocar um fluxo que não congestionasse totalmente a rede mas que houvesse impactos na função de desempenho da oferta, sendo aqui obtido uma relação máxima de Volume/Capacidade de 0,74. Aqui, os dados do caminho ótimo revelaram um custo generalizado mínimo de R\$ 6,9. Além disso, partindo do mesmo processo de reconstrução de rotas, observou-se que foram criados, ao menos, oito caminhos distintos.

Uma questão importante a ser observada nesse cenário é que os dados do caminho ótimo mostram um tempo total de viagem menor que o modelado no cenário 1, além disso não houve integração e, por consequência, penalização por transbordo. O tempo de viagem também foi reduzido pela metade. Essa situação indica a utilização da linha sul do metrô, que não necessita de integração, mas fica mais distante do centroide da zona em estudo e tem a distância de caminhada como causa da grande impedância.

Figura 22 – Alocação de viagens para o cenário 2 no TransCAD



Fonte: Elaborado pelo Autor

Tabela 3 – Resumo dos resultados do cenário 2 no TransCAD

TABELA RESUMO – EEU

Variáveis	Valores
Custo Generalizado	6,9
Tarifa (R\$)	3,2
Tempo de Acesso (min)	16,84
Tempo de espera Inicial (min)	3
Tempo nos veículos (min)	19,47
Tempo de transbordo (min)	0
Tempo de caminhada para efetuar os transbordos (min)	0
Tempo de Difusão (min)	10,61
Tempo total de Viagem sem penalidade (min)	60,84
Tempo total de viagem com penalidade (min)	60,84
Distância percorrida (km)	14,87

Fonte: Elaborado pelo Autor

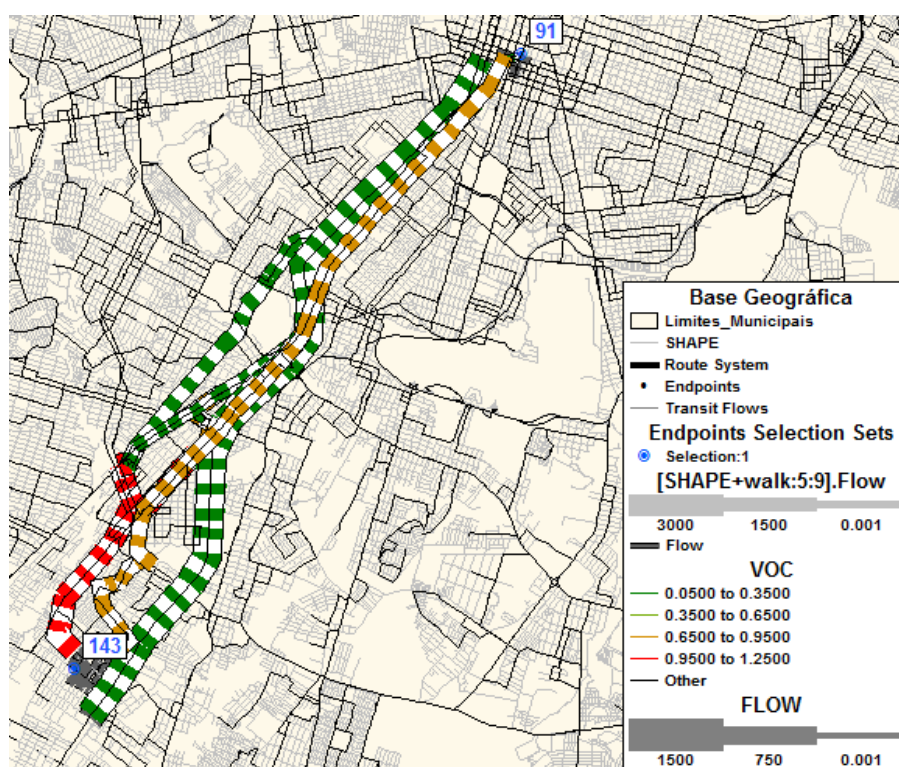
Tabela 4 – Linhas mais carregadas no cenário 2 no TransCAD

Linhas mais carregadas		
ID	V/C	Fluxo
158	0,74	479
1244	0,36	274
160	0,29	274

Fonte: Elaborado pelo Autor

Os resultados do cenário 3, com fluxo OD de 3800 pessoas estão dispostos na Figura 23, na Tabela 5 e na Tabela 6.

Figura 23 – Alocação de viagens para o cenário 3 no TransCAD



Fonte: Elaborado pelo Autor

Esse cenário visava alocar um fluxo que congestionasse a rede e que causasse impactos na função de desempenho da oferta, sendo aqui obtido uma relação máxima de Volume/Capacidade de 1,24. Os dados do caminho ótimo revelaram um custo generalizado mínimo de R\$ 7,36 mostrando o impacto na função de custo. Além disso, partindo do mesmo processo de reconstrução de rotas, observou-se que foram criados, ao menos, oito caminhos. Para este cenário, o metrô não aparece como a rota de custo mínimo, mas ainda assim é a rota que concentra a maior parte do fluxo, englobando 1000 pessoas.

