

UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

Katarini Wanini Gonçalves de Araújo

PLANEJAMENTO DE REDE DE TRANSPORTE URBANO E OS CENTROS ATRADORES
DE VIAGENS: UMA PERSPECTIVA DE OTIMIZAÇÃO BASEADA EM REDES DE PETRI

Recife
2018

Katarini Wanini Gonçalves de Araújo

PLANEJAMENTO DE REDE DE TRANSPORTE URBANO E OS CENTROS ATRADORES
DE VIAGENS: UMA PERSPECTIVA DE OTIMIZAÇÃO BASEADA EM REDES DE PETRI

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil do Centro de Tecnologia e Geociências (CTG) da Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Área de concentração: Transportes e gestão das infraestruturas urbanas.

Orientador: Prof. Dr. Maurício Oliveira de Andrade.

Co-orientador: Prof. Dr. Ricardo Massa Ferreira de Lima.

Recife
2018

Catálogo na fonte
Bibliotecária Valdicéa Alves, CRB-4 / 1260

A663p Araújo, Katarini Wanini Gonçalves de.
Planejamento de rede de transporte urbano e os centros atratores
de viagens: uma perspectiva de otimização baseada em redes de Petri.
Katarini Wanini Gonçalves de Araújo - 2018.
151folhas, Il., Tab. e Abr.Sigl.

Orientador: Prof. Dr. Maurício Oliveira de Andrade.

Co-orientador: Prof. Dr. Ricardo Massa Ferreira de Lima.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG.
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental, 2018.
Inclui Referências e Apêndices.

1. Engenharia Civil. 2. Análise de desempenho. 3. Transporte público.
4. BRT. 5. Redes de Petri. 6. Simulação. I. Andrade, Maurício Oliveira de
(Orientador). II. Lima, Ricardo Massa Ferreira de (Coorientador). III. Título.

UFPE

624 CDD (22. ed.)

BCTG/2018-90



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

A comissão examinadora da Defesa de Dissertação de Mestrado

**PLANEJAMENTO DE REDE DE TRANSPORTE URBANO E OS CENTROS
ATRADORES DE VIAGENS: UMA PERSPECTIVA DE OTIMIZAÇÃO
BASEADA EM REDES DE PETRI**

defendida por

Katarini Wanini Gonçalves de Araújo

Considera a candidata APROVADA

Recife, 07 de fevereiro de 2018

Prof. Dr. Maurício Oliveira de Andrade – Orientador - UFPE
Prof. Dr. Ricardo Massa Ferreira Lima – Coorientador - UFPE

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Maurício Oliveira de Andrade
(Orientador)

Dr. César Augusto Lins de Oliveira – UFPE
(examinador externo)

Prof. Dr. Enilson Medeiros dos Santos – UFRN
(examinador interno)

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, sou grata a Deus por ter me proporcionado a força e o discernimento para chegar até aqui. Aos meus pais e ao meu irmão pelo apoio e por sempre acreditarem na minha capacidade. A Edwilson pelo companheirismo e paciência em todos os momentos.

Agradeço ao meu orientador, Professor Maurício, por toda a contribuição à minha formação e por ter encarado este desafio junto comigo. Agradeço especialmente ao meu coorientador, Professor Ricardo, e a César, pela disponibilidade em compartilhar seus conhecimentos, que foram fundamentais para o desenvolvimento deste trabalho.

Agradeço a todos os professores que, através de suas aulas na pós-graduação em Engenharia Civil - Transportes, contribuíram para nesta realização, Professora Maria Leonor, Professor Leonardo, Professor Anderson, Professor Oswaldo, Professor Anísio.

Agradeço a Cecília, Jonathan, Célio e Ricardo pela ajuda na pesquisa de campo e coleta de dados essenciais para este trabalho.

Agradeço, também, às secretárias da pós-graduação em Engenharia Civil, Clau, Cleide e Andrea pela competência e pela cordialidade com que sempre me trataram.

Por fim, agradeço aos colegas pelos bons momentos nas aulas e pelos momentos de descontração. E a toda a minha família e meus amigos que sempre me incentivaram.

RESUMO

Esta dissertação tem como objetivo o desenvolvimento de uma ferramenta de análise de desempenho e otimização para linhas de transporte público que atendem a centros atratores de viagens (CAVs). Esses locais da cidade correspondem aos nós mais densos da rede de transporte urbano, devido à intensa demanda de viagens. A ferramenta deve avaliar a linha em relação aos principais aspectos de qualidade, do ponto de vista dos usuários: confiabilidade do serviço, conforto e tempo de viagem. O tema abordado é justificado pelo fato de que a melhoria nos sistemas de transporte público é essencial em quaisquer estratégias que visem melhorar a mobilidade urbana. A análise de desempenho permite ao planejamento dos transportes identificar pontos positivos e negativos da operação e avaliação do impacto de possíveis intervenções. Foram realizadas pesquisas bibliográficas, que indicaram as variáveis a serem testadas e o modelo adequado para a análise, e coleta de dados em campo. Foi, então, elaborado um modelo de simulação em redes de Petri estocásticas generalizadas utilizando-se o software timeNET. O modelo foi aplicado à linha BRT 1976 – Pelópidas (PCR), que atende ao principal CAV da Região Metropolitana do Recife, o centro do Recife. O modelo demonstrou ser efetivamente capaz de representar o comportamento do sistema, apresentando elevado poder de explicação. Foi considerado nesta análise o horário de pico da manhã, para o qual os resultados sugerem que a linha apresenta desempenho satisfatório, no entanto, há possibilidade de otimizar o tempo de viagem. A linha alcança 24,70 km/h, no sentido subúrbio-cidade, que apresenta maior demanda, e 29,15 km/h, no sentido cidade-subúrbio. A avaliação de cenários indica que o principal impedimento para que a linha atinja uma velocidade operacional ainda maior é a quantidade de semáforos na área central, além da ausência de faixa exclusiva para os coletivos. No que se refere à confiabilidade e ao conforto, simulou-se a operação com diferentes frequências e comprovou-se que a frequência atual, de 6 minutos, garante a qualidade do serviço. A partir deste estudo, conclui-se que o uso de redes de Petri pode agregar ao estudo dos transportes meios formais de modelagem matemática simples e útil para verificação do comportamento de sistemas frente a modificações operacionais ou físicas. Testes que seriam impraticáveis no sistema real podem ser exaustivamente repetidos com diversas configurações diferentes com o auxílio do modelo.

Palavras-chave: Análise de desempenho. Transporte público. BRT. Redes de Petri. Simulação.

ABSTRACT

This dissertation aims at the development of a performance analysis and optimization tool for public transport lines that serve travel generation hubs (TGHs). These places of the city correspond to the denser nodes of the urban transport network, due to the intense trip demand. The tool should evaluate the line in relation to the main aspects of quality from the point of view of users: service reliability, comfort and travel time. The issue addressed is justified by the fact that improvement in public transport systems is essential in any strategy aimed at improving urban mobility. Performance analysis allows transport planning to identify positive and negative aspects of the operation and evaluate the impact of possible interventions. We carried out bibliographic research, which indicated the variables to be tested and the proper model for the analysis, and data collection in the field. A simulation model was then developed in generalized stochastic Petri nets using the timeNET software. The model was applied to the BRT line 1976 - Pelópidas (PCR), which serves the main TGH of the Metropolitan Region of Recife, the Recife downtown. The model showed to be effectively able to represent the behavior of the system, presenting high explanation power. In this analysis, the morning peak hour was considered, for which the results suggest that the line presents a satisfactory performance, however, it is still possible to optimize the travel time. The line reaches 24.70 km/h, in the suburb-city direction, which presents greater demand, and 29.15 km/h, in the city-suburb direction. The scenario assessment indicates that the main impediment for the line to reach an even higher operational speed is the number of traffic lights in the central area, in addition to the absence of an exclusive bus lane. Regarding reliability and comfort, the operation was simulated with different frequencies and it was verified that the current frequency, of 6 minutes, guarantees the quality of the service. From this research, it is concluded that the use Petri nets can add to transport studies formal means of simple and useful mathematical modeling to verify the behavior of the systems facing operational or physical changes. Tests that would be impractical in the real system can be extensively repeated with several different configurations with the aid of the model.

Keywords: Performance analysis. Public transport. BRT. Petri nets. Simulation.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Rede radial, à esquerda, e rede radial modificada, à direita.....	44
Figura 2 - Rede tipo grelha, à esquerda, e rede híbrida, à direita.	45
Figura 3 - Rede radial com linhas tronco alimentadas.....	46
Quadro 1 - Resumo da literatura sobre qualidade percebida pelos usuários do transporte público	49
Figura 4 - Representação gráfica de um grafo direcionado e valorado	56
Figura 5 - Sistema de filas.....	57
Figura 6 - Representação gráfica padrão de uma rede de Petri	70
Figura 7 - Estado do sistema com a transição t_1 habilitada, à esquerda, e após do disparo de t_1 , à direita.....	71
Figura 10 - Mapa da RMR	81
Figura 11 - Regiões Politico Administrativas do Recife.....	83
Figura 12 - Rede de transporte urbano da RMR.....	85
Figura 13 - Apresentação dos subtrechos percorridos pela linha 1976 - T.I. Pelópidas (PCR)...	89
Figura 14 - Subtrecho a.....	90
Figura 15 - Subtrecho b.....	90
Figura 16 - Subtrecho c.....	91
Figura 17 - Subtrecho d.....	92
Figura 18 - Subtrecho e.....	92
Quadro 2 - Segmentos utilizados na modelagem	97
Figura 19 - Parte do modelo GSPN elaborado	99
Quadro 3 - Nível de ocupação do veículo.....	101
Gráfico 1 - Comparativo entre os valores observados e os valores gerados pelo modelo	105

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Razão entre população e o número de empresas nos municípios da RMR	82
Tabela 2 - Razão entre número de empresas e população por RPA	84
Tabela 3 - Velocidade operacional projetada para o Corredor Norte/Sul	87
Tabela 4 - Matriz Origem-Destino por município da RMR na parte da manhã no corredor Norte-Sul	88
Tabela 5 - Atrasos causados pelas condições do tráfego de linhas de ônibus	95
Tabela 6 - Caracterização do percurso da linha 1976 - T.I. Pelópidas (PCR).....	95
Tabela 7 - Cálculo da taxa de chegada e probabilidade de desembarque por segmento	102
Tabela 8 - Cálculo do tempo de viagem entre os segmentos e do tempo de permanência em cada segmento.....	103
Tabela 9 - Comparativo entre os valores observados e os valores gerados pelo modelo	104
Tabela 10 - Conforto na situação atual.....	106
Tabela 11 - Velocidades na situação atual	107
Tabela 12 - Ocupação média e tempo médio de espera de acordo com o headway	109
Tabela 13 - Nível de serviço de acordo com o headway.....	110
Tabela 14 - Cálculo dos tempos de permanência nas estações E0 e E8 no cenário 1	111
Tabela 15 - Cálculo dos tempos de permanência dos segmentos 1, 3 e 9 no cenário 1.....	112
Tabela 16 - Velocidades no cenário 1	112
Tabela 17 - Tempo em movimento – cenário 2.....	113
Tabela 18 - Velocidades no cenário 2.....	114
Tabela 19 - Tempo em deslocamento – cenário 3	115
Tabela 20 - Velocidades no cenário 3.....	116
Tabela 21 - Tempo em deslocamento – cenário 4	117
Tabela 22 - Velocidades no cenário 4.....	117

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

BRT	Bus Rapid Transit
CAV	Centro Atrator de Viagens
CPN	Redes de Petri Coloridas
CTM	Consórcio de Transporte Metropolitano
CTMC	Cadeia de Markov de Tempo Contínuo
DTPN	Redes de Petri Temporizadas Determinísticas
EMTU/Recife	Empresa Metropolitana de Transportes Urbanos do Recife
GSPN	Redes de Petri Estocásticas Generalizadas
ISS	Imposto Sobre Serviços de Qualquer Natureza
MC	Cadeia de Markov
PCR	Prefeitura da Cidade do Recife
PL	Programação Linear
PO	Pesquisa Operacional
RdP	Redes de Petri
RG	Gráfico de alcançabilidade
RMR	Região Metropolitana do Recife
ROW	<i>Right of Way</i> (prioridade de passagem)
RPA	Região Político-Administrativa
RS	Conjunto de alcançabilidade
RTPU	Rede de Transporte Público Urbano
SED	Sistema Dinâmico de Eventos Discretos
SEI	Sistema Estrutural Integrado
SPN	Redes de Petri Estocásticas
STCM	Sistema de Transporte Complementar Metropolitano
STPN	Redes de Petri Temporizadas Estocásticas
STPP/RMR	Sistema de Transporte Público de Passageiros da Região Metropolitana do Recife
T.I.	Terminal Integrado
TPU	Transporte Público Urbano
VLT	Veículo Leve sobre Trilhos

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	Justificativa.....	15
1.2	Objetivos da dissertação.....	18
1.2.1	Objetivo principal.....	18
1.2.2	Objetivos específicos.....	19
1.3	Limitações	19
1.4	Resumo da metodologia aplicada.....	20
1.5	Estrutura da dissertação	22
2	PLANEJAMENTO DE REDES DE TRANSPORTE	23
2.1	Conceitos de transporte público urbano.....	23
2.1.1	Principais modos de transporte público urbano	25
2.1.2	Transporte urbano rodoviário.....	26
2.1.3	Transporte urbano ferroviário	32
2.1.4	Transporte e Desenho Urbano.....	33
2.2	Principais elementos da rede de TPU	35
2.2.1	Linhas	35
2.2.2	Grau de prioridade nas vias.....	37
2.2.3	Pontos de Parada	38
2.2.4	Terminais de transporte público urbano	42
2.2.5	Tipos de redes de transporte público urbano	43
2.3	Medidas de qualidade em TPU	46
2.4	Modelos de simulação e otimização em transportes.....	49
2.4.1	Conceitos de Pesquisa Operacional.....	50
2.4.2	Modelos	52
2.4.3	Programação Linear.....	54
2.4.4	Teoria dos grafos.....	55
2.4.5	Teoria das filas	56
2.4.6	Simulação de modelos dinâmicos	59
2.4.7	Modelos de probabilidade.....	61
2.4.8	Métodos de estimação do intervalo de confiança.....	63

2.5	Considerações finais do capítulo	64
3	AS REDES DE PETRI	67
3.1	Redes de Petri e transporte	68
3.2	Formulação gráfica	70
3.3	Propriedades	71
3.4	Classes	73
3.5	Formulação matemática	75
3.6	Transições temporizadas em GSPN	76
3.7	Modelagem e simulação	79
4	CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE APLICAÇÃO DO ESTUDO	81
4.1	A região metropolitana do Recife	81
4.1.1	Importância da capital para a RMR	81
4.1.2	O principal CAV da RMR	82
4.2	Transporte urbano na RMR	84
4.2.1	Gestão e operação do serviço de transporte	84
4.2.2	Sistema BRT	85
4.3	Descrição do trecho em análise	87
5	METODOLOGIA	93
5.1	Primeira fase metodológica	93
5.1.1	Definição do modelo, variáveis e parâmetros de interesse	93
5.1.2	Confecção dos cenários para simulação	94
5.2	Segunda fase metodológica	95
5.2.1	Definição do objeto de estudo para aplicação do modelo	95
5.2.2	Procedimento de coleta de dados	96
5.3	Terceira fase metodológica	96
5.3.1	Descrição do modelo GSPN	96
5.3.2	Análise dos resultados	99
6	RESULTADOS E DISCUSSÃO	102
6.1	Dados coletados	102
6.2	Validação do modelo	104
6.3	Análise da situação atual	105

6.3.1	Confiabilidade	105
6.3.2	Conforto	105
6.3.3	Tempo de Viagem	107
6.4	Proposta de otimização para confiabilidade e conforto	109
6.5	Proposta de otimização para tempo de viagem	111
6.5.1	Cenário 1	111
6.5.2	Cenário 2	113
6.5.3	Cenário 3	115
6.5.4	Cenário 4	116
7	CONSIDERAÇÕES FINAIS	119
	REFERÊNCIAS	124
	APÊNDICE A – Planilha de coleta de dados de passageiros	133
	APÊNDICE B – Planilha de coleta de dados de tempo de viagem.....	134
	APÊNDICE C - Cálculo do embarque de passageiros por segmento	135
	APÊNDICE D – Cálculo do desembarque de passageiros por segmento	137
	APÊNDICE E - Cálculo dos dados de tempo de permanência por segmento....	139
	APÊNDICE F - Cálculo dos dados de tempo de aceleração por segmento	141
	APÊNDICE G - Cálculo dos dados de tempo de desaceleração por segmento..	143
	APÊNDICE H - Cálculo dos dados de tempo em velocidade constante por segmento	145
	APÊNDICE I – Modelo de simulação	147
	APÊNDICE J – Definição de cada elemento do modelo	148

1 INTRODUÇÃO

Dados da ONU (2014) mostram que aproximadamente 54% da população mundial vive em áreas urbanas. Países da América Latina e Caribe apresentam uma forte urbanização, com 80% de sua população vivendo em cidades. No Brasil, esse percentual é de 85% e a previsão para 2050 é que 91% da população brasileira viva em áreas urbanas. Segundo o IBGE (2010), em 1950 apenas 36% da população brasileira vivia em aglomerações urbanas. Esses dados mostram que o processo de urbanização das cidades brasileiras ocorreu de maneira rápida.

Em muitos casos, o aceleração processo de urbanização soma-se à falta de planejamento adequado, que acarreta uma série de dificuldades relativas à falta de desenvolvimento da infraestrutura necessária ou de implementação de políticas para garantir que os benefícios da vida urbana sejam equitativamente compartilhados. Com a maior parte da população mundial vivendo em cidades, as questões de transporte urbano são de extrema importância na busca pelo atendimento eficiente às necessidades de mobilidade e acessibilidade à cidade.

A rede de transporte público urbano é uma estrutura composta por nós e links, onde os nós representam os lugares e os links, a ligação entre esses pontos. Como cada localidade possui particularidades, a rede não é uma estrutura homogênea e contém nós e links com densidades diferentes dentro dessa hierarquia (RODRIGUE et al, 2013). Os Polos Geradores de Viagens, ou Centros Atratores de Viagens (CAVs), são locais que têm em comum o desenvolvimento de atividades em um porte e escala capazes de exercer grande atratividade sobre a população, produzindo um contingente significativo de viagens (REDE PGV, 2016). A partir dessas definições é possível constatar que os CAVs representam os nós mais densos e as vias em seu entorno, os links mais densos dentro do arranjo da rede de transporte urbano. Por sua importância na dinâmica urbana, esses locais requerem do planejamento dos transportes atenção redobrada.

O crescimento da demanda por transporte nas áreas urbanas e a oferta de serviços de transporte público de baixa qualidade têm como consequência o aumento das viagens de carro particular. Esse aumento gera um efeito cíclico, pois causa externalidades negativas, como congestionamentos, que tornam as redes de transporte urbano ainda menos eficientes e fazem com que mais usuários prefiram o transporte individual motorizado.

Redman et al (2013) explicam que a preferência por viagens de carro particular acontece porque, em geral, esse modo é visto como mais confortável e rápido em relação aos demais. Ressaltando a importância desses aspectos para a escolha modal das pessoas. Entretanto, o transporte público é considerado o modo mais sustentável e apropriado para atender à demanda dos centros urbanos, devido a fatores como economia de espaço físico e menor poluição do ar, em relação ao transporte individual motorizado (ISLAM et al, 2016; REDMAN et al, 2013). O desafio atual do planejamento da mobilidade urbana é, portanto, persuadir os usuários do carro a aderir ao transporte público ou modos não motorizados.

A ideia de que a oferta de infraestrutura viária não pode ser a única solução para atender à crescente demanda por mobilidade nas cidades, no contexto atual, é amplamente difundida na literatura nacional e estrangeira. Muitos estudos buscam, então, propor soluções para otimizar o uso das infraestruturas existentes, frequentemente por meio da implementação de políticas e estratégias de gestão de demanda. Essas ações visam à redução das viagens de carro particular, incentivando a população à mudança de comportamento para a escolha de modos de transporte mais sustentáveis, como os não motorizados e os transportes coletivos.