Tabela 5 – Resumo dos resultados do cenário 3 no TransCAD

TABELA RESUMO – EEU	
Variáveis	Valores
Custo Generalizado	7,36
Tarifa (R\$)	3,2
Tempo de Acesso (min)	5,98
Tempo de espera Inicial (min)	6,5
Tempo nos veículos (min)	51,02
Tempo de transbordo (min)	5,4
Tempo de caminhada para efetuar os transbordos (min)	0
Tempo de Difusão (min)	5,61
Tempo total de Viagem sem penalidade (min)	89,32
Tempo total de viagem com penalidade (min)	103,02
Distância percorrida (km)	14,16

Fonte: Elaborado pelo Autor

Tabela 6 – Linhas mais carregadas no cenário 3 no TransCAD

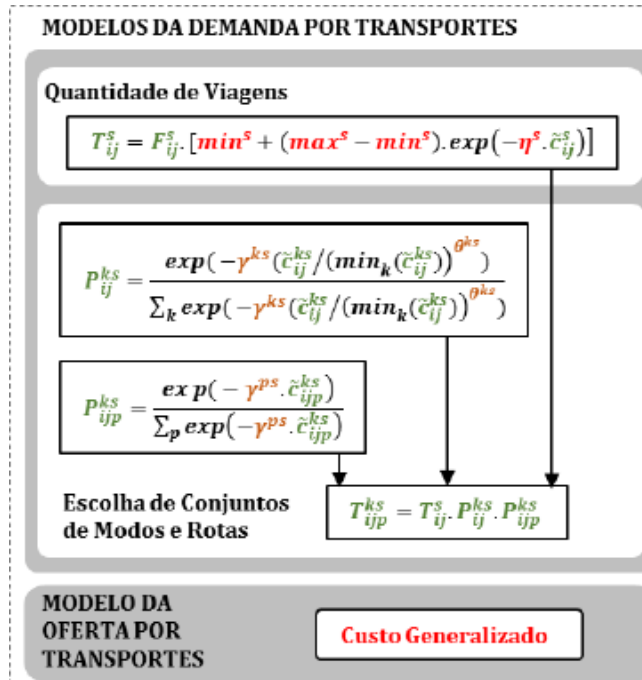
Linhas mais carregadas		
ID	V/C	Fluxo
158	1,24	800
160	1,08	1000
1244	0,78	600

Fonte: Elaborado pelo Autor

4.6 Alocação de viagens no Transus

Uma das características únicas do modelo de transporte no Transus (de la Barra, 1989) a coerência teórica total para representar todos os processos de decisão, se baseando em modelos de escolha discreta aninhados, incluindo especialmente a divisão modal e alocação de viagens na rede. Na verdade, alocação e divisão modal podem ser combinados, Figura 24, em um único processo (MODELÍSTICA, 2014). A alocação do transporte público no *software* Transus se diferencia devido à decisão da rota ser realizada em conjunto com a escolha do modo, através de um modelo aninhado *logit* multinomial no qual se avalia os custos de diferentes rotas multimodais e permitindo integração de acordo com as características da rede.

Figura 24 – Variáveis do Subsistema de Transportes do Tranus



Fonte: Sousa (2016)

A representação do modelo de oferta de transportes no Tranus é dada pelo custo generalizado, cuja equação se encontra a seguir:

$$c_{ijp}^{ks} = \sum_{m=1}^z RT_m^s + RD_m^s + TR_{m-1,m}^s \quad (10)$$

c_{ijp}^{ks} : Custo generalizado da rota p do ponto i ao ponto j pelo modo k para a categoria s ;

RT_m^s : Custo relacionado ao tempo na combinação de link $m(l,o)$ para demanda da categoria s ;

RD_m^s : Custo relacionado à distância na combinação de link $m(l,o)$ para demanda da categoria s ;

$TR_{m-1,m}^s$: Custo de transbordo, que é o custo referente ao embarque em um novo operador ou rota, pode acontecer no começo de uma viagem ou no quando ocorre uma transferência pelo caminho, ou seja, quando $o(m-1) \neq o(m)$.

O custo relacionado ao tempo é composto de dois componentes, o custo monetário e o custo percebido.

$$RT_m^s = tv_m \left(tt_o + \frac{ct_o tc_o}{to_o} \right) pc_o^s + tv_m (vv^s pt_m pg_o pp_o^s) \quad (11)$$

RT_m^s : custo relacionado ao tempo para uma combinação de link/operador m pela categoria de usuários s ;

tv_m : tempo de viagem do operador o no link l , função da distância do trecho e da velocidade do operador;

tt_o : tarifa relacionada ao tempo cobrada pelo operador o ;

ct_o : custo de operação do operador o ;

tc_o : proporção do custo de operação que o operador o transfere aos usuários;

to_o : taxa de ocupação do operador o ;

pc_o^s : proporção da tarifa paga pelos usuários da categoria s ao operador o ;

vv^s : valor do tempo de viagem dos usuários da categoria s ;

pt_m : fator de penalização associado ao tipo de link da combinação $m(l,o)$;

pg_o : fator de penalização associado ao operador o ;

pp_o^s : fator de penalização associada à combinação do operador o e a categoria s .

$$RD_m^s = d_i \left(td_o + \frac{cd_m tc_o}{to_o} \right) pc_o^s \quad (12)$$

RD_m^s : custo relacionado à distância para a combinação m de link/operador relativo à categoria s ;

d_i : distância do link l ;

td_o : tarifa relativa à distância cobrada pelo operador o ;

cd_m : custo de operação relativo à distância para o operador o no link l ;

tc_o : proporção do custo de operação que o operador o transfere aos usuários;

to_o : taxa de ocupação do operador o ;

pc_o^s : proporção da tarifa paga pelos usuários da categoria s ao operador o ;

$$TR_m^s = \left(tf_o + \frac{cf_o tc_o}{to_o} \right) pc_o^s + te_m ve^s \quad (13)$$

TR_m^s : custo de transbordo para a categoria s quando embarca o operador o no link l ;

tf_o : tarifa de embarque do operador o ;

cf_o : custo fixo de operação do operador o ;

tc_o : proporção do custo de operação que o operador o transfere aos usuários;
 to_o : taxa de ocupação do operador o ;
 pc_o^s : proporção da tarifa paga pelos usuários da categoria s ao operador o ;
 te_m : tempo de espera para um veículo do operador o no link l ;
 ve^s : valor do tempo de espera para os usuários da categoria s .

A formulação do custo generalizado no Tranus é bem mais complexa e possibilita incorporar diversos fatores na análise. O Tranus permite ao modelador uma representação mais flexível da realidade, uma vez que seus diversos parâmetros permitem a calibração em vários níveis. Para a aplicação do projeto do experimento, por exemplo, a inserção dos dados coletados foi possível com apenas uma parte da função de custo generalizado proposta, deixando espaço para uma formulação mais sofisticada, no caso da presença de uma maior variedade de dados.

Como mencionado no tópico 4.3.2, para o Tranus, os embarques e desembarques são realizados nos *links*, havendo uma maior dificuldade de representação desses pontos de parada. Para a modelagem dessa rede, foi considerado que os dois *links* mais próximos do ponto de parada permitem o embarque/desembarque de pessoas.

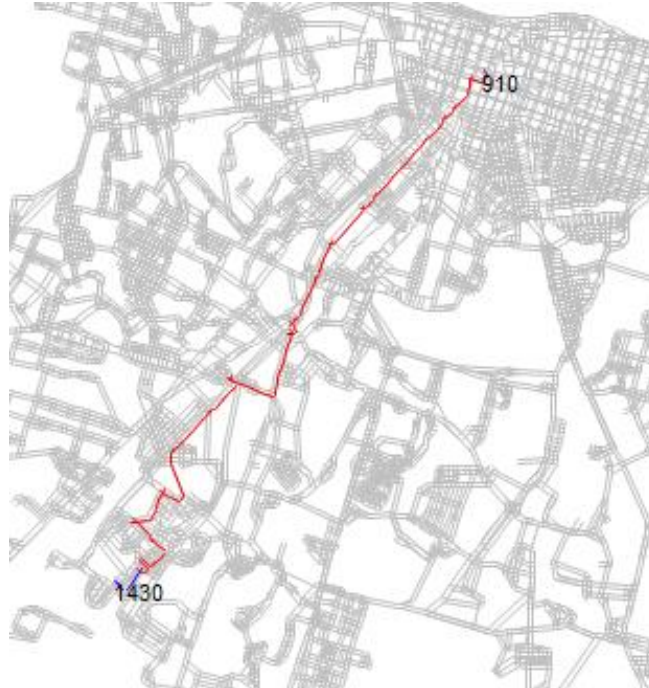
Com fim de manter a compatibilidade com o método aplicado para modelar a oferta no TransCAD, resolveu-se utilizar no Tranus, também, a penalidade de transferência já monetizada com o valor de R\$ 0,58.

O algoritmo de procura de caminhos do Tranus tem um mecanismo para evitar a construção de rotas altamente correlacionadas como rotas distintas, o *Overlapping Control*. O método procura identificar o grau de correlação entre rotas competitivas e as penaliza proporcionalmente. Esse processo resulta na proposição de rotas com menor custo generalizado e menor grau de sobreposição.

No Tranus, o número de caminhos criados é um parâmetro de entrada, mas em função do *Overlapping Control* apenas poucas rotas são realmente atrativas e recebem viagens. Para o projeto do experimento foi definido que o número de caminhos criados seria quatro.

A primeira rota criada se encontra na Figura 25, com uma composição de um acesso ao ponto de parada a pé, seguido do embarque na linha 313, com uma integração no Terminal da Parangaba para a linha 109, finalizando com egresso a pé até a zona central. O custo desse caminho para a alocação inicial do Tranus, que acontece sem restrições de capacidade, foi de R\$ 6,93.

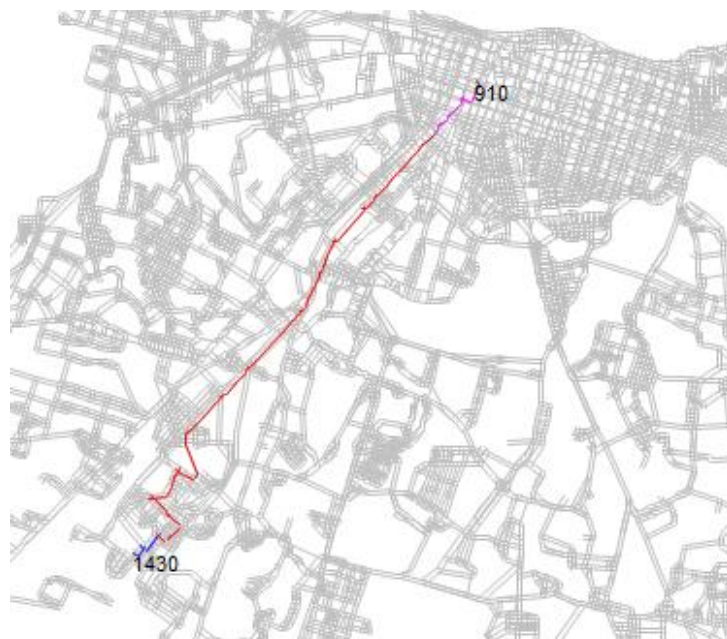
Figura 25 – Alternativa 1 de caminho gerado pelo Tranus



Fonte: Elaborado pelo Autor

A segunda rota criada se encontra na Figura 26, com uma composição de um acesso ao ponto de parada a pé, seguido do embarque na linha 1244, com uma integração para o sistema de transporte público complementar na linha 328, finalizando com egresso a pé até a zona central. O custo desse caminho para a alocação inicial do Tranus foi de R\$ 7,28.