A melhoria do sistema de transporte público urbano é ponto comum em quaisquer formas de tratar os problemas de mobilidade nas cidades, e essa melhoria depende de um planejamento adequado e de uma operação eficiente das redes de transporte. O planejamento deve ser realizado de maneira contínua, utilizando meios de monitoramento, tanto da infraestrutura quanto da qualidade na operação dos serviços. Essa busca permanente pela melhoria do sistema, com o objetivo de que os processos ocorram da maneira mais eficiente possível pode ser chamada de otimização. O desempenho dos serviços de transporte público é fortemente influenciado por aspectos como os tipos de linhas, o nível de prioridade para os coletivos nas vias urbanas e a infraestrutura disponibilizada para embarque e desembarque de passageiros, como os pontos de parada e os terminais.

Considerando a necessidade latente de otimizar a qualidade do serviço de transporte público, a fim de amenizar o recorrente problema de mobilidade nas áreas urbanas onde a demanda por viagens é cada vez mais intensa, as questões que norteiam o presente estudo são:

- Como identificar e tratar os pontos críticos de uma linha de transporte público que atende a um CAV que prejudicam a qualidade do serviço, do ponto de vista dos usuários?
- Como medir o impacto de modificações em elementos operacionais na qualidade do serviço?

1.1 Justificativa

A atratividade do transporte público é resultado direto da qualidade do serviço ofertado. Investimentos na qualidade do serviço de transporte público são capazes de melhorar sensivelmente a mobilidade nas cidades. Uma vez que, além de beneficiar os usuários do transporte público, essa melhoria pode atrair usuários de carros, contribuindo para a redução de externalidades como poluição e congestionamentos, e melhorando a eficiência da rede.

O atendimento adequado dos transportes públicos aos CAVs é fundamental para a manutenção da dinâmica socioeconômica das cidades. Dado que esses locais podem centralizar equipamentos urbanos, atividades administrativas, comerciais, bancárias, de educação, saúde e de turismo, entre outras. A grande quantidade de deslocamentos direcionados aos CAV que, em geral, não possuem espaço suficiente para suprir a demanda de transportes particulares, causa impactos como congestionamentos, estacionamento irregular e dificuldades nas operações de carga e descarga. Por essa razão, nesses locais, a redução das viagens de carro é imprescindível.

O centro do Recife é o principal CAV da Região Metropolitana do Recife, uma área composta por 14 municípios e 3,90 milhões de habitantes (IBGE, 2016). O centro do Recife concentra atividades diversas e é local de trabalho de muitos pernambucanos. Com tantas atividades, a demanda de viagens diária é alta e o CAV não possui espaço suficiente para comportar a quantidade de automóveis, por isso, as vagas de estacionamento são limitadas. O sistema de transporte metropolitano prioriza o atendimento a esse CAV, disponibilizando linhas de metrô, BRT e ônibus convencionais, no entanto, essa é uma das áreas mais congestionadas de toda a RMR.

Posto que o ônibus é o modo de transporte público urbano mais popular e a opção mais efetiva para economias em desenvolvimento, a qualidade dos serviços dos ônibus é, então, de

extrema importância, pois disso depende a elegibilidade do serviço pelos usuários. A otimização operacional de uma linha troncal que atende a um CAV como o centro do Recife é, portanto, uma questão altamente relevante.

Islam et al (2016) explicam que o conceito de qualidade do serviço é amplamente reconhecido como uma ferramenta de análise de desempenho nas operações de engenharia de tráfego e transporte. É possível encontrar na literatura muitos trabalhos que visam medir a qualidade percebida pelos usuários de transporte público em diversas localidades. Essas pesquisas indicam os aspectos que os passageiros mais valorizam para a escolha do modo de viagem. A percepção de qualidade dos usuários varia de acordo com as características da cidade onde foi realizada o estudo, porém alguns fatores são comuns à maior parte das pesquisas: confiabilidade do serviço, rapidez e conforto (ISLAM et al, 2016; DE ONÃ et al, 2016; BARABINO; DI FRANCESCO, 2016; JAIN et al, 2014; TIRACHINI et al, 2013; BARABINO; DEIANA, 2013; REDMAN et al, 2013).

Tun et al (2017) consideram que fatores fundamentais para a qualidade do serviço, como confiabilidade e conforto, são fortemente influenciados pela velocidade operacional do sistema. Pois, um aumento na velocidade, significa que a frota de transporte público pode realizar mais ciclos por hora, aumentando a frequência do serviço e reduzindo o tempo de espera, o que melhoraria a confiabilidade do serviço. Um aumento na frequência, por sua vez, aumenta a capacidade do sistema (medida em número de passageiros por hora por sentido) e reduz a densidade de passageiros, resultando em viagens mais confortáveis.

As características físicas e operacionais de um sistema de transporte urbano refletem na qualidade do serviço ofertado. Dentre essas características destacam-se: frequência do serviço; grau de segregação física do corredor de transporte público; tipo de operação de embarque e desembarque; forma de pagamento de tarifa; nível de prioridade dos coletivos no ciclo semafórico; localização e espaçamento dos pontos de parada; e número de portas do veículo (ITDP, 2016). Observa-se, então, a importância de ferramentas de análise de desempenho que permitam medir a qualidade dos serviços de transporte, especialmente no que se refere a aspectos como confiabilidade, velocidade operacional e conforto. Além disso, o TRB (2013) indica que a análise de desempenho é essencial para medir o impacto dos tratamentos preferenciais e estratégias operacionais para o transporte público.

Ao longo do tempo, muitas estratégias têm sido adotadas para melhorar a qualidade dos transportes públicos por ônibus. Entre as mais amplamente difundidas podem-se citar a oferta de veículos maiores; o pagamento das tarifas com cartões, que reduzem os tempos de embarque; a implantação de faixas exclusivas para o transporte coletivo; a redução do desnível entre veículo e plataforma de embarque e desembarque; prioridade de passagem para os coletivos nas interseções sinalizadas; entre outros. Essas ações mostram uma evolução nos sistemas de transporte urbano por ônibus, com o surgimento, inclusive, do sistema BRT (*Bus Rapid Transit*), que engloba diversas medidas estratégicas que visam tornar o serviço mais confiável, confortável e rápido. Porém, apesar das melhorias notáveis, ainda há muita insatisfação por parte dos usuários (HIDALGO, 2017; HENSHER et al, 2014; PEREIRA et al, 2013).

A simulação é uma técnica bastante utilizada para o estudo de sistemas complexos, como os sistemas de transporte, pois permite reproduzir de maneira simplificada o funcionamento do sistema. Ng et al (2013) indicam que existem muitos modelos matemáticos que podem simular o comportamento de um sistema de transporte no tempo e no espaço. Modelos são normalmente usados para testar planos alternativos para os possíveis valores futuros das variáveis. Isto significa que o modelo pode ser executado muitas vezes a fim de examinar um problema específico. Esses problemas e, portanto, as formas de enfrentá-los, são dependentes do contexto. Os modelos podem oferecer uma contribuição em termos de identificação das dificuldades e seleção de maneiras sólidas de abordá-las (ORTÚZAR; WILLUMSEN, 2011).

De modo geral, sistema é um conjunto de elementos em interação que tem uma finalidade em comum. Pode ser um sistema estático, cujas propriedades descritivas não variam com o tempo, ou dinâmico, cujas propriedades variam no tempo. O estado de um sistema pode ser modificado por uma ocorrência chamada evento. Um modelo pode ser classificado como discreto, se a variável tempo for representada por um número inteiro não-negativo, ou o modelo pode ser contínuo, se o tempo for representado por um número real não-negativo e o sistema for governado por equações diferenciais. Di Febbraro et al (2016) consideram o sistema de transporte um sistema dinâmico de eventos discretos (SED), posto que se trata de um conjunto de elementos (pessoas, veículos, estruturas físicas) em interação, que mudam de

estado conforme eventos (embarque e desembarque, chegada e partida) que tem caráter discreto no tempo.

É possível encontrar diversas aplicações de simulação de SEDs em Redes de Petri, em áreas como produção industrial, informática e telecomunicações. As Redes de Petri (RdP), além de habilitarem o sistema a ser regido por um conjunto de equações, fornecendo assim um meio efetivo para análise, possuem representação gráfica simples, que não exige profundo conhecimento de teorias matemáticas, sendo extremamente prático na troca de informações entre os profissionais de áreas diferentes, como entre o modelador e os gestores de transporte. O estudo de uma RdP permite, ainda, avaliar a estrutura e o comportamento dinâmico do sistema modelado, e sua representação gráfica permite a visualização dos processos e da comunicação entre eles (PETRI, 1966; MURATA, 1989; YEN, 2006; NG et al, 2013).

No transporte urbano, as RdP tem sido aplicadas na modelagem, análise de desempenho e controle do sistema de tráfego urbano, abordando principalmente questões como coordenação semafórica e programação operacional de linhas de transporte metroviário. Os resultados demonstram sua habilidade de fornecer uma representação visual das redes e um equilíbrio entre poder de modelagem e capacidade de análise (TZES et al, 1996; DI FEBBRARO; SACCO, 2004; DI FEBBRARO et al, 2016; DEZANI, 2012; NG et al, 2013; WANG et al, 2016; GIGLIO; SACCO, 2016).

Em resumo, a justificativa do tema baseia-se nos seguintes argumentos: (i) necessidade de atendimento eficiente aos CAVs; (ii) importância da análise de desempenho no processo de planejamento para a identificação dos pontos críticos e possíveis propostas de otimização operacional para linhas de transporte público por ônibus; (iii) as RdP são uma ferramenta adequada para tal análise.

1.2 Objetivos da dissertação

1.2.1 Objetivo principal

Tendo em vista a compatibilidade, comprovada em pesquisa bibliográfica, das redes de Petri para análise de sistemas dinâmicos de eventos discretos, sua inteligibilidade e sua ainda

pequena utilização em estudos sobre transporte público urbano, o objetivo principal desta dissertação é desenvolver um modelo em rede de Petri que permita caracterizar o desempenho de linhas de transporte público, em relação a confiabilidade, conforto e tempo de viagem, e simular cenários com diferentes alternativas operacionais, como frequência, tipo de operação de embarque e desembarque, grau de segregação do corredor de ônibus e nível de prioridade em interseções sinalizadas.

1.2.2 Objetivos específicos

Para alcançar os resultados pretendidos buscar-se, adicionalmente, os seguintes objetivos específicos:

- Estudar as extensões de redes de Petri e avaliar qual a mais adequada para representar o comportamento de uma linha de transporte público.
- Validar o modelo por meio da sua aplicação a uma linha de transporte público da RMR.
- Identificar os pontos críticos da linha analisada, e quais medidas poderiam melhorar seu desempenho.
- Apresentação de um modelo de análise de desempenho de linhas de transporte público que poderia ser incorporado ao planejamento do sistema de transporte urbano, contribuindo para o monitoramento permanente da qualidade do serviço de transporte público. Visando, assim, um planejamento integrado voltado para a priorização do transporte coletivo e o atendimento eficiente aos usuários, principalmente nos nós mais densos da rede.

1.3 Limitações

O modelo proposto neste trabalho limita-se a analisar alguns aspectos de uma linha de transporte: confiabilidade do serviço, velocidade operacional média e conforto na viagem. Esses aspectos são apontados na literatura como tendo grande importância para que um sistema de transporte público seja considerado de boa qualidade, do ponto de vista dos usuários.

Diversos elementos operacionais podem influenciar os aspectos de qualidade sob estudo, porém, o modelo elaborado limita-se a verificar os efeitos de frequência, tipo de operação de embarque e desembarque, grau de segregação do corredor de ônibus e nível de prioridade em interseções sinalizadas.

1.4 Resumo da metodologia aplicada

Para alcançar os objetivos propostos foram utilizados métodos de Pesquisa Operacional, como teoria dos grafos, teoria das filas e simulação. A teoria dos grafos foi aplicada como forma de análise de desempenho do sistema através de grafos orientados valorados. Já a teoria das filas, foi aplicada para representar um sistema de transporte com tempos de chegada e de atendimento com distribuição exponencial, apenas um atendente, que seria o veículo, e uma limitação da capacidade de atendimento, que seria a capacidade máxima do veículo.

O modelo adequado para representar o sistema em estudo é classificado como dinâmico estocástico, visto que o sistema de transporte tem variáveis com características probabilísticas e que se modificam com o tempo. Esse tipo de modelo requer a simulação como ferramenta de análise. Para efeito de modelagem, define-se que o tempo tem caráter discreto. A rede de Petri (RdP) é uma ferramenta matemática que abrange os métodos supracitados, por isso esse foi o instrumento utilizado neste estudo.

Ao longo do tempo, surgiram diversas extensões de rede de Petri que contribuíram para enriquecer o paradigma original tanto na teoria quanto na aplicação. Entre as quais, ressaltam-se as definições de RdP com tempos estocásticos, que tornaram possível a avaliação de desempenho de sistemas, tradicionalmente baseada em abordagens estocásticas. Esses modelos, e seus desdobramentos, são coletivamente chamados de RdP estocásticas (SPN, do inglês *stochastic Petri Nets*). As redes de Petri estocásticas generalizadas (GSPN, do inglês *generalized stochastic Petri nets*), propostas por Marsan et al (1984), são uma extensão das SPN, na qual o tempo estocástico é misturado com tempos nulos determinísticos, de modo que tanto a evolução temporal quanto a evolução lógica do sistema podem ser descritas no modelo.

Entende-se, portanto, que as GSPN são o instrumento mais adequado para a modelagem proposta neste trabalho. A modelagem em GSPN foi feita utilizando-se o software timeNET (Technische Universität Ilmenau, 2015). Em seguida, o modelo foi aplicado a uma linha BRT que atende ao mais importante CAV da Região Metropolitana do Recife, o centro do Recife. A escolha de uma linha BRT ocorreu porque o sistema BRT surgiu com o objetivo de aproximar a operação do sistema por ônibus daquela obtida no transporte sobre trilhos, aumentando velocidade, confiabilidade e conforto.

Na RMR, há dois corredores BRT que foram implantados como parte dos projetos de mobilidade para a Copa do Mundo de 2014 e fazem parte do sistema de transporte metropolitano integrado. A linha selecionada para análise foi a linha BRT 1976 – Pelópidas (PCR), que circula no corredor BRT Norte—Sul e liga os municípios de Paulista e Olinda ao centro do Recife.

Para uma análise mais detalhada, o trecho do corredor por onde a linha passa, é dividido, conforme o projeto, em cinco subtrechos: (a) entre os terminais integrados Pelópidas Silveira e PE-015, em Olinda; (b) entre o terminal integrado PE-015 e a Estação Kennedy, na Avenida Pan Nordestina; (c) entre a Estação Kennedy e a Estação Tacaruna, na Avenida Cruz Cabugá, já na área central do Recife; (d) entre a Estação Tacaruna e a Estação 13 de Maio; e (e) trecho centro.

Cada subtrecho possui características distintas, sendo, os apenas dois primeiros segregados do tráfego comum, e os últimos operando junto com o tráfego geral. A coleta de dados aconteceu de duas maneiras: coleta em campo, para o cenário atual, e pesquisa bibliográfica, para o cenário otimizado. A coleta de dados verificou para cada conjunto de estações consecutivas i e j , as variáveis: tempos de permanência (tp), de aceleração (ta), a velocidade constante (tvc) e de desaceleração (tf). O horário de pico considerado nesta análise é entre 6h e 7h da manhã.

O objetivo do modelo é analisar se a velocidade operacional média da linha BRT 1976 é maior ou igual a 25 km/h, que é o padrão estabelecido por ITDP (2016) para que um sistema BRT seja considerado de qualidade adequada. Além disso, deve ser verificado se a velocidade atinge a média prevista no projeto original do corredor de transporte público. A confiabilidade do sistema deve ser medida a partir do tempo médio de espera na fila do ponto inicial da

linha. Já a avaliação do conforto deve classificar o nível de ocupação médio das viagens, conforme TRB (2013).

Após a modelagem da linha em relação a confiabilidade, velocidade e conforto, o modelo foi avaliado empiricamente através do confronto direto dos valores calculados com os observados. Verificada a efetividade do modelo, testou-se o comportamento do sistema em relação a modificações na frequência, no tipo de operação de embarque e desembarque, no grau de segregação do corredor de ônibus e no nível de prioridade em interseções sinalizadas. A partir dessas simulações foi possível apontar em que medida intervenções nesses elementos operacionais poderiam contribuir para otimizar a qualidade do serviço.

1.5 Estrutura da dissertação

Esta dissertação está estruturada em sete capítulos, e um conjunto de apêndices que mostram as planilhas de coleta de dados em campo, o cálculo dos dados de entrada no modelo; o modelo e o significado de seus elementos.

Depois desta introdução, apresenta-se, no Capítulo 2, uma revisão bibliográfica abordando temas como os modos e os elementos operacionais da rede de transporte público urbano, as principais medidas de qualidade do serviço de transporte e o efeito dos elementos operacionais sobre a qualidade do serviço. Ainda no Capítulo 2 são descritos os modelos disponíveis para otimização e simulação de sistemas de transporte público.

No Capítulo 3 são introduzidos os conceitos fundamentais para a análise em redes de Petri. Em seguida, o Capítulo 4 apresenta uma caracterização da área de aplicação do modelo a ser produzido ao longo deste trabalho. O Capítulo 5 explica as etapas metodológicas para elaboração, validação e análise dos resultados do modelo proposto.

O capítulo 6 mostra os resultados obtidos na aplicação do modelo e sua efetividade para análise de desempenho de linhas de transporte público. Finalmente, no capítulo 7 são apresentadas as conclusões deste estudo.

2 PLANEJAMENTO DE REDES DE TRANSPORTE

Por meio de revisão da literatura, este capítulo apresenta os principais conceitos de redes de transporte público urbano. Para isso, o capítulo está estruturado em cinco partes. Na primeira parte, são caracterizados os sistemas de transporte público urbano e os modos mais comuns. São introduzidos, também, os conceitos de forma e estrutura urbana e como se relacionam com as redes de transporte. A segunda parte desenvolve uma conceituação geral sobre os elementos das redes de transporte público urbano que são determinantes para sua qualidade. Em seguida, a terceira parte mostra os principais indicadores de qualidade do serviço de transporte público, do ponto de vista dos usuários, e a quarta parte apresenta os modelos de otimização que podem ser utilizados para tratar problemas de transportes. A parte final apresenta um resumo do que foi visto e introduz o capítulo seguinte.

2.1 Conceitos de transporte público urbano

Para Rodrigue et al (2013), os sistemas de transporte são compostos por um conjunto complexo de relações entre a demanda, os serviços locais e as redes que suportam esses movimentos. Esses sistemas dependem, principalmente, dos atributos operacionais do transporte, tais como custos, capacidade, eficiência, confiabilidade e velocidade. Atributos significativamente relacionados ao desenvolvimento das redes de transporte. Comumente, os sistemas de transporte são representados usando redes como uma analogia para sua estrutura e fluxos.

Em sua pesquisa, Tedesco (2008) refere-se a um sistema de transporte como um conjunto organizado de elementos, que interagem para alcançar um dado objetivo, que seria permitir que pessoas e bens se movimentem. Tal sistema é composto de elementos funcionais; atividades; atores envolvidos; e elementos físicos, como a infraestrutura. Deve-se considerar, ainda, fatores exógenos, independentes do processo de planejamento, que interferem no sistema de transporte, dentre esses fatores estão aspectos políticos, socioeconômicos e culturais; infraestrutura e materiais disponíveis e acessíveis; e aspectos morfoclimáticos.