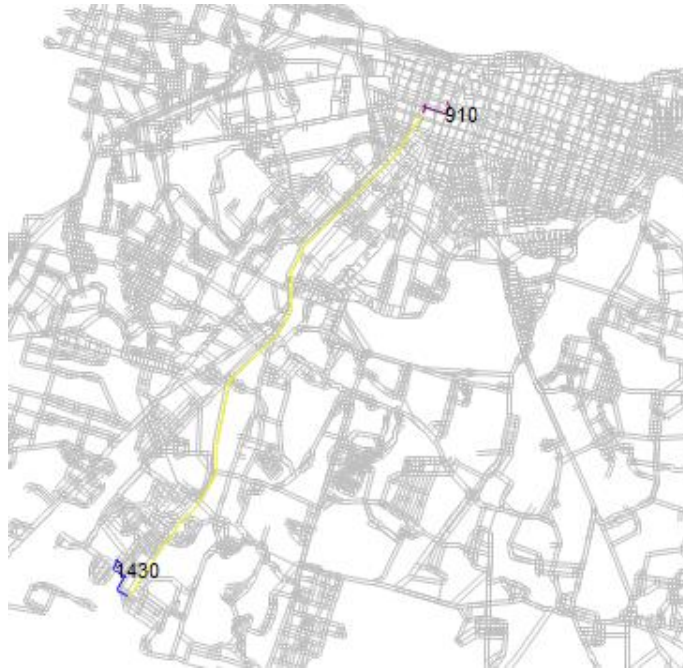
Figura 26 – Alternativa 2 de caminho gerado pelo Tranus



Fonte: Elaborado pelo Autor

A terceira rota criada se encontra na Figura 27, com uma composição de um acesso ao ponto de parada a pé, seguido do embarque no metrô, finalizando com um egresso a pé até a zona central. O custo desse caminho para a alocação inicial do Tranus foi de R\$ 7,00.

Figura 27 – Alternativa 3 de caminho gerado pelo Tranus

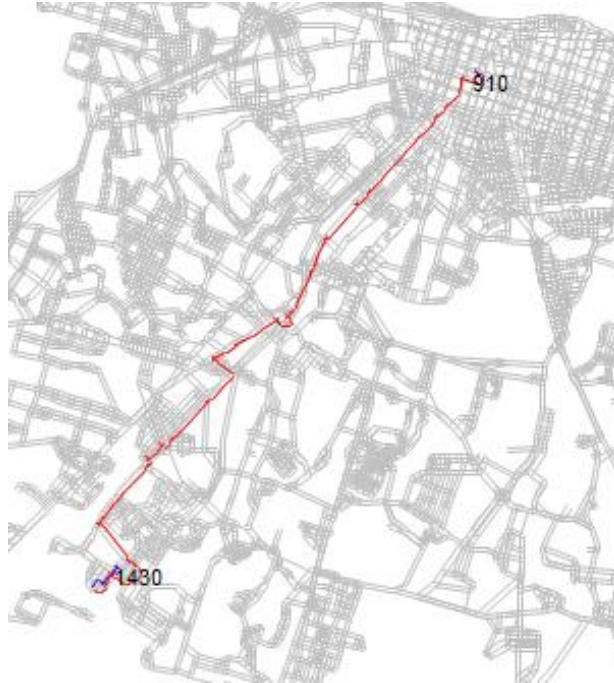


Fonte: Elaborado pelo Autor

A quarta rota criada se encontra na Figura 28, com uma composição de um acesso ao ponto de parada a pé, seguido do embarque na linha de ônibus 158, acontece uma integração para linha de ônibus 109 no Terminal da Parangaba e o trajeto é finalizado com um egresso a pé até a zona central. O custo desse caminho para a alocação inicial do Tranus foi de R\$ 7,60.

Na análise da composição de custo dessas simulações iniciais do Tranus, percebeu-se que o *dwelling time* não estava impactando no custo generalizado. A hipótese inicial de que o *dwelling time* estava compondo o tempo de viagem não foi validada.

Figura 28 – Alternativa 4 de caminho gerado pelo Tranus



Fonte: Elaborado pelo Autor

Existe a possibilidade de realizar a escolha dos modos separadamente ou não das escolhas de rota. A escolha conjunta de modo e rota representa um modelo mais sofisticado de representação das decisões dos usuários, uma vez que estas decisões não acontecem de maneira sequencial e só são normalmente assim apresentadas com fim de simplificar o processo de modelagem. Esse modelo de escolha discreta que representa a escolha de rota e modo no Tranus é um modelo *logit* multinomial baseando em um custo generalizado com *overlapping* e escalado através das formulações:

$$P_{ijp}^{ks} = \frac{\exp(-\gamma^s \tilde{c}_{ijp}^{ks})}{\sum_p \exp(-\gamma^s \tilde{c}_{ijp}^{ks})} \quad (14)$$

$$\tilde{c}_{ijp}^{ks} = \frac{\hat{c}_{ijp}^{ks}}{(\min_p \hat{c}_{ijp}^{ks})^{\theta^s}} \quad (15)$$

Em que:

P_{ijp}^{ks} : Probabilidade de escolha da rota p de i a j pelo modo k e categoria s ;

γ^s : Fator de dispersão do modelo *logit*;

\tilde{c}_{ijp}^{ks} : Custo generalizado com *overlapping* e escalado da rota p de i a j pelo modo k

e categoria s ;

\hat{c}_{ijp}^{ks} : Custo generalizado com *overlapping* da rota p de i a j pelo modo k e categoria s ;

θ^s : Fator de escala do modelo *logit*.

Dentro do modelo aninhado existente no Tranus, existem dois níveis de escolha, os quais ele denomina, em seus manuais, de escolha de modo e escolha de caminhos. Na formulação utilizada para essa simulação não foi utilizada a escolha no primeiro nível, apenas no nível de escolha de caminhos, na qual é possível realizar a escolha conjunta de operadores e rotas. Os denominados operadores para esse sistema são justamente os modos de transporte público STCO, STPC, Metrô e Trem.

O fator de *Path Overlapping* é o responsável por punir a repetição de *links* e seu padrão é numericamente igual a um, esse dado não foi alterado para a simulação. Quanto ao γ^s , ele representa a elasticidade da escolha cos conjuntos de moda e rota, quanto maior a elasticidade for, mais concentrada estará as probabilidades nas rotas mais atrativas. O valor utilizado para a simulação foi baseado no valor calibrado para Fortaleza na análise de Sousa (2016).

Quanto ao fator θ^s , responsável pelo escalonamento dos custos, seu valor padrão no Tranus é igual a um, que significa relativizar todos os custos em função do custo mínimo, que assume o valor de 1. Optou-se aqui, por utilizar o modelo *logit* puro, sem usar o escalonamento, ou seja, com valor de θ^s igual a zero.

Com o modelo *logit* pronto, foram alocados fluxos para os três cenários propostos para o TransCAD, resultando nos dados dispostos na Tabela 7.

Tabela 7 – Carregamento das linhas para os cenários propostos

Linha	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3
313	16.2%	28.2%	0.0%
109	36.7%	63.9%	106.9%
1244	33.8%	58.0%	139.3%
328	42.2%	72.5%	174.1%
1242	1.0%	1.8%	9.6%
158	7.4%	12.9%	64.1%

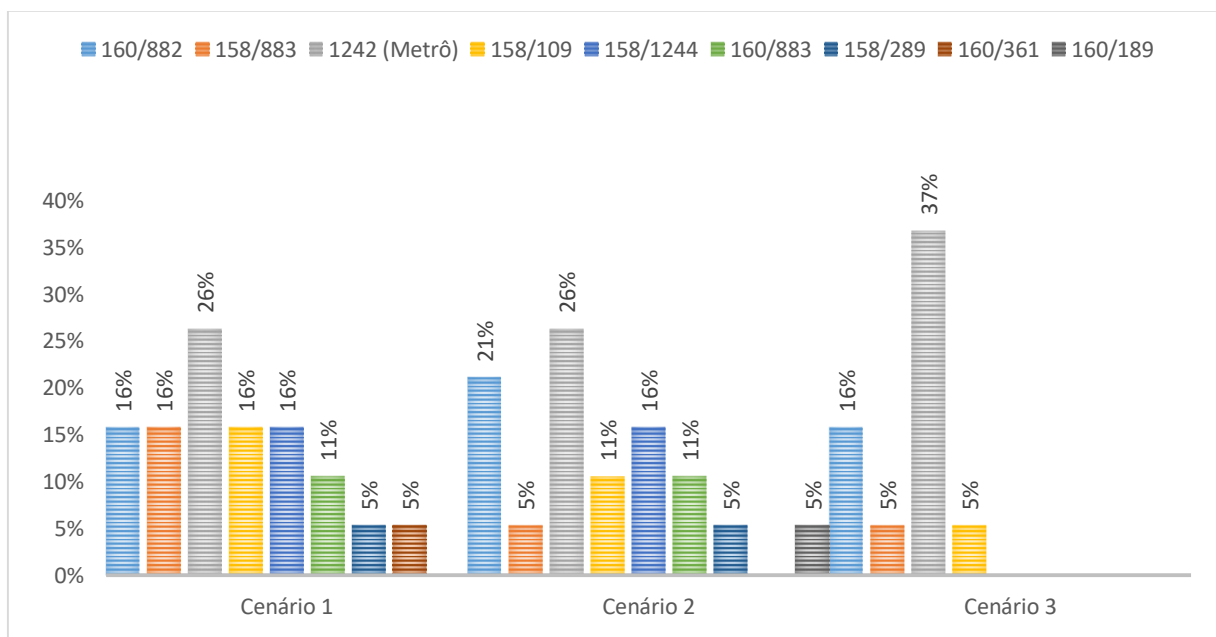
Fonte: Elaborado pelo Autor

4.7 Comparação dos Métodos de Alocação

Como exposto nos tópicos 4.5 e 4.6 deste trabalho, os fluxos de pessoas foram alocados em três cenários para os dois modelos em análise, gerando diferentes resultados, que expõem vantagens e limitações dos modelos.

O Gráfico 4 como as probabilidades de escolha se distribuíram nos três cenários do TransCAD, com a linha sul do metrô (1242) concentrando a maior parte do fluxo.