Em suma, pode-se dizer que os sistemas de transporte são compostos por um conjunto complexo de relações entre os atores envolvidos (passageiros, operadores de transporte, órgão

gestor, governo, sociedade); elementos físicos (infraestrutura viária, terminais, estações, veículos); elementos operacionais (frequência do serviço, capacidade, eficiência, confiabilidade, velocidade) e as características do local onde é oferecido tal serviço (aspectos políticos, socioeconômicos, culturais e morfoclimáticos, infraestrutura e materiais disponíveis).

Atualmente, uma parte crescente da população mundial vive em cidades. Considerando esta tendência, as questões de transporte urbano são de extrema importância para atender à demanda de viagens em grandes aglomerações urbanas. Rodrigue et al (2013) apontam que o transporte em áreas urbanas é mais complexo por causa dos modos envolvidos, da multiplicidade de origens e destinos e da quantidade e variedade do tráfego. Conceitualmente, o sistema de transporte urbano está intrinsecamente relacionado com a forma urbana e a estrutura espacial das cidades. Tedesco (2008), no entanto, destaca que as relações de interdependência e complementaridade entre os diversos sistemas de transporte têm crescido e que as políticas para o setor devem ser abrangentes e considerar essas relações.

O transporte público urbano (TPU), também chamado transporte coletivo ou de massa, opera com rota e horários predefinidos. Enquadram-se nesta categoria modos como: ônibus, bonde, VLT, metrô, entre outros (FERRAZ; TORRES, 2004; VASCONCELLOS, 2005; VUCHIC, 2007). O TPU tem a finalidade de proporcionar mobilidade acessível ao público e sua eficiência é baseada em transportar um grande número de pessoas e alcançar economias de escala. O ambiente urbano é, portanto, particularmente adequado para o transporte público porque dispõe de condições fundamentais para a sua eficiência, ou seja, alta densidade e exigências significativas de mobilidade de curta distância (RODRIGUE et al, 2013).

Os sistemas de TPU nem sempre são capazes de atingir a eficiência pretendida. Em sua pesquisa, Paranhos (2011) ressalta que, sobretudo nos países em desenvolvimento, o transporte público enfrenta uma série de problemas, que incluem desde o mau planejamento e gerenciamento do sistema até a corrupção que extingue as verbas destinadas às melhorias do serviço. Esses obstáculos causam ineficiência, falta de confiabilidade, superlotação, desconforto e má utilização de recursos. Para o autor (ibid), uma configuração de rede de transporte público que leve em conta as principais necessidades dos usuários de acordo com

as possibilidades de uso do solo das cidades, pode contribuir para que o serviço de transporte público sofra sensíveis melhorias em sua operação.

Koizumi et al (2013) analisaram a relação entre indicadores socioeconômicos urbanos e padrões de transporte em cidades de países em desenvolvimento, mostrando que há dois fatores importantes para formular uma estratégia de TPU. Um dos fatores-chave é considerar a fase de desenvolvimento socioeconômico da cidade para identificar que sistema tem custo compatível. Além disso, também deve ser analisado e refletido na estratégia, o padrão de mobilidade dessa cidade, como grau de uso de carro particular e divisão modal.

O transporte público urbano desempenha um papel fundamental no desenvolvimento de uma cidade, pois é através dele que grande parte da população se desloca para realizar as suas atividades econômicas. Paranhos (2011) aponta que as vantagens apresentadas pelo TPU em relação ao transporte individual são amplas, entre as quais: (i) benefícios econômicos; (ii) como permitir o melhor ordenamento da cidade, através do planejamento; (iii) utilizar menos espaço público nas vias para transportar uma quantidade maior de pessoas, consumindo assim menos recursos; (iv) contribuições com o meio ambiente e o bem-estar da população por meio da redução dos congestionamentos.

2.1.1 Principais modos de transporte público urbano

Neste trabalho, utiliza-se a classificação dos modos de transporte público urbano segundo sua prioridade nas vias ou ROW (do inglês *Right-of-Way*), indicada por Vuchic (2007), onde o ROW A significa operação em via segregada; o ROW B, em via parcialmente segregada, geralmente utilizando a faixa do meio; e o ROW C representa a operação em vias de tráfego misto.

Os modos de tráfego misto (também conhecidos como transporte de superfície) operam em ROW C, como ônibus, trólebus e bondes, que circulam junto com o tráfego geral e requerem baixo investimento. A qualidade dos serviços prestados, em especial no que se refere a velocidade e confiabilidade, depende diretamente do fluxo de trânsito. Visto que, essa categoria seja mais lenta do que o tráfego geral, o transporte público não consegue competir

efetivamente com os automóveis particulares, exceto no caso de haver outras medidas para conter o uso dos carros.

Os modos de transporte classificados como semirrápido utiliza principalmente o ROW categoria B. Esta classe inclui uma vasta gama de modos, como BRT, ônibus que operam em via segregada e VLT (Veículo Leve sobre Trilhos). Nessas condições de operação é possível, muitas vezes, utilizar veículos maiores, articulados ou biarticulados. Com isso, o desempenho destes modos depende muito do grau de segregação do tráfego comum.

Por fim, os modos de transporte rápido operam exclusivamente no ROW categoria A e apresentam alta velocidade, capacidade, confiabilidade e segurança. Esses modos utilizam tecnologias guiadas (ferroviário ou pneus de borracha), que permitem a alta capacidade e baixos custos operacionais e controle de semáforo automático (alta segurança). O principal exemplo dessa categoria são os metrô.

De forma mais ampla, os modos de transporte público urbano podem ser divididos em modos rodoviários e ferroviários. Os principais modos são caracterizados nas seções a seguir.

2.1.2 Transporte urbano rodoviário

Os modos rodoviários abrangem modos de tráfego misto, como ônibus e trólebus, e modos de transporte semirrápido, como ônibus que operam em via segregada e BRT. Vuchic (2007) ressalta que as características mais importantes dos modos de transporte rodoviário podem ser resumidas em três aspectos básicos: a habilidade de operar em praticamente qualquer via, o baixo custo de investimento (exceto para o modo BRT), e a capacidade limitada por veículo.

Como consequência da evolução da forma urbana, muitas cidades passaram por um processo de dispersão das suas atividades, ou espraiamento urbano, que tem provocado uma alteração das necessidades de mobilidade, nas últimas décadas. Este fato adicionado ao crescimento da demanda por velocidade, autonomia e flexibilidade, faz com que as redes e serviços de transporte precisem adaptar-se progressivamente aos novos padrões de viagens, especialmente a rede de transporte público rodoviário, que tem mais flexibilidade para absorver as mudanças (BADIA et al, 2016; RODRIGUE et al, 2013).

Atualmente, os ônibus representam a tecnologia de transporte mais amplamente utilizada no mundo. A cobertura espacial do transporte rodoviário nas áreas urbanas é extensa. Praticamente todas as cidades do mundo que tem serviço de transporte urbano, operam serviços de ônibus (BADIA et al, 2016; RODRIGUE et al, 2013; VUCHIC, 2007). O uso exagerado do transporte rodoviário, porém, traz problemas, como o crescimento significativo do consumo de combustível, o congestionamento e acidentes. (BADIA et al, 2016; RODRIGUE et al, 2013). Rodrigue et al (2013) destacam que o congestionamento rodoviário tornou-se uma característica da maioria das áreas urbanas em todo o mundo.

Em relação aos custos, Litman (2007) explica que o serviço de transporte público urbano rodoviário tende a ser mais barato do que o ferroviário, mas quando características de desempenho e conforto, tais como operação em via segregada, conforto nas estações e combustíveis alternativos, são adicionadas ao transporte por ônibus, os custos de capital desse sistema se aproximam dos do trilho.

As estradas têm uma hierarquia funcional, dependendo do papel que desempenham na rede. No topo da hierarquia estão as autoestradas, que tem acesso limitado e não possuem cruzamentos. Há também as vias arteriais que têm semáforos nos cruzamentos, obrigando os veículos a parar. As autoestradas e vias arteriais são alimentadas por vias coletoras e locais, que têm o objetivo de conectar atividades específicas (residências, lojas, indústrias). Essa rede permite serviços ponto a ponto, uma vantagem notável que o transporte rodoviário tem sobre outros modos (RODRIGUE et al, 2013). A velocidade operacional que um sistema de TPU consegue atingir é diretamente influenciada pelo tipo de via na qual ele trafega.

Seguindo a tendência mundial, no Brasil, a imensa maioria dos deslocamentos por TPU acontece em modos de transporte rodoviário, prioritariamente o ônibus (SILVEIRA; COCCO, 2013). O serviço de ônibus é fácil de introduzir ou modificar: o serviço básico requer apenas a compra de veículos, garagem e instalações de manutenção e organização dos serviços. As paradas ao longo das linhas podem ser simples. Portanto, os ônibus representam o modo de transporte urbano mais econômico para linhas de pouco movimento. A qualidade do serviço e o papel desempenhado pelo transporte por ônibus em uma cidade dependem principalmente

da categoria ROW que o sistema utiliza. A seguir são apresentados os principais sistemas de transporte urbano rodoviário.

- Ônibus convencional:

Modo de tráfego misto. Os veículos operam em ROW C com paradas no meio-fio ao longo da calçada. Uma prática comum em diversas cidades. Em geral, as paradas de ônibus estão em cada esquina, e ocorre uma perda de tempo de viagem significativa devido a sinais de trânsito. As paradas, frequentemente, apresentam informações inadequadas para os passageiros (VUCHIC, 2007). Como resultado, o serviço de ônibus convencional apresenta velocidade e confiabilidade limitadas.

- Trólebus:

Modo de tráfego misto. Geralmente são veículos como os ônibus, mas que são alimentados por eletricidade obtida através de dois polos aéreos. Os veículos requerem um investimento maior do que os ônibus a diesel, mas têm vida útil até 75% mais longa. A tração elétrica dá ao trólebus as vantagens e as desvantagens a seguir em comparação com o motor de combustão interna: aceleração mais suave, devido a motores elétricos; muito maior capacidade de subida; e viagens extremamente silenciosas (VUCHIC, 2007). Portanto, esse modo é indicado em cidades montanhosas, nas áreas onde o baixo ruído e poluição são muito importantes, e em áreas onde a eletricidade é mais barata do que o petróleo

- Ônibus que operam em via segregada:

Modo de transporte semirrápido. Os serviços de ônibus que operam em faixa exclusiva, ROW B, conseguem atingir uma maior velocidade e melhor confiabilidade em relação aos serviços convencionais. Esse sistema é conhecido como ônibus de serviço rápido (BRS – do inglês *bus rapid service*). Em geral, o BRS se utiliza de faixas exclusivas para ônibus, sem segregação da via, mas com controle de acesso dos demais veículos, que podem executar giros à direita, por exemplo. Ao contrário do sistema BRT, o BRS não exige estações fechadas, pagamento antecipado de tarifas nem veículos maiores (ARAGÃO et al, 2016).

Portanto, o sistema pode ser implantado mais facilmente do que o BRT, entretanto, apesar de apresentar melhor desempenho em relação ao serviço de ônibus convencional, o BRS não

atinge o desempenho de um sistema BRT. No Brasil, pode-se citar como exemplos o sistema BRS do Rio de Janeiro e as faixas azuis do Recife.

- BRT:

Modo de transporte semirrápido. BRT é um sistema de transporte de massa, que melhora o serviço, em comparação aos ônibus convencionais por apresentar características que remetem ao transporte sobre trilhos como: (i) altas frequências; (ii) prioridade nas vias (incluindo corredores exclusivos), que resultam em altas velocidades e melhoram a confiabilidade do serviço; e (iii) redes e corredores bem definidos, com sistemas de tecnologia da informação para facilitar a obtenção de dados para planejamento e operação do sistema (CURRIE; DELBOSC, 2011; HENSHER et al, 2014).

O sistema BRT surgiu em Curitiba com a adoção de medidas como: ônibus articulados, em 1984, que aumentaram a capacidade de transporte; estações tubo, em 1991, que possibilitaram o embarque em nível e o pré-pagamento de tarifas; e ônibus biarticulados, em 1992. O TransMilenio, em Bogotá, aperfeiçoou o conceito de BRT ao permitir ultrapassagens, possibilitando a operação de serviços paradores e expressos no mesmo corredor, aumentando a capacidade de transporte e a velocidade média operacional. Esse novo paradigma influenciou o projeto BRT de várias cidades como o TranSantiago, Metropolitano de Lima, Metroplús de Medellín e o TransOeste do Rio de Janeiro (LINDAU et al, 2013).

O BRTdata (BRT CENTRE OF EXCELLENCE et al, 2017) é um dos projetos desenvolvidos pelo *Across Latitudes and Cultures – Bus Rapid Transit* (ALC-BRT). O ALC-BRT conduz pesquisas aplicadas visando melhorar as práticas de projeto, planejamento, financiamento, implantação e operação de sistemas BRT. De acordo com BRT Centre of Excellence et al (2017), atualmente o sistema BRT é encontrado em 205 cidades de 45 países em todo o mundo, com crescimento especialmente concentrado em países em desenvolvimento. 65 dessas cidades entraram nessa lista a partir de 2011, demonstrando que o BRT é uma opção de transporte público cada vez mais popular internacionalmente.

Currie e Delbosc (2011) destacam que, apesar de muitos atribuírem esse crescimento ao desenvolvimento do sistema, não foram identificados exatamente quais aspectos do sistema BRT levaram a isso. Hidalgo e Gutierrez (2013), no entanto, apontam que o crescimento

expressivo do número de sistemas BRT pode ser atribuído em parte ao sucesso de Curitiba, Bogotá, Cidade do México, Istambul e Guangzhou. Estas cidades possuem sistemas BRTs de baixo custo, rápida implementação e alto desempenho, promovendo assim, o estímulo à replicação do projeto em outras cidades.

Lindau et al (2013) indicam como características físicas de projeto que são fundamentais para um corredor de alto desempenho: (i) duas faixas por sentido, (ii) múltiplas baias nas estações, (iii) pré-pagamento, (iv) embarque em nível e (v) pavimento de concreto. Como elementos operacionais que exercem grande influência no desempenho operacional dos sistemas são citados por Pereira et al (2013): o ciclo semaforico, a coordenação entre semáforos e o número de serviços operando no corredor.

Hidalgo e Gutierrez (2013) destacam algumas questões pendentes como a falta de uma definição única para o sistema. Um amplo espectro de sistemas podem ser considerados BRT, de serviço de ônibus em tráfego misto a sistemas totalmente segregados. Adicionalmente, muitos desses novos sistemas em países em desenvolvimento sofrem com problemas de planejamento, implementação e operação, devido a restrições financeiras, institucionais e regulatórias.

Examinando os sistemas BRT pelo mundo, os fatores citados anteriormente são combinados de muitas formas diferentes, gerando discrepâncias na definição de qualidade de um sistema BRT. As evidências mostram que esses sistemas são uma resposta às necessidades de uma área urbana e tem uma mistura de padrões de qualidade segundo suas características (HENSHER et al, 2014). Para Pereira et al (2013), essa diversidade de configurações é consequência da flexibilidade intrínseca ao conceito que pode dar margem a um BRT com melhor ou pior desempenho, pois a combinação estabelecida entre os elementos de projeto é determinante para o desempenho operacional de um corredor de BRT.

Apesar da diversidade de configurações possíveis para os sistemas BRT, a separação do sistema em relação ao tráfego misto é o fator de maior impacto no desempenho operacional do sistema. Tendo em vista a necessidade de livrar o sistema dos congestionamentos, aumentar as velocidades operacionais e reduzir a variabilidade dos tempos de viagem para fidelizar e atrair novos usuários (LINDAU et al, 2013; CURRIE; DELBOSC, 2011;

VUCHIC, 2007). Nesse sentido, Gunawan (2015) enfatiza a importância da segregação física, pois mesmo que a faixa de BRT seja marcada por pintura, o tráfego comum tende a ignorar essa marcação e invadir as faixas de ônibus. O autor conclui, ainda, que as interferências com o tráfego misto podem comprometer o tempo de viagem consideravelmente, mesmo que aconteçam em pequenos segmentos do corredor.

O acompanhamento do desempenho do sistema ao longo da operação é de extrema importância. Hidalgo et al (2013) analisaram o TransMilenio, projeto de referência de BRT de alto nível. O estudo mostra que os indicadores de satisfação dos usuários eram altos nos primeiros três anos da operação, e atualmente é baixo e têm tendência geral de cair, com flutuação significativa e valores mais críticos reportados em 2007. Os autores atribuem a diminuição da taxa de satisfação dos usuários à lenta expansão do sistema, já que nenhum veículo novo entrou em operação depois de 2006, e à deterioração da infraestrutura devido à manutenção insuficiente ou ineficiente.

Como cada corredor BRT é único em termos de configurações e é praticamente infinita a quantidade de combinações entre os elementos de projeto, não é razoável esperar que o desempenho de um determinado corredor possa ser replicado em condições distintas (PEREIRA et al, 2013). Apesar do grande crescimento dos projetos BRT e da saturação de alguns sistemas já consolidados, pesquisas para melhorar o desempenho de sistemas BRT ainda estão em estágios iniciais.

O BRT tem um grande potencial como um sistema de transporte sustentável, para oferecer altos níveis de frequência, regularidade, conectividade e visibilidade para um custo relativamente baixo comparado a sistema sobre trilhos, resultando em um investimento atrativo para uma área metropolitana (HENSHER et al, 2014). Entretanto, ainda há muito espaço para melhoria do desempenho e operação dos sistemas BRT.

É possível encontrar na literatura muitos trabalhos que utilizam modelos de simulação para analisar o desempenho operacional de sistemas BRT. Esses estudos demonstram que a simulação computacional microscópica é uma ferramenta adequada para recriar um ambiente de estudo detalhado do desempenho operacional de corredores BRT (KATHURIA et al, 2017; GODAVARTHI et al, 2014; LIN et al, 2014; PEREIRA et al, 2013).

2.1.3 Transporte urbano ferroviário

Os modos ferroviários incluem modos de tráfego misto, como os bondes, modos de transporte semirrápido, como o VLT, e modos de transporte rápidos, como o metrô. A principal desvantagem dos modos ferroviários é a flexibilidade, já que são necessárias rotas fixas e os transbordos devem ser feitos apenas nos terminais. Mesmo assim, o transporte ferroviário é mais eficiente do que o transporte rodoviário, pois os trens podem oferecer um serviço de alta capacidade, velocidade razoável e alta confiabilidade (RODRIGUE *et al*, 2013). O serviço de transporte de passageiros é, portanto, eficaz onde a densidade populacional é alta.

Ao estudar os sistemas de transporte urbano por trilhos em países em desenvolvimento, Koizumi *et al* (2013), argumentam que o cronograma de operação dos sistemas de alta capacidade está intimamente relacionado ao nível socioeconômico das cidades. Quanto maior a população, mais provavelmente um sistema de metrô será desenvolvido, embora o PIB per capita não seja suficientemente alto. Por outro lado, as cidades com níveis mais altos de PIB per capita abrirão seus sistemas de metrô, mesmo que sua população ainda não seja expressiva.

A construção das linhas férreas e o fornecimento de material rodante são caros. Litman (2007), no entanto, defende que as melhorias no TPU podem ser investimentos rentáveis quando todos os impactos econômicos são considerados. Uma análise abrangente do transporte público ferroviário deve considerar benefícios adicionais, como redução de acidentes e congestionamentos na cidade, melhor mobilidade para não condutores, redução de emissões poluentes, melhorias na saúde pública, entre outros. Entre os transportes terrestres, o ferroviário é o que menos agride o meio ambiente, pois consome menos energia. Quando estes objetivos são considerados, o transporte ferroviário tende a tornar-se mais rentável em análises de custo-benefício.

O TPU por trilhos apresenta maior capacidade para atrair novos usuários em relação ao transporte público rodoviário (VUCHIC, 2007; LITMAN, 2007). Apesar disso, o estudo de Cao e Schoner (2014) conclui que, em geral, a construção de uma linha transporte ferroviário é insuficiente para atrair usuários para o transporte público. Para que isso ocorra é necessário

que haja políticas bem coordenadas de uso do solo e de transporte. As viagens de transporte público dependem da atratividade das atividades ao redor das estações e de um ambiente seguro para pedestres para que os moradores possam acessar o transporte. Os principais modos de transporte urbano ferroviário são brevemente descritos a seguir, de acordo com Vuchic (2007).