Gráfico 4 – Distribuição das probabilidades por cenário no TransCAD



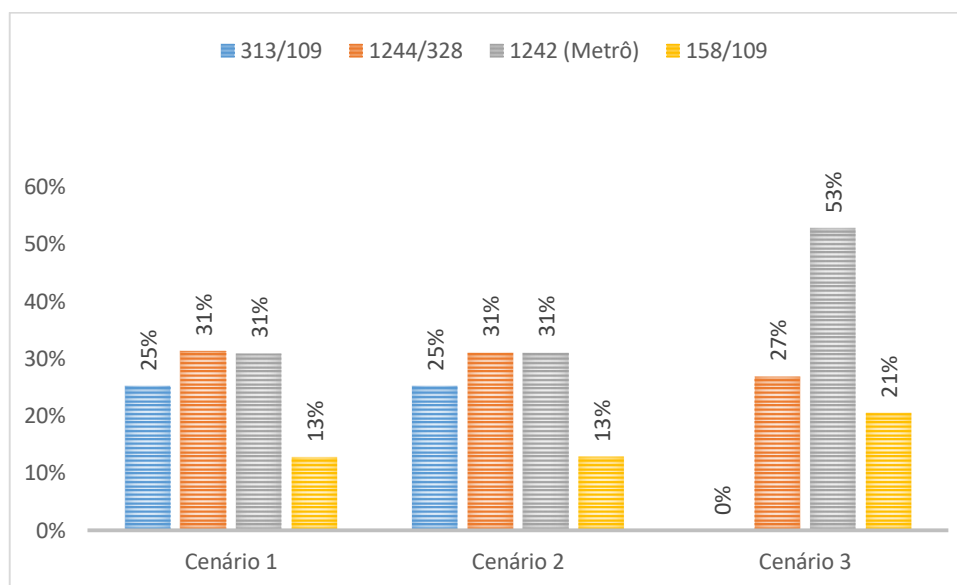
Fonte: Elaborado pelo Autor

Observa-se um aumento de probabilidade de escolha do metrô com o aumento do fluxo, algo que era esperado, uma vez que o metrô é um transporte de alta capacidade, podendo transportar mais de dez vezes a quantidade de passageiros de um ônibus e não tem seu tempo de viagem muito impactado pela função BPR, uma vez que, mesmo concentrando 37% do fluxo no cenário 3, a razão volume sobre capacidade para essa linha fica em torno de 7%.

Como resultado das alocações de conjunto rota/modo, o Gráfico 5 mostra como as probabilidades de escolha se distribuíram nos três cenários do Transus, com a linha sul do metrô (1242) também concentrando a maior probabilidade de escolha nas três simulações. Aqui, a concentração de probabilidades foi maior do que no TransCAD, chegando a 53% no cenário 3. Isso deve-se a elasticidade do modelo *logit* e deve-se também ao menor número de opções consideradas pelo Transus. É importante frisar, no entanto, que mesmo com a possibilidade de

permitir gerar mais opções de conjunto modo/rota no Tranus, as demais rotas não se tornam muito atrativas devido à ferramenta de *Overlapping Control* e, portanto, não recebem um fluxo alto. Deve ser considerado também que, em comparação ao número de rotas geradas pelo TransCAD, fenomenologicamente, não é tão usual que o tomador de decisão considere tantas opções ou que considere opções muito semelhantes como escolhas distintas.

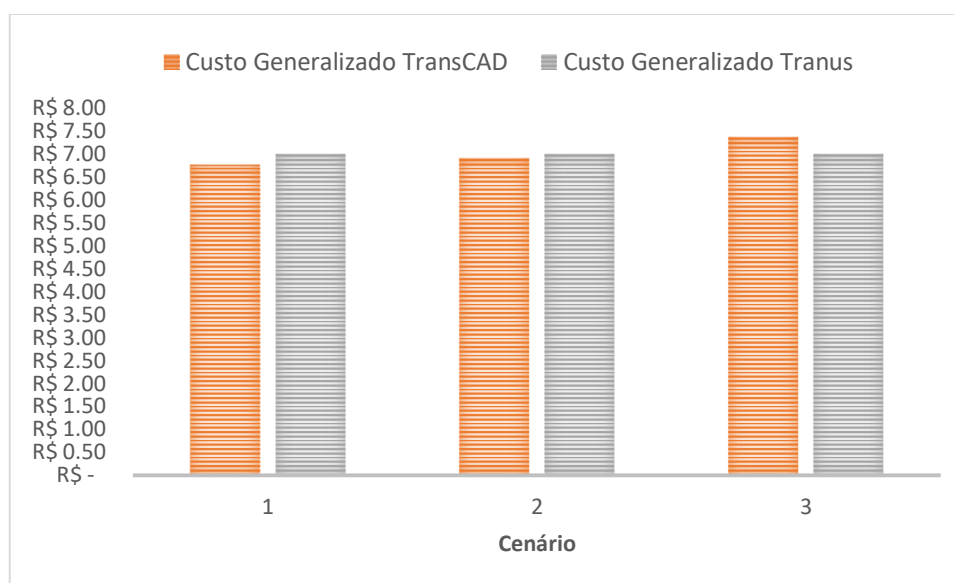
Gráfico 5 – Distribuição das probabilidades por cenário no Tranus



Fonte: Elaborado pelo Autor

Quanto aos custos de viagem, foram observadas pequenas diferenças nos custos do melhor caminho do TransCAD e no do Tranus, essas diferenças foram atribuídas ao mecanismo de construção de rotas. Os valores estão comparados no Gráfico 6, mas é importante ressaltar que esses valores são relativos ao custo generalizado do Tranus sem o fator de *Overlapping*, ou seja, não é o custo considerado na formulação dos modelos de escolha discreta do Tranus.