- **Bonde:**

Modo de tráfego misto. Os bondes têm excelentes características dinâmicas e de conforto, mas sua confiabilidade e velocidade de operação dependem muito das condições ao longo de suas linhas: se a operação é feita em ruas estreitas com tráfego congestionado, seu desempenho pode ser insatisfatório, enquanto em ruas com pouca interferência de trânsito ou com tratamentos preferenciais, o serviço de bondes pode ser muito bom.

- **VLT:**

Modo de transporte semirrápido. Veículos silenciosos, de alta capacidade e propulsão elétrica, que operam predominantemente em ROW categoria B. Os veículos articulados podem acomodar até 250 pessoas. Os VLTs tem velocidades de operação geralmente entre 18 e 40 km/h. Um fator a ser destacado é que ele pode operar em parques e zonas de pedestres; ter plataformas altas e baixas em estações diferentes.

- **Metrô:**

Modo de transporte rápido. É o mais indicado para linhas que necessitam alta capacidade. Opera somente em ROW categoria A, sem qualquer interferência do tráfego geral. O sistema de metrô oferece conforto, eficiência no uso de energia, confiabilidade e segurança. O pagamento antecipado das tarifas, plataformas altas e embarque/desembarque simultâneos permitem que este modo atinja taxas de embarque/desembarque de 3 a 5 vezes maiores do que o VLT e 10 a 20 vezes maior do que os ônibus. O veículo típico tem capacidade variando entre 120 e 250 pessoas. As velocidades de operação variam de 25 a 60 Km/h.

2.1.4 Transporte e Desenho Urbano

Rodrigue *et al* (2013) explicam que a forma urbana é a marca espacial de um sistema de transporte urbano e suas infraestruturas físicas adjacentes, que em conjunto, conferem às

idades um arranjo espacial. Estrutura espacial urbana é o conjunto de relações derivadas da forma urbana e suas interações com as pessoas, cargas e informações. Cada cidade tem diferentes características socioeconômicas e geográficas e, com isso, a estrutura espacial do transporte varia em cada localidade. A forma urbana e sua estrutura espacial são articuladas por dois elementos estruturais:

- Nós: representam a centralidade das atividades urbanas, o que pode estar relacionado com a acumulação espacial das atividades econômicas ou com a acessibilidade ao sistema de transporte. Os centros atratores de viagem, por exemplo, são importantes nós onde as atividades se aglomeram ao nível local ou regional. Os nós tem uma hierarquia relacionada com a sua importância e contribuição para funções urbanas, como produção, gestão, comércio e distribuição.
- Links: são as infraestruturas de apoio aos fluxos de, para e entre os nós. O nível mais inferior de links inclui ruas, que são os elementos que definem a estrutura espacial urbana. Há uma hierarquia de links que incluem as estradas e ferrovias regionais e links internacionais através de sistemas de transporte marítimo e aéreo.

Espacialmente, um componente chave que interage com o uso do solo em uma cidade é a rede de transporte. No contexto das cidades, a rede canaliza o crescimento urbano, e cada tipo de uso do solo cria uma demanda por transporte que leva a um aumento da rede. Por outro lado, uma rede recém-desenvolvida gera mudanças nos usos do solo adjacente (CHAUDHURI; CLARKE, 2015). A quantidade de terra urbana atribuída ao transporte é frequentemente correlacionada com o nível de mobilidade em cada cidade. Como a mobilidade de pessoas e de mercadorias aumentou com o desenvolvimento das sociedades contemporâneas, uma parte crescente das áreas urbanas foi alocada para o transporte e as suas infraestruturas de apoio.

Quaisquer que sejam os modos de transporte, ou a combinação de modos de transportes, em uma cidade é imprescindível que a operação seja feita em um espaço organizado para tal, com densidades urbanas e teor social adequados para cada sistema escolhido. Verifica-se, então, a necessidade de um esforço contínuo pelo planejamento do uso do solo urbano, que possa coibir edificações inadequadas à programação do Estado quanto à implementação de equipamentos e infraestruturas coletivas em rede, que são as mais afetadas pela distribuição espacial desigual da população. Ademais, esse planejamento dos transportes trata não apenas

da construção de infraestruturas, mas da criação de uma legislação urbana de uso do solo adequada (e sua execução, garantindo a diretriz da função social da terra urbana), voltada a tornar eficaz a fluidez territorial (SILVEIRA; COCCO, 2013).

Zhang et al (2015) definem que topologia de rede é a representação abstrata de um sistema de transporte como uma rede de nós e links de conexão, este sistema pode envolver rodovias, ferrovias, ligações marítimas, espaço aéreo ou combinações intermodais. A seção seguinte trata dos principais elementos que compõem a rede de transporte público urbano.

2.2 Principais elementos da rede de TPU

Na seção anterior, concluiu-se que o termo redes refere-se à estrutura de rotas dentro de um sistema de locais, identificados como nós. Uma rota, ou link, é uma ligação entre dois nós que fazem parte de uma rede maior. Paranhos (2011) ressalta que os modos de transporte público urbano interferem diretamente na conformação da Rede de Transporte Público Urbano (RTPU). Os modos rodoviários possuem grande flexibilidade de rotas e horários, dado que circulam em praticamente qualquer via terrestre urbanizada. Já os modos ferroviários dependem de uma infraestrutura física e operacional mais rígida.

Os elementos do sistema de transporte urbano que são essenciais para a configuração da RTPU são: os tipos de linhas, o nível de prioridade para os coletivos nas vias urbanas e a infraestrutura disponibilizada para embarque e desembarque de passageiros, como os pontos de parada e os terminais. As subseções seguintes tratam de cada um dos elementos supracitados e, então, dos tipos principais de redes de transporte urbano.

2.2.1 Linhas

Em estudo comparativo, Huang e Levinson (2015) mostram que, na prática, as viagens de transporte público são sempre mais indiretas do que as viagens em automóvel particular, pois as redes de transporte público são projetadas para garantir uma grande cobertura espacial. Além disso, o tamanho das linhas de transporte público é uma grande proporção da distância total de viagem, influenciando fortemente o tempo total de viagem. Shrivastava e O'Mahony

(2006) ressaltam que linhas otimizadas e horários coordenados reduzem o tempo total de viagem dos passageiros e aumentam o nível de satisfação com o serviço de transporte público.

Em resumo, para a elaboração de linhas de transporte público, deve-se levar em consideração aspectos como demanda, tempo de viagem, alcance das redes e cobertura espacial do serviço. Essa seção toma como base os conceitos apresentados por Ferraz e Torres (2004) para a classificação das linhas de transporte público, de acordo o traçado e a função que exercem no sistema. Conforme o traçado, as linhas são divididas em cinco tipos principais:

- Radial: liga os bairros à área central, onde, em geral, há grande concentração de atividades comerciais e de prestação de serviços.
- Diametral: conecta duas regiões passando pela zona central da cidade.
- Circular: liga várias regiões da cidade, formando um circuito fechado e, no caso mais comum, com o centro da cidade localizado mais ou menos no centro do círculo.
- Interbairros: liga duas ou mais regiões da cidade sem passar pela área central, com o objetivo de oferecer viagens diretas a um ou mais CAVs importantes.
- Local: percorre uma região da cidade, onde se localizam um ou mais bairros, também com o objetivo de oferecer viagens diretas a um ou mais CAVs importantes.

De acordo com a função, as linhas de TPU podem ser classificadas como:

- Convencional: executa simultaneamente as funções de captação dos usuários na região de origem, transporte da origem até o destino e distribuição na região de destino.
- Troncal: opera em um corredor onde há grande concentração de demanda, com a função principal de realizar o transporte de uma região à outra da cidade.
- Alimentadora: conecta uma determinada região da cidade a uma estação de uma linha troncal.
- Expressa: opera com poucas, ou nenhuma, parada intermediária a fim de aumentar a velocidade operacional.
- Especial: funciona apenas em determinados horários, normalmente nos horários de pico, ou quando ocorrem eventos especiais.
- Seletiva: realiza um serviço complementar ao transporte coletivo, com preço maior e melhor qualidade.

2.2.2 Grau de prioridade nas vias

O grau de prioridade dos transportes públicos afeta fortemente aspectos como confiabilidade e velocidade operacional do serviço. Hadas e Ceder (2010) citam a falta de confiabilidade como o principal problema do TPU para passageiros existentes e potenciais. Devido ao fato de que a maioria dos atributos de transporte público é estocástico: tempo de viagem, tempo de permanência, demanda, etc., é provável que o usuário tenha que experimentar tempos de espera e tempos de viagem não planejados.

O estudo conduzido por Chakrabarti (2015) na cidade de Los Angeles prova empiricamente que a confiabilidade do serviço é determinante para o volume de demanda por transporte. O aumento da confiabilidade deve incluir estratégias como coordenação semafórica e vias exclusivas para coletivos. A introdução dessas ações requer coordenação entre muitas agências responsáveis pela gestão de redes multimodais de transporte urbano. A implementação dessas estratégias podem melhorar o desempenho do sistema e a percepção dos usuários sobre qualidade do serviço.

Ferraz e Torres (2004) mostram que, em linhas gerais, dois tipos de prioridade são empregados: prioridade nas vias e prioridade nas interseções. Os autores apresentam seis arranjos predominantes com diferentes graus de prioridade para o transporte público urbano:

- Faixa exclusiva junto à calçada: oferece maior segurança para os passageiros devido ao acesso direto aos pontos de parada. No entanto, causa dificuldade para conversão à direita, embarque e desembarque, carga e descarga e entrada e saída de garagens. Exige constante fiscalização para evitar invasão;
- Faixa exclusiva junto ao canteiro central: Não prejudica carga e descarga, embarque e desembarque, entrada e saída de garagens e conversão à direita. Em contrapartida, oferece menor segurança para os usuários devido à travessia da via, o que pode ser contornado com o emprego de semáforos, passarelas ou túneis para os pedestres;
- Faixa segregada no centro da via: proporciona maior velocidade aos coletivos, maior facilidade para priorização nos semáforos e segregação com túneis e viadutos. A

principal desvantagem é a necessidade de utilização de uma grande largura de via, restringindo o espaço para o tráfego geral.

- Faixa exclusiva no contra fluxo junto à calçada: diminui os percursos dos coletivos e os demais veículos respeitam mais. Porém, representa riscos para os pedestres que esquecem dos coletivos no contra fluxo.
- Via exclusiva: produz maior facilidade de tráfego para os coletivos, pedestres e táxis (se autorizados). Entretanto, a restrição do acesso de carros pode prejudicar o comércio e há necessidade de vias alternativas para o tráfego geral e carga e descarga.
- Zona exclusiva: leva ao descongestionamento de áreas críticas e à prioridade absoluta para o transporte coletivo. Em contraponto apresenta a mesmas desvantagens da via exclusiva, como causar prejuízo ao comércio e a necessidade de vias alternativas para o tráfego geral e carga e descarga.

Em relação às interseções, é interessante proporcionar prioridade ao movimento dos coletivos, sobretudo no caso de linhas troncais operadas por veículos de média capacidade, como VLT ou BRT. Nas interseções com semáforos, a distribuição da fase verde deve ser feita proporcionalmente ao número equivalente de veículos, ou seja, com cada coletivo correspondendo a vários carros, de acordo com a quantidade de passageiros. Em um sistema mais sofisticado, os controladores de semáforos são acionados automaticamente pelos coletivos ao se aproximarem do cruzamento. Esse sistema é comumente empregado nos modos de média capacidade. A detecção da chegada dos coletivos é feita por sensores, o sinal captado é enviado para o controlador semafórico que, então, atua no sentido de que a luz esteja verde quando o coletivo estiver próximo ao cruzamento (FERRAZ; TORRES, 2004).

2.2.3 Pontos de Parada

As paradas são equipamentos que permitem a acessibilidade ao sistema de transporte público e são fundamentais na orientação e identificação dos pontos de embarque e desembarque e dos pontos de integração entre linhas ou entre modos de transporte. A identificação dos pontos de parada pode ser feita com uma simples marca em postes ou instalação de abrigos. A existência de abrigos é importante para proteger as pessoas da chuva, do sol e do vento, proporcionando uma espera mais confortável para os usuários. Ferraz e Torres (2004) e Vuchic (2007) demonstram que o planejamento das paradas ao longo do percurso de uma

linha deve considerar três aspectos principais: distância entre os pontos de parada, localização e *design* das paradas, conforme descrito a seguir.

- Distância entre os pontos de parada:

Na definição da distância entre as paradas, devem ser contemplados os aspectos de acessibilidade (distância de caminhada), concentração de usuários nas plataformas e tempo de permanência para as operações de embarque e desembarque. O espaçamento entre os pontos de parada deve ser de 400 m a 600 m (FERRAZ; TORRES, 2004).

Entende-se que o espaçamento ideal entre pontos de parada requer que uma distância grande o suficiente para gerar uma velocidade operacional razoável e pequena o suficiente para permitir que os passageiros caminhem até o ponto de parada. Stewart e El-Geneidy (2016) explicam que a consolidação de pontos de parada é uma das maneiras mais efetivas de um órgão gestor de transporte público melhorar a qualidade do serviço. A consolidação consiste na retirada de paradas desnecessárias, de forma a reduzir os tempos de viagem.

Velocidade de operação, frequência e tempo de permanência são atributos essenciais para determinar a relação entre demanda e espaçamento entre pontos de parada, com congestionamento e atrasos na fila desempenhando papel fundamental. Usualmente, o espaçamento entre as paradas de ônibus deve ser diminuído se a demanda aumenta a uma velocidade constante. Por outro lado, se a velocidade operacional do veículo e a velocidade do processo de embarque de passageiros aumentam, a distância entre os pontos de ônibus pode ser mantida, mesmo com níveis elevados de demanda (TIRACHINI, 2014).

As definições apresentadas são consistentes com a implementação dos sistemas BRT, que possuem velocidades maiores e distâncias mais longas entre paradas quando comparados aos serviços de ônibus convencionais.

- Localização dos pontos de parada:

Em relação à localização de paradas de transporte público ao longo da via, Ferraz e Torres (2004) e Vuchic (2007) apresentam três tipos: antes da interseção, depois da interseção ou no meio da quadra. Feng et al (2015) explicam que, depois da distância de viagem, os atrasos por semáforo vermelho são o principal fator que define o tempo de viagem. A localização do

ponto de ônibus também tem um efeito estatisticamente significativo nos atrasos devidos ao semáforo das interseções e tempos de embarque de passageiros. Devido a isso, a localização das paradas deve ser planejada de modo a garantir que o veículo fique o mínimo possível parado no sinal vermelho. A acessibilidade e o conforto dos passageiros são maximizados quando as paradas estão situadas em locais protegidos do tráfego, dispõem de espaço suficiente para circulação e não impedem o fluxo de pedestres na calçada.

Para Vuchic (2007), as paradas localizadas no meio da quadra são recomendadas apenas em casos especiais, como quando o principal CAV está localizado distante de interseções, ou quando o tráfego e a geometria das interseções tornam inconvenientes as paradas antes ou depois do cruzamento; ou quando os veículos de transporte público realizam conversão à esquerda, onde uma parada localizada depois do cruzamento não pode ser instalada. Ferraz e Torres (2004), no entanto, ponderam que os cruzamentos já são locais naturais de conflitos entre veículos e pedestres, e por isso, o ideal é que os pontos de parada sejam localizados no meio das quadras.

Em consonância com o que afirma Vuchic (2007), Moura et al (2012) indicam que a localização dos pontos de parada que proporciona melhor velocidade operacional é a montante e afastadas do semáforo ou a jusante dele. Ressalta-se, no entanto, que alguns locais de parada podem ser benéficos para altos fluxos de ônibus e prejudiciais para fluxos baixos e vice-versa.

Em locais com alto nível de congestionamento nas vias e nas paradas, o tempo de espera pelos coletivos tende a ser alto. Em situações desse tipo, Moura et al (2012) apontam que, à medida que o fluxo de coletivos aumenta, as melhores localizações para os pontos de parada são aquelas que estão situadas depois da interseção, de forma a evitar as filas dos semáforos. Feng et al (2015), no entanto, sugerem que o impacto dos atrasos devido ao tempo vermelho do semáforo é tão significativo para os coletivos que pontos de parada com grande número de embarques devem ser localizados antes do cruzamento.

Já em locais com baixas demandas de tráfego, Moura et al (2012) defendem que a localização do ponto de parada torna-se praticamente irrelevante devido à pouca interferência dos veículos particulares. Isso significa que as paradas localizadas antes do cruzamento devem ser

posicionadas a uma distância tal do semáforo que não permita que os ônibus saturam a área em torno da parada, pois estes são os locais que proporcionam as melhores velocidades operacionais quando o fluxo de ônibus é alto.

O que se pode constatar a partir dessa revisão de literatura sobre a localização dos pontos de parada é que o mais recomendado seria situá-las afastadas das interseções. Porém essa escolha deve ser feita analisando caso a caso, levando em conta fatores como uso do solo (localização de centros atratores de viagens), programação semafórica e acesso de passageiros (incluindo baldeações, tráfego veicular e de pedestres nas interseções).

- *Design* dos pontos de parada:

A forma normal de operação dos pontos de parada é quando veículos de todas as linhas que passam pelo local param em um mesmo ponto, com o estacionamento de um coletivo de cada vez. Quando o fluxo nas vias é intenso é indicado utilizar outras formas de operação, como as paradas seletivas, em que os veículos são divididos em grupos e cada grupo para em pontos previamente selecionados; ou a adequação no *design* da parada de modo a permitir que dois ou mais coletivos parem simultaneamente (FERRAZ; TORRES, 2004). Para Tirachini (2014), o tamanho ótimo da parada de ônibus, em termos do número de berços a construir, é resultado do equilíbrio entre capacidade (menor congestionamento) e custo de construção. O tamanho da parada de ônibus depende principalmente da demanda.

Ferraz e Torres (2004) fazem uma classificação do *design* do ponto de parada em relação à posição da guia: guia em posição normal, guia recuada tipo baia e guia avançada. Vuchic (2007) indica que o *design* mais simples de ponto de parada é a guia em posição normal, onde os veículos de transporte público param junto ao meio-fio. Apesar dessas paradas serem convenientes para passageiros e requererem menos manobra do veículo, bloqueiam uma faixa de trânsito. Por conseguinte, sua aplicação deve ser limitada a vias com faixas exclusivas para transporte público, ou locais onde o trânsito é leve e as paradas costumam ser curtas.

Uma localização melhor para as paradas é fora das faixas de tráfego, proporcionando maior segurança e menos interferência com outros veículos. O mais comum é que essas paradas sejam em guias recuadas tipo baia (VUCHIC, 2007). O emprego da baia recuada beneficia o

tráfego normal de veículos, mas dificulta a volta dos coletivos ao fluxo quando o trânsito é intenso, provocando atrasos.

No caso de calçadas estreitas, onde o acúmulo de usuários esperando nos pontos de parada prejudica o trânsito de pedestres e dificulta o acesso a estabelecimentos comerciais, recomenda-se o emprego de guias avançadas. Essa solução melhora consideravelmente o conforto dos usuários. Em contrapartida, o uso das guias avançadas impede o fluxo de veículos enquanto os coletivos estão parados nos pontos (FERRAZ; TORRES, 2004).

Em resumo, os principais aspectos a serem analisados na escolha do tipo de design dos pontos de parada são os seguintes: fluidez do trânsito, comodidade para pedestres e usuários esperando no ponto de parada e facilidade de retorno do ônibus à corrente de tráfego.

2.2.4 Terminais de transporte público urbano

Os terminais são componentes importantes dos sistemas de transporte público urbano, uma vez que representam os pontos de contato com as áreas vizinhas e com outros modos de transporte. O projeto adequado de um terminal é fundamental para proporcionar aos usuários segurança, conforto e comodidade. O projeto também deve facilitar a operação dos coletivos, de modo a garantir segurança, confiabilidade e comodidade nas manobras executadas no interior e nas entradas e saídas desses locais (FERRAZ; TORRES, 2004).

Vasconcelos (2005) ressalta que os terminais necessitam de uma operação eficiente que organize as chegadas e partidas dos ônibus de forma a minimizar o tempo de transferência dos passageiros. A estratégia de integração de sistemas tem sido, introduzida em grandes cidades do Brasil, principalmente na integração ônibus-BRT e ônibus-metrô. No entanto, ainda se observa a falta de uma metodologia para definição de um *layout* e dimensionamento adequado de terminais de integração (HOSSMANN; CAMPOS, 2014).

Os terminais de transporte urbano servem para os passageiros trocarem de veículo, a fim de atingirem seus destinos finais. Essa troca não é desejada pelos passageiros, em geral, mas torna-se necessária para otimizar o sistema de transporte da cidade e para viabilizar ligações que não teriam demanda suficiente para uma linha direta (VASCONCELOS, 2005). Os

terminais podem ser pontos de intercâmbio entre veículos de um mesmo modo de transporte, por meio da integração intramodal, ou pontos de transferência entre os modos, isto é, pontos de integração intermodal (FERRAZ; TORRES, 2004; RODRIGUE et al, 2013; HOSSMANN; CAMPOS, 2014).

Os terminais de ônibus urbanos podem ser abertos ou fechados. No caso dos terminais fechados, ocorre a integração física das linhas, e também, a integração tarifária, pois o passageiro que já pagou pela viagem no primeiro veículo que utilizou ao entrar na estação não necessita pagar novamente. A integração tarifária também é possível em terminais abertos, com a utilização de validador eletrônico nos coletivos. Nos terminais de início e fim de viagens, o tempo de permanência dos veículos é maior, pois são controlados os horários ou intervalos entre atendimentos. Esse tipo de terminal exige, portanto, um número maior de baias de estacionamento e, conseqüentemente, uma área maior que as estações de passagem (FERRAZ; TORRES, 2004).

Rodrigue et al (2013) explicam que o tempo de embarque e desembarque de passageiros é normalmente chamado de tempo de permanência. O tempo de permanência operacional reflete o desempenho das infraestruturas e do gerenciamento dos terminais, incluindo a programação e a disponibilidade dos serviços de transporte. Vuchic (2007) enfatiza que os terminais de transporte público devem estar em locais com boa acessibilidade às principais vias arteriais e, naturalmente, com serviço extensivo de linhas.

A função de convergência dos terminais de transporte público, com fluxo de passageiros e veículos de diversas origens e com destinos variados, exige do planejamento uma distribuição dos espaços de forma a contribuir para um fluxo livre dos usuários e que reduza ao mínimo seu tempo de transbordo, garantindo a confiabilidade do serviço e o conforto aos passageiros.

2.2.5 Tipos de redes de transporte público urbano

As RTPU, na maioria das cidades latino-americanas, inclusive as brasileiras, cresceram intuitivamente junto com o desenvolvimento urbano, em geral, concentrando comércio e serviços nas áreas centrais. Souza e Orrico Filho (2015) explicam que essa estrutura começa a se modificar com o surgimento de novos CAVs nas áreas urbanas, ou seja, subcentros de

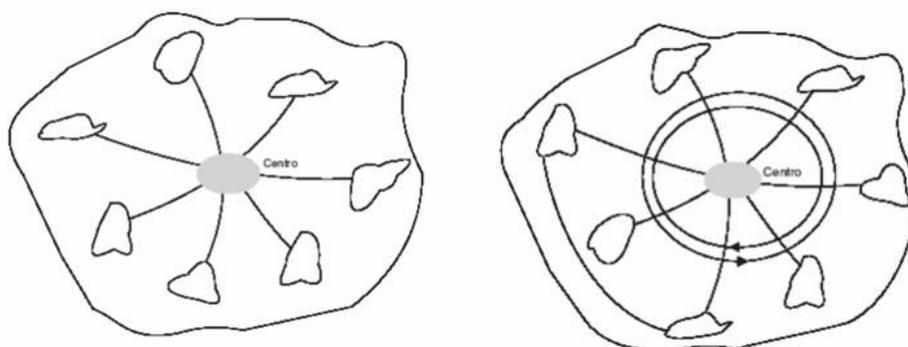
grande importância na cidade, que vão demandar novos deslocamentos, fora do centro da cidade. Além disso, características específicas da população e diferenças na forma de uso e ocupação do solo podem conferir diretrizes diferentes na formação do sistema de TPU de uma região e sua rede. Três configurações básicas de RTPU são apontadas por Ferraz e Torres (2004): radial, em grelha e radial com linhas tronco alimentadas, conforme descrito a seguir.

- Rede radial

A rede radial é constituída de linhas do tipo radial e diametral, que ligam as regiões não centrais ao centro da cidade. O emprego das linhas diametrais é uma estratégia que reduz a necessidade de transbordos nesse tipo de rede. Essa configuração de rede é a mais comum, visto que, na maioria das cidades, comércio e serviços se concentram no centro. Desse modo, a maioria das viagens pode ser realizada de maneira direta (FERRAZ; TORRES, 2004).

Em cidades maiores, onde já existe uma maior descentralização de atividades, para diminuir a necessidade de transbordos nas viagens entre bairros, a rede do tipo radial é modificada, com a inclusão de linhas circulares em torno da região central e linhas interbairros. Além do benefício de aumentar o número de viagens diretas, as linhas circulares e interbairros permitem reduzir a concentração de ônibus e passageiros na zona central congestionada (*ibid*). A Figura 1 ilustra a configuração das redes do tipo radial e do tipo radial modificada.

Figura 1 - Rede radial, à esquerda, e rede radial modificada, à direita.



Fonte: Ferraz e Torres (2004).

A rede radial tem baixo custo operacional, porém o número de transbordos e as distâncias de viagem aumentam bruscamente com a descentralização da demanda. A rede radial modificada é um serviço baseado em conexões diretas, ou seja, visa extinguir a necessidade de

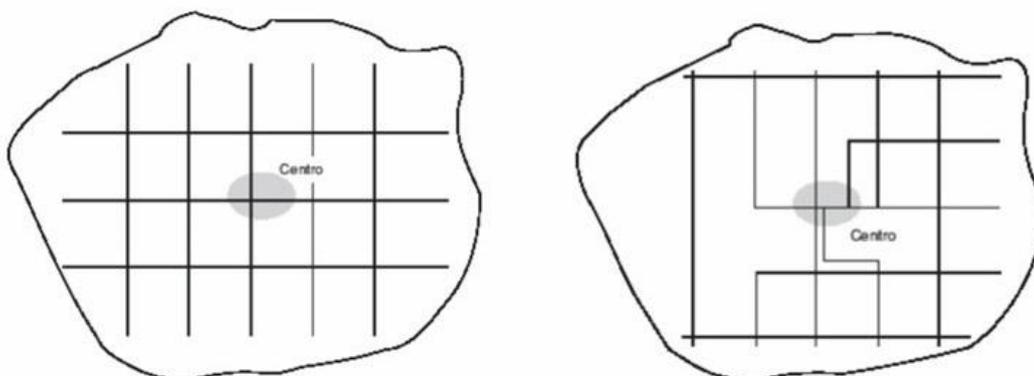
transbordos e limitar aumentos nas distâncias de viagem. Entretanto, manter as viagens diretas durante um processo de descentralização exige grandes investimentos, enquanto afeta negativamente a cobertura espacial e temporal do serviço (BADIA et al, 2016). As redes de transporte do tipo radial e do tipo radial modificada são, portanto, mais apropriadas nos casos em que a cidade possui apenas uma, ou poucas, áreas com grande atração de viagens.

- Rede em grelha

A rede em grelha, malha ou grade, consiste em dois conjuntos de rotas paralelas aproximadamente perpendiculares entre si. Esse tipo de rede é indicado para cidades onde a concentração de demanda na área central não é tão forte, isto é, as atividades comerciais e de prestação de serviços encontram-se dispersas no meio urbano. Nesses casos, esse tipo configuração de rede possibilita ir de um local a qualquer outro realizando apenas um transbordo na interseção de duas linhas, sem necessidade de passar pelo centro (FERRAZ; TORRES, 2004).

Na prática, por força de descontinuidade da malha viária e necessidade de atendimento das maiores demandas com viagens diretas, a estrutura teórica da rede em grelha é significativamente modificada, com a inclusão de linhas ligando algumas regiões diretamente à zona central. Esse novo arranjo é chamado de rede híbrida. Em cenários de demanda dispersa, a rede híbrida permite uma melhor utilização de recursos por meio de transbordos, que são também sua principal desvantagem (BADIA *et al*, 2016). A seguir, a Figura 2 mostra as redes de transporte do tipo grelha e do tipo híbrida.

Figura 2 - Rede tipo grelha, à esquerda, e rede híbrida, à direita.

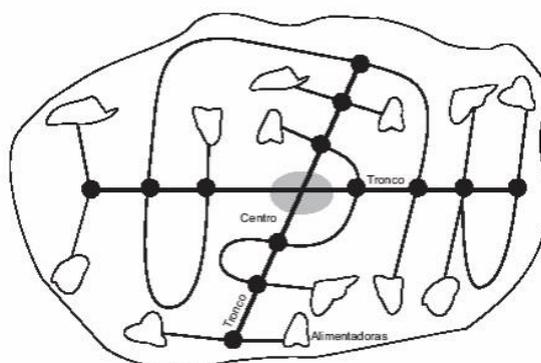


Fonte: Ferraz e Torres (2004).

- Rede radial com linhas tronco alimentadas

A rede radial com linhas tronco alimentadas, mostrada na Figura 3, constitui-se de linhas troncais que operam nos corredores de maior demanda com modos de transporte de maior capacidade e velocidade, e que se conectam a linhas alimentadoras em estações ao longo do percurso. Nessa configuração, mesmo viagens direcionadas à área central são, em grande parte, realizadas com a necessidade de transbordo. No caso de cidades poli nucleadas, ou seja, cidades que tem importantes CAVs em regiões não centrais, indica-se a utilização de linhas interbairros ou circulares ligando diretamente esses subcentros (FERRAZ; TORREZ, 2004).

Figura 3 - Rede radial com linhas tronco alimentadas.



Fonte: Ferraz e Torres (2004)

A análise desenvolvida por Badia et al (2016) confirma que a escolha da melhor estrutura de rede de TPU não segue uma regra geral, isso vai depender dos padrões de mobilidade de cada cidade. Por meio da comparação entre as estruturas de rede foram identificados três cenários distintos. O primeiro apresenta alta concentração da demanda na área central da cidade, neste caso o sistema de rede radial é a solução mais adequada. O segundo cenário indica uma situação intermediária onde a demanda começa a se dispersar ao redor da zona central, nessa circunstância a melhor alternativa seria o desenvolvimento de novas linhas para ligar diretamente os novos polos de atração de demanda, rede radial modificada. O último cenário retrata um padrão de demanda dispersa, onde estruturas de rede em grelha, híbrida ou radial tronco alimentada poderiam ser a opção mais eficiente.

2.3 Medidas de qualidade em TPU

A realização de uma viagem de TPU engloba, em geral, as seguintes etapas: deslocamento do local de origem até o local de acesso ao sistema, espera pelo coletivo, locomoção dentro do coletivo e, por último, deslocamento do ponto de desembarque até o destino final. Ressalta-se, então, a relevância de certos requisitos quanto à comodidade dos usuários serem atendidos durante todas as etapas da viagem. Este trabalho limitou-se a verificar a parte da viagem que consiste na locomoção dentro do veículo.

A oferta de um serviço de boa qualidade, além de garantir o conforto dos passageiros que dependem do transporte coletivo, pode contribuir para a redução das viagens de carro particular. Pois, de acordo com Redman et al (2013), viagens de carro são mais atraentes para os usuários, em relação a outros modos, porque são consideradas mais confortáveis, flexíveis e rápidas. A redução da demanda de viagens de carro em áreas urbanas é um objetivo chave para alcançar a sustentabilidade. Observa-se, então, a importância da realização de estudos voltados para a melhoria contínua da qualidade dos serviços de transporte público urbano.

A análise da qualidade do serviço é de extrema importância tanto para os operadores quanto para as autoridades gestoras do transporte público, já que uma melhora na qualidade do serviço desempenha um papel chave na atração de novos passageiros. Por esse motivo, é importante que a verificação da qualidade do serviço de transporte público seja feita considerando a percepção dos usuários, consumidores finais do serviço. Muitos trabalhos buscam, então, avaliar que aspectos influenciam em maior grau a qualidade percebida pelos usuários de transporte público urbano. Os fatores mais valorizados podem variar conforme características particulares de cada localidade onde esses estudos foram aplicados, ainda assim alguns aspectos são apontados como fundamentais.

Ferraz e Torres (2004) indicam doze fatores que podem influenciar a qualidade do transporte público urbano: (i) acessibilidade, facilidade de chegar ao local de embarque e de sair do local de desembarque e alcançar o destino final; (ii) frequência de atendimento; (iii) tempo de viagem no coletivo; (iv) lotação do veículo; (v) confiabilidade; (vi) segurança, em relação a acidentes de trânsito; (vii) características dos veículos, como tecnologia e estado de conservação; (viii) características dos locais de parada, como largura das calçadas e existência de abrigos; (ix) sistema de informações aos usuários; (x) conectividade, facilidade de deslocamento por transporte público entre dois locais quaisquer da cidade; (xi)

comportamento dos operadores; e (xii) estado das vias. Esses fatores são comuns à maior parte dos trabalhos que visam analisar a qualidade do serviço de transporte público urbano.

Em relação ao transporte por ônibus, estudos recentes sugerem que a confiabilidade é o atributo mais importante, que influencia fortemente a elegibilidade do serviço para os usuários. Islam et al (2016) ressaltam que um sistema de ônibus confiável traz benefícios em três etapas interconectadas: menor tempo de espera para os passageiros, o que garante melhor utilização dos veículos, e finalmente, induz menores custos para os operadores do serviço.

O tempo de viagem é um dos atributos mais valorizados, do ponto de vista dos usuários, pois um menor tempo de deslocamento significa mais tempo para outras atividades e representa ganhos em qualidade de vida (TRB, 2013). Em um sentido mais amplo, Tun et al (2017) consideram que a velocidade operacional do sistema é capaz de interferir em outros fatores fundamentais para a qualidade do serviço, como confiabilidade, frequência e conforto. Os autores entendem que ao aumentar a velocidade, a frota de ônibus pode realizar mais ciclos por hora, aumentando a frequência do serviço e reduzindo o tempo de espera. Um aumento na frequência, por sua vez, aumenta a capacidade do sistema (medida em passageiros por hora por sentido) e reduz a densidade de passageiros por viagem, melhorando o conforto.

Um terceiro aspecto apontado pela literatura como determinante para a qualidade do serviço de transporte público é o conforto oferecido aos usuários. Como conclusões de um estudo realizado em Sydney, Tirachini et al (2013) destacam que a relevância de aspectos como número de passageiros no veículo, qualidade dos assentos e suavidade da viagem tende a aumentar ao longo do tempo, pois à medida que a renda da população cresce, os usuários de transporte público tendem a atribuir maior valor ao conforto.

O Quadro 1 resume a revisão de literatura sobre os aspectos que mais afetam a qualidade do serviço de transporte público, sob a perspectiva dos usuários. Os trabalhos listados foram aplicados em diferentes localidades e se utilizam de diferentes ferramentas de análise, mas convergem ao indicar que confiabilidade, tempo de viagem e nível de ocupação do veículo são os aspectos mais valorizados pelos passageiros.

Quadro 1 - Resumo da literatura sobre qualidade percebida pelos usuários do transporte público

Artigo	Local de aplicação	Forma de análise	Resultado: aspectos mais valorizados
Islam et al (2016)	Dhaka, Bangladesh	Utiliza Redes Neurais Artificiais para definir os atributos mais significativos, a partir de uma pesquisa de preferência declarada	Confiabilidade; Frequência; Disponibilidade de assentos.
De Onã et al (2016)	Granada, Espanha	Utiliza árvore de decisão para definir os atributos mais valorizados, a partir de pesquisas de satisfação.	Frequência; Confiabilidade; Tempo de viagem
Tirachini et al (2013)	Sydney, Austrália	Utiliza modelos Logit multinomial para avaliar os efeitos da lotação na qualidade do serviço de transporte público.	Nível de ocupação; Tempo de viagem; Confiabilidade
Barabino e Di Francesco (2016)	Cagliari, Itália	Utiliza a metodologia TRANSQUAL para integrar os pontos de vista de usuários e operadores de transporte.	Tempo de espera; Nível de ocupação; Limpeza
Barabino e Deiana (2013)	Cagliari, Itália	Utiliza a metodologia SERVQUAL para investigar os atributos mais valorizados pelos usuários de transporte público, a partir de pesquisa de satisfação.	Frequência; Confiabilidade; Limpeza.
Redman et al (2013)		Indica os aspectos de qualidade do transporte público que poderiam atrair os usuários do transporte individual motorizado, a partir de uma revisão bibliográfica qualitativa sistemática.	Confiabilidade; Frequência; Tempo de viagem
Jain et al (2014)	Delhi, Índia	Utiliza o método AHP (Analytical Hierarchy Process) para definir os critérios mais importantes para os usuários de transporte público, a partir de pesquisas de satisfação.	Segurança Confiabilidade; Conforto.
Chakrabarti (2015)	Los Angeles, Estados Unidos	Utiliza um arquivo histórico de dados de sistemas de transporte regionais multimodais em tempo real para explorar contextos em que usuários de automóveis usam transporte público para os seus deslocamentos diários.	Tempo de viagem; Frequência; Confiabilidade.
Guirao et al (2016)	Madri, Espanha	Aplica modelos de Análise Fatorial, Análise de Regressão Múltipla e Múltiplas Causas Múltiplos Indicadores a pesquisas de satisfação para identificar a importância atribuída a cada fator.	Confiabilidade; Frequência; Segurança.
Morton et al (2016)	Escócia	Utiliza análise fatorial para identificar os atributos mais valorizados no transporte público, a partir de dados de uma pesquisa de satisfação incorporada à Pesquisa domiciliar escocesa.	Frequência; Acessibilidade; Confiabilidade

2.4 Modelos de simulação e otimização em transportes

Até aqui foram abordados conceitos de rede de transporte público urbano e como seus elementos afetam a qualidade do serviço prestado, principalmente, no que se refere ao atendimento de CAVs. Nesta seção são introduzidas algumas ferramentas que podem auxiliar no planejamento operacional do serviço de transporte público, por meio da identificação de problemas e análise de soluções visando otimizar o sistema.

O papel fundamental do planejamento dos transportes é garantir o atendimento a uma demanda com diferentes propósitos de viagem, em diferentes horários do dia, usando vários

modos, dado um sistema de transporte com uma determinada capacidade operacional. Ferramentas de modelagem que permitam prever como o sistema reagiria a possíveis intervenções podem contribuir efetivamente para o planejamento do serviço de transporte, a partir da análise de desempenho do sistema e identificação de possíveis melhorias necessárias (ORTÚZAR; WILLUMSEN, 2011).

Farias e Borenstein (2014) analisaram diversos trabalhos e concluíram que problemas relacionados à mobilidade urbana e ao transporte público têm atraído o interesse da Pesquisa Operacional devido à complexidade destes problemas e à sua importância em casos práticos da vida moderna. Destaca-se, ainda, que a Pesquisa Operacional tem sido bem sucedida para resolver uma grande variedade de problemas de otimização no transporte público. Esses estudos abrangem temas como: qualidade do serviço, satisfação do usuário, integração de modos de transporte, adequação de infraestrutura, entre outros.