Gráfico 6 – Evolução dos custos generalizados para o melhor caminho



Fonte: Elaborado pelo Autor

Na análise dos valores, observou-se que havia sempre um aumento nos custos para as rotas do TransCAD com o aumento do fluxo OD, o que faz sentido para as rotas de ônibus, mas não tanto para a linha de metrô, uma vez que a demanda por ela continua muito abaixo da capacidade. Ao se analisar mais cuidadosamente essa linha, percebeu-se que o aumento de custos em todas as rotas se devia ao fator de *Dwelling Time*, que impõe um aumento de 0,42 segundos para cada embarque e 0,48 segundos para cada desembarque, valores que, se comparados a valores coletados em campo, são baixos, mas que não podem ser aplicados diretamente em uma linha de metrô, uma vez que o atendimento do metrô acontece de maneira diferente. O Transus reconhece o metrô como uma opção de modo diferente e permite que a formulação seja diferente em vários aspectos, incluindo o *Dwelling Time*, mas não se observou o impacto dele na alocação, o que pode ter ocorrido pela não utilização de todos os parâmetros de composição do custo e esse fator, que não foi identificado nas formulações, estar sendo incorporado juntamente a algum dos fatores não utilizados.

O custo generalizado do melhor caminho para o Transus se manteve constante em R\$ 7,00, não sofrendo impacto com o aumento da demanda. Verificou-se que para as demais rotas, o impacto do aumento do fluxo no tempo de espera foi alto, com aumentos de até 20 minutos, ratificando o funcionamento da equação de aumento do tempo de espera na parada.

5 CONCLUSÃO

O presente trabalho analisou os modelos de rede de transporte público do TransCAD e do Tranus na perspectiva de representar a cidade de Fortaleza, identificando as dificuldades existentes no processo de modelagem e as limitações dos modelos. Essa análise permitiu realizar a modelagem da rede de transporte público de Fortaleza nos dois *softwares* e, através de alguns cenários de alocação, permitiu verificar a adequabilidade dos métodos para representação das decisões de viagem.

A aplicação se deu apenas para o cenário de transporte urbano de Fortaleza, logo existiu uma uniformidade das tarifas. Nesse cenário o metrô representou apenas mais uma alternativa de transporte urbano, mas sem fazer parte da integração temporal existente na cidade.

Constatou-se, quanto à criação de rotas atrativas, que não existe uma função para penalizar a sobreposição de alternativas (*overlapping*) no TransCAD nem um limitante para criação de rotas. Em contraponto, o Tranus apresenta ferramentas de *Overlapping Control* e o número de caminhos a serem considerados é um *input* do modelo. Ainda sobre as rotas criadas pelo TransCAD, este não apresenta nenhuma ferramenta que facilite a identificação das rotas utilizadas, restando ao analista a opção de tentar reconstruí-las sem garantias de precisão.

A estrutura de entrada de dados para o TransCAD não permite diferentes parâmetros para diferentes modos, enquanto o Tranus apresenta uma série de parâmetros a esse nível. Esse tipo de configuração levanta a interpretação de que o TransCAD não apresenta uma rede multimodal, uma vez que existe grande dificuldade em representar as diferenças operacionais entre os modos como, por exemplo, a configuração de um *Dwelling Time* diferente para as linhas de metrô.

A rede de transporte público existente no TransCAD é uma rede diferente da rede de transportes motorizados individuais, dificultando, assim, a análise da problemática da acessibilidade e mobilidade para a cidade de Fortaleza. Esse contexto, além de impedir uma integração universal dos modos de transportes também dificulta a utilização de funções de desempenho da oferta que traduzam o congestionamento da via. O *software* apresenta uma função do tipo BPR para penalizar o custo generalizado com o aumento da relação demanda e capacidade, mas essa função é aplicada para a demanda de passageiros em função da capacidade

da linha de ônibus, uma aplicação totalmente diferente da proposição inicial da utilização dessa função e sem qualquer justificativa para o uso.

A rede no Tranus, por sua vez, é multimodal e integrada, permitindo que o modelador controle as possibilidades e custos de transferências entre os modos. Com a utilização de uma mesma rede para todos os modos, o Tranus incorpora efeitos de congestionamento para todos os modos concorrentes daquele espaço, se mostrando, assim, um modelo de rede mais adequado para representação de uma realidade tão complexa como a de Fortaleza.

Quanto a aplicação do projeto de experimento, constatou-se que a modelagem com a utilização de escolha discreta no Tranus apresenta diversas vantagens em comparação ao modelo de equilíbrio estocástico do usuário implementado no TransCAD. Primeiramente, analisando quanto a perspectiva de representação de decisões do usuário, a formulação conjunta de rota e modo se aproxima mais das opções consideradas pelo tomador de decisão. Além disso, a formulação é flexível para uma calibração em diferentes níveis em um modelo aninhado, permitindo uma melhor representação da realidade. Outro aspecto a ser considerado é que a composição da função de custos no Tranus permite incorporar características peculiares de cada modo, de cada categoria de pessoas e de cada tipo *link*, podendo, assim, melhor representar o fenômeno. Constatou-se, assim, que o método de alocação com o modelo *logit nested multinomial* do Tranus é um método mais adequado para representar as viagens na cidade de Fortaleza.