De forma geral, o conceito de otimização consiste em encontrar uma solução ou um conjunto de soluções ótimas para uma determinada função ou conjunto de funções (SARAMAGO; STEFFEN JUNIOR, 2008). Nota-se que essa ideia é especialmente aplicável aos sistemas de transporte, que são sistemas que possuem recursos limitados e, por isso, a sua utilização criteriosa possibilita melhorar o rendimento ou produtividade do sistema. Para esse fim, Marins (2011) indica que alguns métodos matemáticos da Pesquisa Operacional podem ser aplicados, dentre eles a Programação Linear, a Programação em Redes, a Teoria dos Grafos e a Teoria das Filas, que serão introduzidos de forma breve nas próximas subseções.

2.4.1 Conceitos de Pesquisa Operacional

Silva et al (2010) explicam que Pesquisa Operacional (PO) é um método científico de tomada de decisões, que consiste na descrição de um sistema organizado com o auxílio de um modelo, e através da experimentação do modelo, a descoberta da melhor maneira de operar o sistema. Conceitualmente, a PO é uma ciência aplicada que utiliza técnicas científicas conhecidas (ou as desenvolve quando necessário), tendo como ponto de referência a aplicação do método científico.

A pesquisa operacional costuma envolver seis fases: (i) definição do problema de interesse; (ii) formulação de um modelo matemático para representar o problema; (iii) cálculo da solução do problema a partir do modelo; (iv) teste e validação do modelo; (v) estabelecimento de controle para o modelo; (vi) e implementação.

A primeira fase consiste em colocar o problema de maneira clara, definindo os objetivos e os possíveis caminhos para alcançá-los. Devem ser enumeradas as limitações técnicas do sistema e as relações desse sistema com outros, a fim de criticar a validade de soluções que poderiam prejudicar esse equilíbrio (SILVA et al, 2010). Marins (2011) aponta que devem ser definidos, também, os aspectos que estão sujeitos ao controle de quem decide (variáveis de decisão), as limitações a que estão sujeitas essas variáveis (restrições) e os aspectos envolvidos no processo que fogem ao controle de quem decide. A formulação do problema é uma fase crucial para o sucesso do modelo, pois os problemas reais surgem de uma forma bastante vaga e imprecisa.

Uma vez formulado o problema, a etapa seguinte é a construção do modelo. Em PO os modelos são, em geral, modelos matemáticos, isto é, formados por um conjunto de equações e inequações. Silva et al (2010) consideram que um bom modelo tem desempenho suficientemente próximo da realidade e é de fácil experimentação. A fidelidade do modelo aumenta à medida que são incorporadas características da realidade, por meio da adição de novas variáveis, o que aumenta a complexidade do modelo e dificulta sua experimentação. Portanto, é essencial que haja um equilíbrio.

Um modelo matemático de um problema real é uma representação através de expressões matemáticas que descrevem a essência do problema. Cada decisão quantificável deve ser representada por uma variável de decisão ou de controle. As relações e limitações a que estão sujeitas as variáveis de decisão são expressas por meio de equações e inequações, chamadas restrições. O objetivo que se pretende atingir é formulado como uma função (ou mais de uma), colocada em termos das variáveis de decisão, denominada função objetivo (HILLIER; LIEBERMAN, 2013).

A terceira fase da PO é o cálculo da solução através do modelo, feito através de técnicas matemáticas específicas. Por isso, a construção do modelo deve levar em consideração a

disponibilidade de técnicas adequadas para o cálculo da solução (MARINS, 2011; SILVA et al, 2010). Marins (2011) cita diversos métodos matemáticos associados às várias áreas que compõem a PO, como a Programação Linear, a Programação em Redes, a Teoria dos Grafos e a Teoria das Filas. Diversos softwares foram desenvolvidos para tornar mais viável e eficiente a solução de problemas complexos de Pesquisa Operacional.

Uma vez obtida a solução, segue-se para a fase de validação do modelo e da solução. Geralmente, o teste é realizado com dados empíricos. Se houver dados históricos, eles serão inseridos no modelo, resultando em um desempenho que pode ser comparado ao desempenho observado no sistema real. Se o desvio verificado não for aceitável, deve-se reformular o modelo. Caso não haja dados históricos, os dados empíricos, coletados com o sistema funcionando sem interferência, podem ser utilizados (SILVA et al, 2010). Hillier e Lieberman (2013) ressaltam que em cada situação pode ser definida uma sistemática específica para testar o modelo e sua solução. O teste pode indicar deficiências e exigir correções do modelo, seja pelo refinamento de algum aspecto, pela consideração de algum aspecto omitido ou possíveis simplificações do modelo.

A etapa seguinte consiste no estabelecimento de controles da solução. A construção e experimentação do modelo identificam parâmetros fundamentais para a solução do problema. Qualquer mudança nesses parâmetros deve ser controlada a fim de garantir a validade da solução adotada. Caso alguns desses parâmetros sofram desvio além do permitido, pode ser necessário o cálculo de uma nova solução ou até a reformulação do modelo (SILVA et al, 2010).

Por fim, a fase de implementação. É importante que essa fase seja acompanhada para se observar o comportamento do sistema, pois algum ajuste pode ser requerido. Trata-se de uma fase crítica, já que é somente nesta fase que os resultados reais do estudo serão obtidos (MARINS, 2011).

2.4.2 Modelos

Modelos são uma representação simplificada de um sistema real. Villate (2011) define sistema como um conjunto estruturado de elementos entre os quais é possível encontrar

alguma relação de funcionalidade. Os modelos são descrições de um sistema, concebidos através de uma abstração da realidade, ou seja, apenas aspectos relevantes do sistema real são considerados.

É importante ressaltar que não é possível caracterizar todos os problemas de transporte em um modelo universal. Esses problemas e, portanto, suas possíveis soluções, dependem do contexto. Ortúzar e Willumsen (2011) citam algumas características que devem ser levadas em conta na especificação de uma abordagem analítica para problemas e modelos de transporte, entre as quais se pode destacar: precisão e acurácia necessários para o estudo; contexto do problema; nível de detalhe necessário; disponibilidade de dados e de recursos. Onde a acurácia significa o grau em que modelo atinge valores verdadeiros ou aceitáveis em relação ao valor real da variável. E, precisão é o grau de variação de um conjunto de medições, ou seja, quanto maior a precisão, menor a variabilidade entre as medidas.

Dentro do contexto da otimização, espera-se que os objetivos sejam alcançados pelo sistema satisfazendo as restrições impostas. A observação e o acompanhamento do comportamento do modelo, operando com uma determinada solução, são feitos para avaliar se as restrições estão sendo satisfeitas e se os objetivos estão sendo alcançados. Assim, as diferentes alternativas de solução do problema devem ser enumeradas para a definição dos cenários a serem avaliados durante os experimentos de simulação (ARENALLES et al, 2017).

No caso dos estudos de sistemas de transporte, Ortúzar e Willumsen (2011) salientam que a preparação de cenários realistas e consistentes não é uma tarefa simples, uma vez que é imprescindível que as perspectivas de futuro a serem testadas sejam financeiramente viáveis e realistas. Tendo preparado cenários realistas e planos para testes, a mesma sequência de modelos é executada para simular o seu desempenho. A ideia é escolher a alternativa mais atraente que satisfaça a demanda.

Existem diferentes classificações propostas para os modelos de simulação, neste trabalho dividiu-se os modelos em determinísticos, estocásticos, estáticos e dinâmicos. Arenales et al (2017) classifica os modelos determinísticos como aqueles nos quais não se permite variáveis randômicas. Portanto, as características operacionais devem ser relações exatas e não funções de probabilidade. Os modelos determinísticos são menos exigentes computacionalmente que

os modelos estocásticos. Métodos analíticos, como programação linear e aplicações de teoria dos grafos, são mais eficientes que os métodos de simulação na resolução desses problemas.

Modelos são estocásticos quando pelo menos uma das características operacionais é dada por uma função de probabilidade. Geralmente esses modelos são mais complexos que os determinísticos. Deste modo, métodos probabilísticos como simulação e aplicações da teoria das filas são mais adequados como métodos de análise e solução para os modelos estocásticos (ibid).

Os modelos estáticos, em sua maioria completamente determinísticos, não consideram a variável de tempo. Já nos modelos dinâmicos existe uma ordem temporal entre os eventos. Os modelos dinâmicos são classificados de acordo com os instantes de tempo em que as variáveis de estado têm seus valores alterados. Um modelo dinâmico é discreto se todas as variáveis de estado têm seus valores alterados em um número contável de instantes de tempo. Nesse caso, a variável tempo é descrita por números inteiros não negativos. Por outro lado, um modelo dinâmico é contínuo se todas as variáveis de estado têm seus valores alterados a qualquer instante de tempo, a variável tempo é representada por números reais não negativos e o sistema é governado por equações diferenciais. Ressalta-se que um sistema pode ser modelado tanto por um modelo discreto quanto um modelo contínuo (VILLATE, 2011).

Um processo estocástico tem a propriedade de Markov se a informação contida no estado atual do processo é tudo que é necessário para determinar a distribuição de probabilidade dos futuros estados. Portanto, um processo de Markov é um tipo especial de processo estocástico no qual o estado futuro do sistema depende apenas do estado presente e não dos estados passados. Uma cadeia de Markov é um tipo especial de processo de Markov com estados discretos. As cadeias de Markov podem apresentar tempos discretos ou contínuos. Apesar da simplicidade do modelo há uma ampla diversidade de aplicações. A simulação torna-se muito mais simples com a presença da propriedade de Markov, porque isso reduz a quantidade de informações que necessitam ser armazenadas (MEERSCHAERT, 2013).

2.4.3 Programação Linear

Uma das técnicas mais utilizadas na abordagem de problemas de pesquisa operacional é a programação linear (PL), que visa encontrar a solução ótima para problemas que tenham seus modelos representados por expressões lineares. A simplicidade do modelo e a disponibilidade de uma técnica de solução programável em computador facilitam sua aplicação. Problemas comumente tratados em PL são: controle de estoque, mistura de matérias-primas, modelos de equilíbrio econômico, carteiras de investimentos, roteamento de veículos, entre outros. O modelo matemático de programação linear é composto de uma função objetivo linear e de restrições técnicas representadas por inequações também lineares. A construção desse modelo é a parte mais complicada desse estudo, pois não há regra fixa (SILVA et al, 2010).

É muito importante observar as consequências da hipótese de linearidade. Intuitivamente, a linearidade implica que os produtos de variáveis, potências de variáveis e combinação de variáveis não podem ser admitidas no sistema. Contudo, nem todos os processos físicos se comportam dessa maneira (MARINS, 2011). A dificuldade em aplicar PL à análise de desempenho de transporte está justamente na hipótese de linearidade. A linearidade requer que, por exemplo, se for necessário uma hora para transportar 100 passageiros, serão necessárias duas horas para transportar 200. O que nem sempre é verdadeiro.

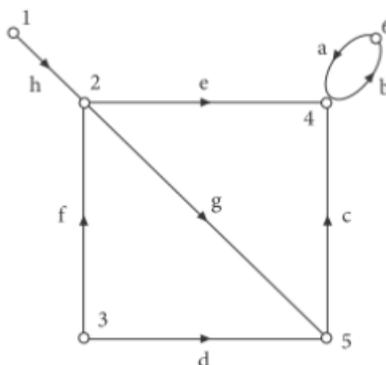
Saramago e Steffen Junior (2008) reiteram a dificuldade no uso da PL em certos problemas ao atestarem que, em engenharia, os problemas geralmente são complexos, não lineares, de difícil representação e descritos por funções nem sempre diferenciáveis. Portanto, os métodos determinísticos, como a PL, ou modelos baseados no cálculo de derivadas, na maioria das vezes, são ineficientes quando aplicados a problemas que apresentam não diferenciabilidade ou descontinuidade, ou problemas onde o espaço de busca é discreto. Assim como, os modelos de programação linear não são adequados devido à não linearidade observada nesses sistemas.

2.4.4 Teoria dos grafos

Um grafo é uma estrutura que corresponde a um par de conjuntos $G = (N, E)$, orientado ou não. Onde: N é um conjunto de entidades, que podem representar pontos, locais, pessoas, áreas geográficas; E é o conjunto de ligações entre os elementos de N . A cada nó de um grafo, e/ou a cada aresta, pode estar associado um peso. Neste caso, diz-se que $G = (N, E)$ é um grafo

valorado (BOAVENTURA NETTO, 2012). A Figura 4 ilustra a representação geométrica de um grafo direcionado e valorado. Outras representações são dadas em forma matricial, mas considera-se que essas definições fogem ao objetivo deste trabalho, por isso, serão apresentados nesta subseção apenas os conceitos básicos da teoria.

Figura 4 - Representação gráfica de um grafo direcionado e valorado



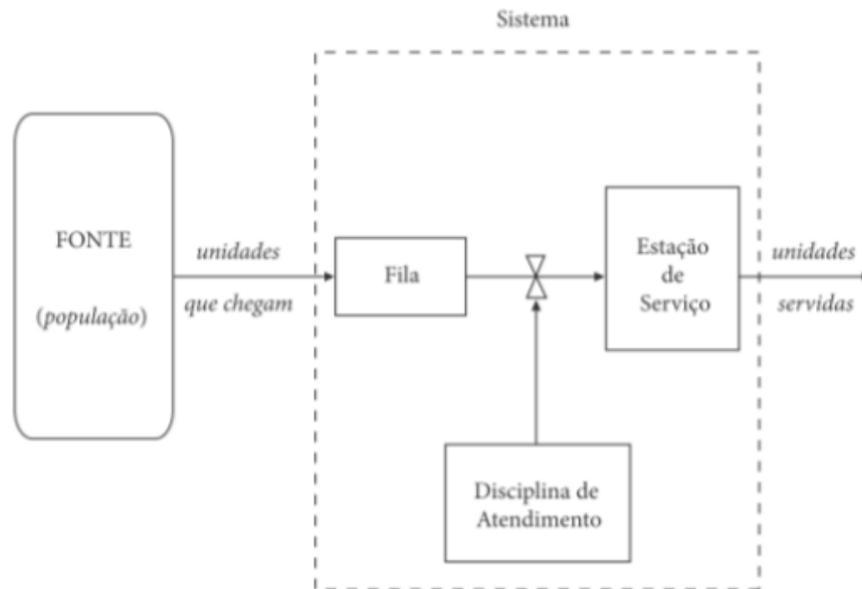
Algumas aplicações importantes desse instrumento são a determinação de um caminho mais curto em um grafo, que devido à sua aplicabilidade prática, é um problema importante em várias áreas, como na área de Logística. Além disso, na análise do desempenho de um grafo valorado é frequentemente necessário calcular o valor ótimo da função do fluxo entre um dos vértices, denominado fonte, e um vértice t , conhecido como destino. Aqui se apresenta a situação em que existe apenas um tipo de fluxo no grafo, que pode ser por exemplo, tráfego. Na literatura especializada, esse tipo de grafo é denominado Rede (MARINS, 2011). Esses exemplos mostram que a representação de um sistema de transporte por meio de grafos orientados valorados pode oferecer uma ferramenta útil de análise de desempenho do sistema.

2.4.5 Teoria das filas

A Teoria das Filas tem como objetivo principal o desenvolvimento de modelos matemáticos que permitam prever o comportamento de sistemas de prestação de serviços. Admite-se que as solicitações ocorrem em instantes aleatórios e que a duração do tempo de atendimento de cada pedido é, também, uma variável aleatória (BELFIORE; FÁVERO, 2013). A Figura 5 ilustra os elementos importantes para a análise de um sistema de filas: população, processo de chegadas de clientes, organização da fila, disciplina de atendimento e processo de atendimento de clientes. Mello (2007) indica que é possível usar estruturas de redes de filas

na construção de modelos utilizados na modelagem discreta. As redes de Petri são exemplos dessas técnicas de modelagem.

Figura 5 - Sistema de filas



Os elementos característicos de um sistema de filas serão discutidos na sequência, de acordo com Hillier e Lieberman (2013):

- Processo de Chegada:

Uma informação relevante na análise de um sistema de filas é o número de indivíduos que solicitaram o serviço no intervalo $(0, t)$, para um tempo $t > 0$. Esse processo de contagem poderá ser feito através da distribuição dos intervalos de tempo entre chegadas sucessivas, ou através da distribuição do número de chegadas em intervalos disjuntos. Em geral, estes intervalos de tempo são variáveis aleatórias, independentes e identicamente distribuídas.

Um caso particular importante, que acontece geralmente nos sistemas de transporte público, é quando a variável aleatória associada ao número de chegadas tem distribuição de Poisson com média λ . Nessa situação particular, a distribuição de probabilidade da variável aleatória intervalo de tempo entre chegadas sucessivas será dada pela distribuição exponencial negativa com média $1/\lambda$.

- Processo de Atendimento:

A principal característica do processo de atendimento é a sua duração, também chamada de tempo de serviço. Em geral, a duração do atendimento é uma variável aleatória com distribuição conhecida, que pode, também, depender do tamanho da fila. Nos modelos mais comuns supõe-se que os tempos de atendimento são variáveis aleatórias independentes e identicamente distribuídas.

O caso particular, mais importante para este estudo, é quando o tempo de serviço tem distribuição de probabilidade do tipo exponencial negativa com média $1/\mu$, similarmente ao que ocorre para o processo de chegadas, nesta situação, o número de atendimentos terá uma distribuição de probabilidades do tipo Poisson com média μ .

- **Disciplina de Atendimento:**

Em um modelo de filas, a disciplina de atendimento define a maneira como os indivíduos que estão requerendo atendimento são selecionados para receber o serviço. Existem várias disciplinas possíveis que são definidas em função das características do sistema. O tipo mais comum, que também representa as filas dos transportes públicos, é aquele no qual o atendimento é feito segundo a ordem de chegada, conhecida como PEPS – Primeiro a Entrar, Primeiro a ser Servido (em inglês FIFO). Outra Disciplina de Atendimento muito comum é conhecida como UEPS – Último a Entrar, Primeiro a ser Servido (em inglês LIFO), que ocorre, por exemplo, em alguns sistemas de estoques e em elevadores lotados.

- **Capacidade do Sistema:**

Em muitos modelos de filas existe uma limitação física para o número de pessoas que podem estar no sistema. Enquanto esta capacidade não for atingida, o funcionamento do sistema é normal, no sentido de que os indivíduos que chegam aguardam na fila até serem atendidos. Já os indivíduos que chegam em instantes nos quais a capacidade está esgotada são recusados.

A partir de grandezas medidas diretamente em um sistema de filas i , como: Período de observação (T); Número de chegadas (A_i); Número de términos (C_i); e Tempo ocupado (B_i), é possível obter quantidades operacionais importantes como:

- A taxa de chegada de clientes ao sistema (λ_i):

$$\lambda_i = \frac{A_i}{T} \quad (1)$$

- A vazão (X_i):

$$X_i = \frac{C_i}{T} \quad (2)$$

- O fator de utilização do serviço (U_i):

$$U_i = \frac{B_i}{T} \quad (3)$$

- O tempo de serviço (S_i):

$$S_i = \frac{B_i}{C_i} \quad (4)$$

As relações entre essas quantidades mantêm-se em várias observações e são chamadas de Leis Operacionais. A Lei de Little é uma importante Lei Operacional que visa determinar variáveis de decisão essenciais para a análise de desempenho como: (i) tempo que um cliente permanece na fila; (ii) número de clientes na fila; (iii) tempo que um cliente permanece no sistema; e (iv) número de clientes no sistema.

- Lei de Little: relaciona o número de usuários no sistema i (Q_i) com o tempo médio que um usuário permanece no sistema (R_i) e a taxa de chegada.

$$Q_i = \lambda_i \times R_i \quad (5)$$

2.4.6 Simulação de modelos dinâmicos

Até aqui foi visto que as soluções analíticas exatas estão disponíveis apenas para alguns casos especiais, como os sistemas lineares. Além disso, os métodos numéricos geralmente não oferecem uma boa compreensão qualitativa do comportamento do sistema. As técnicas gráficas são, então, frequentemente empregadas como pelo menos uma parte da análise desses modelos. Pela simplicidade inerente às técnicas gráficas, associada à sua natureza geométrica,

alguns modelos fundamentais são usados para análise de sistemas dinâmicos, como a análise em estado estacionário (*steady-state*) (MEERSCHAERT, 2013).

A simulação tem se tornado o método mais importante e mais popular de análise de modelos dinâmicos. Arenales et al (2017) e Silva et al (2010) indicam o uso da simulação em dois casos principais. Na análise de sistemas de transporte observa-se a ocorrência de ambos. Primeiro, a solução do problema é muito cara, ou mesmo impossível, através de experimentos no sistema real. Nesse caso, a simulação permite fazer esse experimento através da variação de parâmetros no modelo. Assim, é possível analisar o efeito de mudanças sem correr o risco da construção de um sistema real equivocada, que transformaria os custos dessa construção em prejuízo. O segundo caso ocorre quando os problemas são muito complexos para um tratamento analítico. Especialmente sistemas com características estocásticas podem ter seu comportamento representado com maior fidelidade e realismo por meio do uso da simulação.

Meerschaert (2013) enfatiza que os métodos de solução analítica baseados em equações diferenciais são limitados, pois o fato é que não se sabe como resolver muitas dessas equações. Os métodos qualitativos são mais amplamente aplicados, porém em alguns casos é necessário uma resposta quantitativa com alto grau de acurácia, caso das análises de sistemas de transportes. A maior parte dos modelos dinâmicos que acontecem na prática podem ser simulados com um grau de acurácia razoável. Além disso, as técnicas de simulação são flexíveis, de modo que não é difícil introduzir aspectos mais complexos como tempos e elementos estocásticos do sistema, o que seria muito complicado para tratar analiticamente.

Como conceito, simulação pode ser definida como uma técnica que permite reproduzir o funcionamento de um sistema, com o auxílio de um modelo. A execução desse modelo de simulação em computador pode fornecer resultados mais precisos sem que seja preciso interferir no sistema real. As conclusões da simulação, quando analisadas estatisticamente, produzem informações que podem contribuir na tomada de decisões que visam melhorar o desempenho do sistema em estudo (ARENALES et al, 2017; SILVA et al, 2010).

Os parâmetros definem o cenário de cada simulação e são controlados externamente pelo modelador no início de cada simulação. Podem representar uma configuração específica ou uma determinada política de operação do sistema. Os parâmetros também podem ser sementes

de inicialização dos geradores de variáveis aleatórias independentes. São exemplos destes parâmetros a quantidade e a distribuição da demanda de serviço, o número de usuários em um sistema fechado e a distribuição do tempo entre chegadas de usuários em um sistema aberto (BELFIORE; FÁVERO, 2013).

Embora seja uma arma poderosa e bastante prática, Marins (2011) aponta que a simulação apresenta dois grandes inconvenientes. Em primeiro lugar, não permite o conhecimento mais preciso da estrutura do fenômeno, sendo geralmente válida apenas para o caso particular analisado. Também, pode consumir tempo excessivo de computação, visto que exige a análise de várias configurações, consumindo cada configuração períodos relativamente extensos de processamento. Para Meerschaert (2013), a principal desvantagem da simulação está relacionada à análise de sensibilidade. Sem recursos para uma fórmula analítica, o único jeito de testar a sensibilidade a um parâmetro específico é repetir a simulação toda para diversos valores. O que pode ser muito caro e demorado caso haja muitos parâmetros para testar.

Apesar das dificuldades citadas pode-se afirmar que a simulação é o método mais adequado para muitos problemas complexos demais para serem tratados analiticamente ou cujas soluções não poderiam ser testadas no sistema real, caso dos sistemas de transporte. De forma sintética, a simulação pode ser usada para: (i) estimar distribuição de variáveis aleatórias; (ii) testar hipóteses estatísticas; (iii) comparar cenários representando diferentes soluções para um problema em estudo; (iv) avaliar o comportamento de uma solução analítica.

2.4.7 Modelos de probabilidade

Uma solução para a introdução da variabilidade estatística em modelos dinâmicos consiste na observação e medida de padrões que ocorrem durante um certo período de operação do sistema. Os valores são armazenados e, posteriormente, utilizados como entradas para o modelo de simulação. Pode-se, também, introduzir uma distribuição aleatória nos modelos, o que é mais viável. O modo mais simples de se representar uma distribuição é através do uso de funções de distribuição e funções de densidade de probabilidade (ARENALES et al, 2017). As distribuições mais importantes e mais comumente utilizadas são a distribuição de Poisson e a distribuição Exponencial, que serão brevemente abordadas nesta seção.

A distribuição de Poisson é uma distribuição discreta. Se a duração do intervalo de tempo entre chegadas é exponencialmente distribuída e as chegadas ocorrem uma de cada vez, então o número de chegadas, em um intervalo fixo qualquer, tem uma distribuição de Poisson (MELLO, 2007).

Uma variável aleatória T , que mede o intervalo de tempo entre duas ocorrências consecutivas de um fenômeno de Poisson, tem uma distribuição de probabilidade exponencial. Uma variável de Poisson descreve o número de vezes que ocorre um evento, que certamente ocorrerá muitas vezes, mas que é pouco provável que ocorra em um instante particular de observação. Essa característica é típica de chegadas em filas. A distribuição exponencial pode caracterizar, ainda, o tempo médio de viagem (SILVA et al, 2010). A função de densidade de probabilidade da distribuição exponencial é:

$$f(x) = \begin{cases} \lambda e^{-\lambda x} & \text{se } x \geq 0 \\ 0 & \text{se } x < 0 \end{cases} \quad (6)$$

Onde $x = \Delta t$ é o intervalo de tempo e λ é o número de ocorrências na unidade de tempo de Δt (taxa de ocorrências). A variável T tem média $M(T) = \frac{1}{\lambda}$ e variância $\sigma^2 = \frac{1}{\lambda^2}$.

Uma propriedade importante da distribuição exponencial é a ausência de memória, ou seja, se uma atividade vem ocorrendo há t unidades de tempo, então a probabilidade que esta atividade termine em Δt unidades de tempo é a mesma que se a atividade tivesse começado no instante t , qualquer que seja t . O uso da distribuição exponencial supõe uma grande variância (MELLO, 2007).

Como já foi explicitado, os modelos de probabilidade são resolvidos, geralmente, por simulação. A simulação de Monte Carlo é uma técnica geral de modelagem que pode ser aplicada a qualquer modelo estocástico. A simulação usa dispositivos de aleatorização para atribuir valor a cada variável aleatória, de acordo com sua distribuição de probabilidade. Essa técnica é tipicamente usada para estimar medidas de desempenho do sistema. A simulação de Monte Carlo é o único método viável para modelagem de sistemas estocásticos complexos (MEERSCHAERT, 2013).

Silva et al (2010) ressaltam que o Método de Monte Carlo oferece uma garantia de que, quando um processo de geração aleatória de números é executado para uma grande massa de dados, os valores simulados guardam uma estreita semelhança com os valores reais, no que se refere a variáveis randômicas. Ou seja, a duração média dos números sorteados tende a ser idêntica à duração do processo real.

2.4.8 Métodos de estimação do intervalo de confiança

Para garantir a coerência dos resultados obtidos pelos métodos de análise de desempenho de sistemas devem ser utilizados métodos formais de estimação de intervalos de confiança. Entre os quais pode-se destacar: o método de replicações independentes; o método da divisão em subintervalos; o método regenerativo e o método espectral. Cada um desses métodos pode ser mais apropriado que outro para situações determinadas.

Marsan et al (1994) explicam que, no método das replicações independentes, a simulação é repetida várias vezes, partindo sempre do mesmo estado inicial, variando a sequência de números aleatórios gerados a cada replicação. Normalmente, a sequência de números aleatórios para a segunda replicação começa onde a sequência da primeira replicação terminou, e assim por diante. A média de cada subintervalo é calculada pela divisão do somatório de amostras do subintervalo pelo número de amostras deste intervalo.

O método das replicações independentes tem a propriedade desejável de independência entre as amostras, além disso, o método pode ser usado tanto para análise do estado transitório quanto do estado permanente. A desvantagem é que cada replicação contém um segmento inicial de partida que pode não ser representativo na análise do estado permanente (ibid).

No método da divisão em subintervalos divide-se uma única execução da simulação em subintervalos. Mello (2007) resalta que é necessário tomar precauções na estimação da largura dos subintervalos e quanto ao cálculo em suas fronteiras, pois um mesmo valor não pode entrar no cálculo em dois subintervalos. A vantagem desse método é que pode ser feita uma única execução para obtenção da estimativa, além disso, apenas um período transiente é incluído nos resultados. A desvantagem do procedimento é a dificuldade para o estabelecimento da largura do subintervalo, de forma a torná-lo independente.

O método regenerativo divide uma execução em intervalos chamados ciclos. Um ciclo começa quando um estado específico do sistema é atingido e, neste estado, o comportamento futuro do modelo é independente do comportamento passado. Quando é feito um retorno a tal estado, o ciclo termina e uma observação independente de cada quantidade de interesse é obtida. Ao se definir o ciclo desta forma, se obtém amostras independentes, evitando o problema da covariância encontrado no uso de subintervalos. O único problema desse método pode ser a identificação de um estado de regeneração adequado que é visitado com frequência suficiente durante a execução da simulação (MARSAN et al, 1994).

Mello (2007) aponta que, caso o estado considerado não seja apropriado, o método regenerativo não pode ser aplicado com segurança. O estado deve ser, também, facilmente detectado pela simulação. Por esta razão, os pacotes de modelagem que oferecem o método regenerativo para o cálculo do intervalo de confiança, geralmente, só permitem como estados de regeneração aqueles especificados pelo número de usuários em cada nó, entendendo que características adicionais dos estados são especificadas implicitamente pela linguagem.

Por fim, o método espectral, ao contrário dos demais, não exige que as amostras sejam independentes e identicamente distribuídas, mas leva em consideração a correlação entre os dados. O método espectral permite fazer uma única simulação, além de não necessitar de preocupação com a estimação do estado inicial. Este método se aplica a todas as análises do comportamento de equilíbrio dos modelos simulados, que utilizam redes de fila, sendo independentes da existência, ou não, de estados de regeneração (MELLO, 2007).

2.5 Considerações finais do capítulo

Com a maior parte da população mundial vivendo em áreas urbanas, as questões relativas ao transporte público urbano são de grande relevância para atender às demandas de mobilidade. A rede de transporte urbano está profundamente relacionada com a forma urbana e a estrutura espacial das cidades. Os elementos básicos que constituem o sistema de transporte público urbano são a rede, formada por nós e links; o serviço de transporte primário, executado sobre a rede, as paradas e os terminais; e as funções de suporte, gerenciais, regulatórias,

computacionais, de manutenção, treinamento, etc. As interações entre esses elementos formam o sistema de transporte.

Pode-se considerar que os nós mais densos da rede de transporte urbano são os centros atratores de viagem. De maneira geral, os CAVS são regiões da cidade que atraem um grande número de viagens, causando impacto significativo na circulação viária em seu entorno. Atender à demanda por transportes nas áreas mais densas da rede com qualidade e eficiência é a proposta fundamental do sistema BRT. Esse sistema surgiu como uma alternativa de transporte público que mescla características dos modos ferroviários (como operação segregada do tráfego misto, embarque em nível e pré-pagamento das tarifas) e características dos sistemas de ônibus convencionais (como flexibilidade e baixo custo de implementação).

O BRT tem se tornado cada vez mais popular internacionalmente, especialmente em países em desenvolvimento. Porém, nem sempre esses projetos atingem o desempenho esperado. Mesmo sistemas já consolidados passam a apresentar sintomas de saturação, como superlotação e velocidades operacionais baixas, provocando a insatisfação dos usuários. Diante disso, é possível concluir que, apesar do grande potencial do sistema BRT, ainda são necessários estudos aprofundados sobre análise de desempenho e possibilidades de melhoria.

É essencial, então, entender o papel do planejamento e da operação das redes de transporte público urbano e sua relação com os centros atratores de viagens. Nesse contexto, a modelagem e simulação dos sistemas de transporte é ferramenta fundamental para análise de desempenho, identificação de pontos críticos e projeção de cenários de possíveis intervenções visando à otimização do sistema.

Diversos aspectos do sistema de transporte podem ser tratados com ferramentas de otimização. Neste capítulo foram relacionados alguns dos principais métodos matemáticos provenientes da Pesquisa Operacional que podem ser aplicados aos sistemas de transporte. A partir dessa revisão é possível constatar que para analisar fatores de uma linha de transporte público como tempo de viagem, confiabilidade e conforto, é necessário um modelo dinâmico estocástico, visto que essas variáveis têm características probabilísticas e se modificam com o tempo.

A teoria dos grafos também pode ser aplicada nesta análise como forma de avaliar o sistema através de grafos orientados valorados. Cabe, ainda, nessa análise a aplicação da teoria das filas, já que medidas importantes como tempo de espera, tempo de viagem e número de passageiros no veículo podem ser calculadas através da Lei de Little.

Considerando esses aspectos do sistema a ser estudado, descritos sucintamente, é conveniente o uso da técnica de modelagem em redes de Petri, que permite a análise matemática e a simulação do modelo. Essa ferramenta engloba, também, a teoria dos grafos, pois estrutura o sistema como um grafo orientado valorado. Além disso, a teoria das filas pode ser fielmente representada em redes de Petri. Diante disso, conclui-se que por ser abrangente e envolver todos os métodos necessários, um modelo em redes de Petri é o instrumento mais apropriado para a análise do sistema sob estudo. O capítulo a seguir dedica-se a apresentar os principais conceitos referentes a essa ferramenta.

3 AS REDES DE PETRI

Conforme mostrado no capítulo anterior, muitos paradigmas diferentes foram desenvolvidos para a descrição de sistemas complexos, no entanto, apenas alguns permitem a integração dos conceitos de análise de desempenho e a descrição qualitativa do sistema. As redes de Petri (RdP) são um dos paradigmas que permitem esta integração. Por isso, as RdP podem desempenhar um papel muito importante no ciclo de vida de um sistema, começando das fases iniciais de *design* e planejamento, até o desenvolvimento e a manutenção durante a fase operacional.

Rede de Petri é uma ferramenta de modelagem gráfica e matemática, apresentada por Petri (1966), aplicável para descrição e análise de diversos sistemas, que podem conter processos caracterizados como concorrentes, assíncronos, distribuídos, paralelos, não-determinísticos ou estocásticos. Como ferramenta gráfica, as RdP podem ser utilizadas como um auxílio para comunicação visual similar a fluxogramas, diagramas de bloco e redes. Além disso, *tokens* são usados para simular as atividades dinâmicas do sistema. Como ferramenta matemática, é possível inserir equações de estado, equações algébricas, e outros modelos matemáticos que regem o comportamento dos sistemas.

Ao longo do tempo, consideráveis trabalhos foram realizados para enriquecer o paradigma original, tanto na teoria quanto na aplicação das redes de Petri. E, assim, surgiram muitas novas classes de RdP, que possibilitaram o estudo de sistemas mais e mais complexos. Essas classes são chamadas extensões, pois adicionam às RdP básicas propriedades para modelar comportamentos ou restrições específicos que não podem ser modelados com o paradigma original. Entre elas estão as redes de Petri coloridas, as redes de Petri temporizadas, as redes de Petri priorizadas, entre outras (MURATA, 1989; YEN, 2006; KAAKAI et al, 2007).

Ressaltam-se as extensões com tempos estocásticos, que tornaram possível o uso das RdP para avaliação de desempenho de sistemas, tradicionalmente baseada em abordagens estocásticas. Esses modelos, e seus desdobramentos, são coletivamente chamados de RdP estocásticas (SPN, do inglês *stochastic Petri Nets*).

As redes de Petri estocásticas generalizadas (GSPN, do inglês *generalized stochastic Petri nets*), propostas por Marsan et al (1984), são uma extensão das SPN, na qual o tempo estocástico é misturado com tempos nulos determinísticos, de modo que tanto a evolução temporal quanto a evolução lógica do sistema podem ser descritas adequadamente no modelo.

As subseções a seguir introduzem os conceitos básicos de redes de Petri, GSPN e suas propriedades, e relacionam o uso das RdP como ferramenta de análise no campo dos estudos de transporte urbano.

3.1 Redes de Petri e transporte

Di Febbraro et al (2016) explicam que as redes de transporte urbano são sistemas de grande porte que envolvem pessoas, veículos, tecnologia da informação e estruturas físicas, que interagem de maneira complexa. A dinâmica desses sistemas é, frequentemente, afetada por incertezas. Instrumentos de simulação computacional fornecem algoritmos de controle e otimização, com o objetivo de aumentar a eficiência e a segurança do sistema. Ng et al (2013) ressaltam que, por ser uma ferramenta matemática, as redes de Petri fornecem um meio para análise formal do sistema. Os autores (ibid) analisaram diversos trabalhos que se utilizaram dessa técnica para analisar sistemas de tráfego urbano e, como resultado, constataram que as redes de Petri tem um grande potencial para avaliar o desempenho dos sistemas.

A partir das definições de sistema vistas no capítulo anterior, constata-se que um sistema de transporte urbano pode ser descrito como um sistema dinâmico de eventos discreto (SED), no qual eventos, como chegada e partida de veículos, acontecem de maneira discreta no tempo. Reconhecidamente, as RdP são uma poderosa ferramenta para descrever graficamente e analisar os fluxos e controles em SEDs. O uso de redes de Petri para representar SEDs, tem como vantagens a habilidade de fornecer uma representação visual do comportamento do sistema e um equilíbrio entre poder de modelagem e capacidade de análise, comparado a outros modelos matemáticos (GIGLIO; SACCO, 2016; KAKAI et al, 2007; DI FEBBRARO; GIGLIO, 2005; ABBAS-TURKI et al, 2002; DI FEBBRARO; SACONE, 1998).

Muitos trabalhos usam redes de Petri para estudar questões como programação operacional de linhas de transporte ferroviário, tais como: Giglio e Sacco (2016), Wang et al (2016), Yamada et al (2013), Giua e Seatzu (2008), Bouyekhf et al (2003). É possível encontrar, também, na literatura, pesquisas relacionadas à aplicação das redes de Petri para controle de tráfego urbano, principalmente programação e coordenação semafórica, entre eles Di Febbraro et al (2016), Shi e Huang (2008), Doloti e Fanti (2006), Di Febbraro e Giglio (2005), Di Febbraro e Sacco (2004) Wang et al (1999).

Em relação ao transporte público é possível listar alguns trabalhos importantes. Abbas-Turki et al (2002) desenvolveram uma nova classe de redes de Petri a partir das redes de Petri coloridas, a Rede de Petri VOD, para analisar o problema do planejamento de linhas de transporte público. Essa metodologia, no entanto, não se propõe a analisar aspectos de qualidade de uma linha de transporte público existente, mas auxiliar na definição da frequência e do itinerário das linhas em uma rede de TPU.

O trabalho de Castelain e Mesghouni (2002) utiliza a simulação em redes de Petri temporizadas estocásticas para avaliar o impacto da programação operacional no fluxo de passageiros para serviços de transporte em uma rede multimodal. O modelo não considera aspectos de qualidade do serviço prestado, apenas os fatores de oferta (modos de transporte) e demanda (fluxo de passageiros).

Kaakai et al (2007) apresentam um modelo baseado em redes de Petri híbridas para realizar análise de desempenho de elementos de estações de transporte público como plataformas, escadas e portões, visando evitar acidentes nos horários de pico ou situações de emergência quando a movimentação de passageiros é intensa.

Lopez et al (2011) modelaram o sistema BRT Transmilenio em RdP temporizada determinística, usando abordagem multi-agente, para definir o número de veículos necessários para atender à demanda do horário de pico no menor tempo possível. O modelo usa tempos determinísticos e, por isso, não é apropriado a análise de desempenho proposta neste estudo.