Como recomendações técnicas, destaca-se que o Tranus se apresentou como uma plataforma mais adequada para representações de redes multimodais integradas de transporte público, mas que possui uma formulação complexa com uma gama de parâmetros a serem calibrados e validados. Recomenda-se, em especial, uma análise mais detalhada quanto a composição do custo para verificar se os custos relacionados a embarques e desembarques estão sendo considerados em algum momento. Outra questão a se verificar é em que parte da formulação o parâmetro *Path ASC* está sendo incorporado nas formulações.

No caso da utilização do modelo do TransCAD, recomenda-se tentar incorporar o nível de serviço das vias pelas quais as rotas passam, diminuindo, por exemplo, a velocidade média de rotas que passam por trechos congestionados na rede de transportes motorizados individuais. Recomenda-se, também, uma análise mais detalhada de como estão sendo construídos os caminhos atrativos considerados no método de alocação, uma vez que esse algoritmo de construção não é bem explicitado e dificulta a interpretação fenomenológica que essa etapa representa.

REFERÊNCIAS

AHUJA, R. K.; MAGNANTI, T. L. e ORLIN, J. B. **Network Flows: Theory, Algorithms and Applications**. Prentice-Hall, NJ, 1993.

ARCE, DETRAN/CE, METROFOR e SEINFRA. **Relatório Final de Transporte Metropolitano – Modelo de Operação e Delegação**. Fortaleza, 2012.

ANDRADE, B. R. **Compreensão da problemática da periferização por segregação involuntária no planejamento da acessibilidade e mobilidade de Fortaleza**. Dissertação de Mestrado, Programa de Mestrado em Engenharia de Transportes, Universidade Federal do Ceará. Fortaleza, 2016.

BATISTA, J. F. **Alternativas de Redes Multimodais para o Transporte Público da Zona Oeste da Região Metropolitana de Fortaleza**. Dissertação de Mestrado, Programa de Mestrado em Engenharia de Transportes, Universidade Federal do Ceará. Fortaleza, 2002.

BORNDÖRFER, R.; GRÖTSCHER, M. e LÖBEL, A. **Optimization of transportation systems**. Technical Report SC 98-09, ZIB Berlin, 1998.

CALIPER. **TransCAD - Transportation Workstation Software, User's Guide – Travel Demand Modeling, Version 6.0 for Windows**. Caliper Corporation, Newton, USA, 2013.

CASCETTA, E. **Transportation Systems Analysis**. Second ed. Boston, MA: Springer US, 2009. v. 29

DE LA BARRA, T. **Integrated land use and transport modelling: Decision chains and hierarchies**. New York, USA: Cambridge University Press, 1989. v. 1

EULER, L. **Solutio Problematis Ad Geometriam Situs**. Commentarii academiae scientiarum Petropolitanae 8, 1741, pp. 128-140

FERRAZ, A. C. P. e TORRES, I. G. E. **Transporte Público Urbano**. RiMa, 2ª edição, São Carlos, SP. 2004.

HENRIQUE, C. S. **Diagnóstico Espacial da Mobilidade e da Acessibilidade dos Usuários do Sistema Integrado de Transporte de Fortaleza.** Dissertação de Mestrado, Programa de Mestrado em Engenharia de Transportes, Universidade Federal do Ceará. Fortaleza, 2004.

IBGE (2010) Fortaleza - **Base de informações por setor censitário da área urbana dos distritos-sede** - Censo demográfico 2010.

LIMA, L. S. **Espraçamento Urbano por Autossegregação e seus Impactos na Acessibilidade Urbana de Fortaleza.** Dissertação de Mestrado, Programa de Mestrado em Engenharia de Transportes, Universidade Federal do Ceará. Fortaleza, 2017.

MAIA, C. A. **Modelagem de redes multimodais integradas de transporte público: discussão conceitual e aplicada.** Dissertação de Mestrado, Programa de Mestrado em Engenharia de Transportes, Universidade Federal do Ceará. Fortaleza, 2013.

MODELÍSTICA. **User Manual : Models and report-generating programs of TRANUS Manual.** Caracas, Venezuela, 2014.

MODELÍSTICA. **Mathematical Description of TRANUS.** Caracas, Venezuela, 2012.

MTE – **Relatório Anual de Informações Sociais.** Brasil, 2015.

NEWTON, M. E. J. **Networks: An Introduction.** Oxford University Press, NY, US, 2010.

OPPENHEIM, N. **Urban Travel Demand Modeling: From individual choice to General equilibrium.** Wiley Interscience Publication. 1995.

ORTÚZAR, J. DE D.; WILLUMSEN, L. G. **Modelling Transport.** 4th Edition ed. West Sussex, UK: Wiley, 2011.

SOUSA, F. F. L. M. **Metodologia de calibração para modelos integrados dos transportes e uso do solo.** Dissertação de Mestrado, Programa de Mestrado em Engenharia de Transportes, Universidade Federal do Ceará. Fortaleza, 2016.

UFC; PMF. **Modelagem no Apoio à Decisão no Planejamento, Operação e Gestão dos Sistemas de Transporte Público e de Circulação Viária de Fortaleza.** Fortaleza, 2016.

VASCONCELLOS, S.C. e BALASSIANO, R. **An integration proposal to the transport system of the city of Rio de Janeiro.** CODATU XI, Bucarest, 2004.