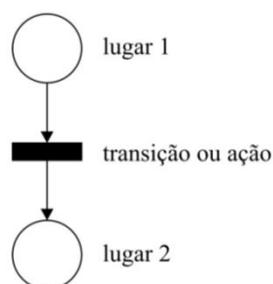
Apesar da análise de sistemas de transporte público usando as redes de Petri ainda não ser muito difundida na bibliografia nacional e estrangeira, a partir dos trabalhos encontrados na

nesta revisão, é possível afirmar que as redes de Petri são adequadas para a modelagem e simulação de sistemas de transporte urbano. Entre as vantagens da modelagem em RdP, destacam-se: (i) facilidade de realizar mudanças na configuração da rede; (ii) ferramenta gráfica simples, o que torna as RdPs ideais para simular sistemas dinâmicos complexos; (iii) versatilidade; (iv) processo de modelagem intuitivo e simples; (v) visualização do número de elementos através do tempo para determinar o comportamento do sistema; (vi) possibilidade de avaliação de diferentes cenários; (vii) ferramenta matemática abrangente, que inclui conceitos de teoria das filas, teoria dos grafos e simulação de sistemas dinâmicos.

3.2 Formulação gráfica

Rede de Petri, introduzida por Petri (1966), é um grafo bipartido, orientado e valorado, cuja ideia fundamental é que as marcas, ou *tokens*, percorram esse grafo segundo eventos. O grafo bipartido de uma RdP possui dois tipos de nós: lugares e transições. O lugar representa o estado da variável que se deseja modelar. A transição representa uma ação realizada pelo sistema, ou seja, um evento. Cada marca é representada por um ponto dentro de um lugar, e muda de localização quando eventos ocorrem nas transições. Cada transição é associada a uma função de disparo, que é a regra que define o tempo entre a habilitação da transição e a execução da ação, ou disparo da transição. O desenho padrão de uma rede de Petri considera que cada lugar é representado por um círculo, e cada transição, por um retângulo, conforme mostrado na Figura 6.

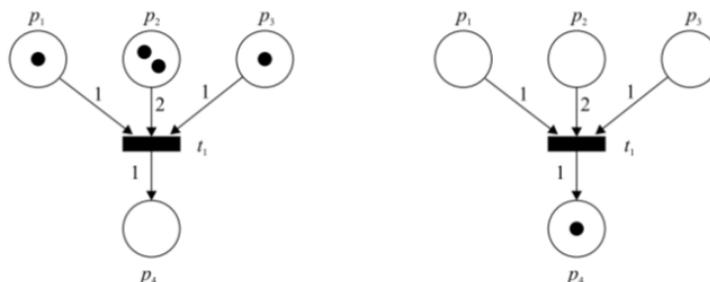
Figura 6 - Representação gráfica padrão de uma rede de Petri



Os arcos fazem a conexão entre lugares e transições, e vice-versa. Um peso é associado a cada arco para indicar o número de marcas necessárias para habilitar a respectiva transição. Então, uma transição torna-se habilitada quando existem marcas suficientes em cada lugar ligado a ela. Por outro lado, os arcos que partem de uma transição indicam quantas marcas são geradas

no lugar de destino, quando a respectiva transição é disparada. Assim, as marcas circulam na direção dos arcos e os lugares se conectam a outros lugares através de transições. A Figura 7 mostra a mudança de estado do sistema depois do disparo de uma transição.

Figura 7 - Estado do sistema com a transição t_1 habilitada, à esquerda, e após do disparo de t_1 , à direita.



Ressalta-se a diferença conceitual entre modelo, sistema e rede. Modelos RdP descrevem um conjunto de sistemas reais e são caracterizados por uma estrutura básica e por uma marcação inicial paramétrica. Uma rede, ou rede de Petri, constitui a estrutura subjacente do modelo RdP como um grafo bipartido, com pesos. Já um modelo RdP no qual a marcação inicial é completamente especificada é chamado de sistema RdP. (MARSAN et al, 1994) No caso da modelagem para análise de desempenho de uma rede de transporte urbano, então, trabalha-se com um sistema RdP. Porém para a construção do sistema, é necessária a elaboração prévia de uma rede e de um modelo.

3.3 Propriedades

Como uma ferramenta matemática, as redes de Petri possuem uma série de propriedades. Nesta seção é apresentada uma visão geral de algumas das mais importantes propriedades comportamentais, do ponto de vista prático, de acordo com as definições de Yen (2006), Wang (2007), Murata (1989) e Marsan et al (1994).

- Alcançabilidade (*Reachability*)

Indica a possibilidade de se atingir uma determinada marcação pelo disparo de um número finito de transições, a partir de uma marcação inicial. Uma marca M_i é dita alcançável a partir de uma marca M_0 se existir uma sequência de disparos de transição que transformam uma marcação de M_0 para M_i . Uma marca M_1 é imediatamente alcançável de M_0 se o disparo de uma transição habilitada em M_0 resulta em M_1 .

A reversibilidade é uma importante propriedade da alcançabilidade. Um sistema RdP é reversível, se e somente se, a partir de qualquer estado alcançável começando de uma marcação M_0 , é possível voltar para a marcação M_0 . A reversibilidade expressa a possibilidade de um sistema RdP voltar infinitas vezes para sua marcação inicial. Nos casos em que se deseja voltar para uma marcação anterior que não é a marcação inicial do sistema, essa marcação anterior é chamada de estado de origem.

- Limitação (*Boundedness*)

Sendo k um número inteiro não negativo, um lugar p é considerado k -limitado se o número de *tokens* em p é sempre menor ou igual a k para toda marca M alcançável a partir de uma marca inicial M_0 . Se um lugar for 1-limitado, este é chamado de seguro. O conceito de segurança é uma particularização do conceito de limitação. Uma rede de Petri é segura se todos os seus lugares forem seguros, isto é, todos os lugares possuem, no máximo, uma marca.

- Vivacidade (*Liveness*)

O conceito de vivacidade é definido em função das possibilidades de disparo das transições, e está fortemente relacionado à situação de *deadlock*, na qual a rede encontra-se impossibilitada de disparar qualquer transição. Para melhor representar os sistemas reais, diferentes níveis de vivacidade para a transição t e marcação M_0 foram definidos. Assim, uma transição t de uma rede de Petri pode ser caracterizada como:

- a) morta (*dead*): a transição nunca pode ser disparada em qualquer sequência de disparos das transições do sistema;
- b) N1-viva: t pode ser disparada pelo menos uma vez em alguma sequência de disparos das transições do sistema;
- c) N2-viva: t pode ser disparada pelo menos k vezes em alguma sequência de disparos das transições do sistema;
- d) N3-viva: t dispara um número infinito de vezes em alguma sequência de disparos das transições do sistema;
- e) N4-viva, ou simplesmente viva: t é N1-viva para todas as marcações alcançáveis.

- Exclusão mútua

Dois lugares p_1 e p_2 são mutuamente exclusivos em um sistema RdP se a contagem de *tokens* não pode ser positiva para ambos em uma mesma marcação. Duas transições são mutuamente exclusivas em um sistema RdP se não puderem ser habilitadas simultaneamente em qualquer marcação.

3.4 Classes

Apesar da generalidade inerente, as principais críticas ao paradigma original das redes de Petri são relacionadas à sua capacidade limitada de representação dos sistemas reais e à sua simplicidade excessiva. Na maior parte das aplicações reais, é desejável que alguns processos tenham prioridade sobre outros, de modo que as ações críticas sejam realizadas com restrições de tempo. Para contornar esses obstáculos, algumas extensões de redes de Petri foram introduzidas a fim de aumentar a capacidade expressiva das redes de Petri originais. Entre elas destacam-se as redes de Petri coloridas, as redes de Petri temporizadas, as redes de Petri hierárquicas, entre outras (YEN, 2006).

As redes de Petri podem ser classificadas em função do tipo e da quantidade de marcas que podem ser associadas aos lugares, como também em função da capacidade dos arcos. A seguir são apresentadas as principais classes de redes de Petri.

- Rede de Petri ordinária:

As redes de Petri ordinárias caracterizam-se pelas suas marcas, que são do tipo inteiro não negativo, enquanto nas redes de Petri não ordinárias as marcas podem ter tipos particulares. Nas redes ordinárias, existe apenas um tipo de marca, o que não permite a diferenciação de recursos em um lugar, sendo necessários lugares distintos para expressar recursos similares (MURATA, 1989).

- Redes de Petri não ordinárias ou de alto nível:

As redes de alto nível são caracterizadas por suas marcas, que são diferenciadas com parâmetros que permitem sua individualização ou mesmo representadas por um conjunto de objetos (WANG, 2007; YEN, 2006; MURATA, 1989). A principal contribuição dessas classes, em relação às redes de Petri ordinárias, é permitir a representação compacta do sistema.

- Coloridas

As redes de Petri coloridas (CPN, do inglês *Colored Petri Nets*) estão incluídas na classe de redes de Petri de alto nível. O principal objetivo das CPNs é a redução do tamanho do modelo, permitindo que marcas individuais representem diferentes processos ou recursos em uma mesma sub-rede. Cada *token* é atribuído a uma cor, que indica o tipo de dado do *token* e um conjunto de cores é atribuído a cada lugar e a cada transição.

- Hierárquicas

O conceito de hierarquia em redes de Petri permite o refinamento de lugares e transições, possibilitando a modelagem de sistemas de grandes dimensões. Do ponto de vista teórico, a hierarquia é apenas uma conveniência gráfica que não adiciona nenhum poder computacional. Contudo, para a modelagem segura de grandes sistemas, é necessário o uso de ferramentas com esses mecanismos. Nessa classe de rede, os lugares e as transições de um nível superior podem ser refinados, ou seja, podem ser sub-redes da sua rede global.

- Redes de Petri Temporizadas

A necessidade de incluir variáveis de temporização nos modelos de vários tipos de sistemas dinâmicos é evidente já que, no mundo real, quase todos os eventos são relacionados ao tempo. A definição de uma rede de Petri temporizada consiste em três especificações: a estrutura topológica, a rotulagem da estrutura e as regras de disparo. A estrutura topológica de uma RdP temporizada geralmente é similar a uma rede de Petri convencional. E sua rotulagem consiste em atribuir valores numéricos a transições, lugares e/ou arcos.

As regras de disparo são definidas de forma diferente, dependendo da forma como a rede de Petri é rotulada com variáveis de tempo. As regras de disparo definidas para uma rede de Petri temporizada controlam o processo de movimentação dos *tokens*. Existem vários tipos diferentes de redes de Petri temporizadas, as mais amplamente utilizadas são a rede de Petri temporizada determinística (DTPN, do inglês *deterministic timed Petri nets*) e a rede de Petri temporizada estocástica (STPN, do inglês *stochastic timed Petri nets*).

Nas DTPNs, os rótulos de tempo determinístico colocados em cada transição denotam o fato de que as transições são frequentemente usadas para representar ações, e as ações levam

tempo para serem concluídas. Em termos estruturais, cada lugar está conectado à entrada de não mais de uma transição e à saída de não mais de uma transição. As STPNs são redes de Petri nas quais tempos de disparo estocásticos são associados às transições. A análise de desempenho baseada em STPN consiste, basicamente, em modelar o sistema e, assim, gerar automaticamente o processo estocástico que rege o comportamento do sistema. Este processo estocástico é, então, analisado usando técnicas estatísticas conhecidas. Para aumentar o poder de modelagem das STPN algumas extensões foram introduzidas, como as redes de Petri estocásticas (SPN, do inglês *stochastic Petri nets*), que são classes de STPN nas quais os tempos de disparo de transição seguem distribuição exponencial negativa.

Partindo da premissa de que nem todas as atividades em um sistema gastam tempo, Marsan et al (1984) propuseram as redes de Petri estocásticas generalizadas (GSPN, do inglês *generalized stochastic Petri nets*), uma extensão das SPN, na qual o tempo estocástico é misturado com tempos nulos determinísticos. Desse modo, tanto a evolução temporal quanto a evolução lógica do sistema podem ser descritas no modelo. A principal evolução da GSPN, em relação à SPN, é a maior facilidade de análise.

De acordo com Murata (1989), as classes de redes de Petri temporizadas estocásticas são especialmente adequadas para análise de desempenho dos sistemas. A partir da análise dessa rede é possível extrair medidas de desempenho como: a probabilidade de uma condição particular ocorrer; o valor esperado do número de *tokens* em um lugar; o número médio de disparos de uma transição em um período de tempo; e o tempo médio para um *token* atravessar um trecho da rede.

Diante do exposto, é possível afirmar que a classe GSPN apresenta características que indicam sua compatibilidade para o estudo de desempenho de uma rede de transporte. Visto que, uma das medidas de desempenho fundamentais para uma rede de transporte, foco deste trabalho, consiste no tempo de viagem, que pode ser modelado em RdP como o tempo que um *token* gasta para atravessar a rede. As seções seguintes detalham os conceitos básicos de GSPN, segundo Marsan et al (1994).

3.5 Formulação matemática

Formalmente, um modelo GSPN é uma 8-tupla: $M_{GSPN} = (P, T, I, O, H, W, PAR, PRED, MP)$. Onde W : é uma função definida no conjunto de transições e $M\pi = (P, T, I, O, H, PAR, PRED, MP)$ é um modelo RdP com prioridades e arcos inibidores, chamado de modelo RdP subjacente, para o qual: P é o conjunto de lugares; T é o conjunto de transições; I, O, H , são as funções que descrevem os arcos de entrada, saída e inibidores, respectivamente; PAR é um conjunto de parâmetros; $PRED$ é um conjunto de predicados que restringem os intervalos de parâmetros; MP é a marcação inicial associada a cada lugar e pode ser um número natural ou um parâmetro que pertence ao conjunto dos números naturais.

As GSPN são uma cadeia de Markov de tempo contínuo (CTMC). A função W permite a definição do componente estocástico de um modelo GSPN. Essa função mapeia as transições para funções positivas reais da marcação GSPN. Assim, para qualquer transição, é necessário especificar uma função $W(t, M)$. Para qualquer transição $t_k \in T$, a quantidade $W(t_k, M)$ é chamada de "taxa" da transição t_k na marcação M se t_k é temporizada, e o "peso" da transição t_k na marcação M se t_k for imediata.

3.6 Transições temporizadas em GSPN

O disparo de uma transição pode descrever o término de uma atividade que consome algum tempo ou a verificação de uma condição lógica. Usa-se transições temporizadas no primeiro caso, e transições imediatas no último. No caso das RdPs temporizadas, a resolução de conflitos depende dos tempos associados às transições e é obtido através da política *race*, que estabelece que quando diversas transições temporizadas são habilitadas em uma marcação M , a transição com o menor tempo associado dispara primeiro.

As transições imediatas disparam assim que são habilitadas e, portanto, tem precedência sobre transições temporizadas. Porém, quando duas ou mais transições imediatas são habilitadas na mesma marcação, deve ser estabelecida alguma regra para ordenar o disparo dessas transições. Dois tipos de regra são usados em situações desse tipo. O primeiro é baseado em uma escolha determinística usando o mecanismo da prioridade. A segunda regra consiste em associar uma função de distribuição de probabilidade discreta ao conjunto de transições conflitantes. De modo que conflitos entre transições imediatas são resolvidos aleatoriamente.

A presença de transições imediatas no sistema induz uma distinção entre as marcações. Marcações nas quais nenhuma transição imediata é habilitada são chamadas tangíveis (*tangible*), enquanto marcações que habilitam pelo menos uma transição imediata são chamadas *vanishing*. Os sistemas RdP temporizados gastam uma quantidade de tempo positiva em marcações tangíveis e uma quantidade de tempo nula em marcações *vanishing*.

Para modelar diferentes comportamentos que acontecem em sistemas reais, diferentes formas de manter o rastro do passado são possíveis através da associação de mecanismos contínuos ou *restart* às transições. No mecanismo contínuo, o *timer* associado à transição mantém o valor presente e continuará depois na contagem regressiva. Já no mecanismo *restart*, o *timer* associado à transição é reiniciado, isto é, seu valor presente é descartado e um novo valor será gerado quando necessário. As políticas de memória definidas a seguir podem ser usadas em modelos RdP temporizados para diferentes propósitos de modelagem.

1. *Resampling*: Em cada disparo de transição, os *timers* de todas as transições temporizadas são descartados. Nenhuma memória fica gravada. Então, novos valores são definidos para as transições que são habilitadas na nova marcação.
2. *Enabling memory*: Em cada disparo de transição, os *timers* de todas as transições temporizadas que estão desabilitadas são reiniciados, enquanto os *timers* das transições temporizadas que não estão desabilitadas mantêm seu valor presente. A memória é gravada com uma variável de habilitação de memória (*enabling memory variable*) associada a cada transição. Essa variável mede o tempo de habilitação da transição desde o instante em que se tornou habilitada pela última vez.
3. *Age Memory*: Em cada disparo de transição, os *timers* de todas as transições temporizadas mantêm seus valores atuais (mecanismo contínuo). A memória é gravada com uma variável de memória de idade (*age memory variable*) associada a cada transição temporizada. Essa variável mede o tempo de habilitação acumulado da transição desde o último instante de em que ela disparou.

Nas GSPN, a associação de tempos aleatórios com fdp (função de densidade de probabilidade) exponencial negativa às transições temporizadas assegura que o comportamento qualitativo do modelo resultante é o mesmo comportamento qualitativo do modelo RdP sem especificação temporal. O uso dessa fdp garante que não seja necessário

nenhum mecanismo para resolução de conflitos: a informação temporal fornece uma métrica que permite essa solução. Assim, as características da fdp exponencial negativa tornam dispensável a distinção das três políticas (*resampling*, *enabling memory* e *age memory*). Nesse caso, se o *timer* é reiniciado ou não, a fdp do tempo remanescente para o disparo é sempre distribuída de acordo com uma fdp exponencial negativa, com a mesma média.

É possível definir uma sequência de transições temporizadas como uma sequência de transições acrescida de um conjunto de valores reais não decrescentes que descrevem os períodos de disparo de cada transição. Essa sequência de transições temporizadas é denotada como: $[(\tau(1), T(1)); \dots; (\tau(j), T(j)); \dots]$. Os intervalos de tempo $[\tau(i), \tau(i + 1)]$ representam os períodos durante os quais o sistema RdP temporizado permanece na marcação $M(i)$. Este tempo de espera corresponde a um período em que a execução de uma ou mais atividades estão em andamento e o estado do sistema não muda.

Os conflitos entre transições imediatas e temporizadas podem causar a interrupção (ou *preemption*) de atividades em andamento, quando alguma situação especial ocorre. No caso de transições temporizadas com grau de habilitação maior que um, é necessária atenção especial às considerações de tempo. Da terminologia da teoria de filas pode-se considerar as seguintes situações:

1. *Single-server semantics*: um tempo de disparo é definido quando a transição é habilitada pela primeira vez e novos tempos são gerados após a transição disparar, se a transição ainda estiver habilitada na nova marcação. Isso significa que conjuntos de *tokens* são processados em série, e que a especificação temporal associada à transição é independente do grau de habilitação.
2. *Infinite-server semantics*: cada conjunto de *tokens* habilitado é processado assim que se forma nos locais de entrada da transição. O tempo de disparo correspondente é gerado neste momento e os *timers* associados a todos esses conjuntos de habilitação são executados até zero, em paralelo. Vários conjuntos de *tokens* são, assim, processados simultaneamente. Pode-se dizer que as especificações temporais globais das transições com esta semântica dependem diretamente de seus graus de habilitação.

A apresentação dessas diferentes semânticas de disparo permite a definição de sistemas RdP que são graficamente simples, sem perder nenhuma das características que permitem a análise de seus comportamentos subjacentes.

A principal razão para a introdução de especificações temporais em modelos RdP é a verificação de índices de desempenho. Isso pode ser feito por meio da simulação. Nessa abordagem, a partir de uma sequência significativa de execuções de uma rede é possível identificar todos os estados (marcações) que satisfazem uma dada condição e adicionar os tempos gastos em cada uma das marcações de interesse. Isso é possível porque a execução do modelo gera estados nos quais o sistema RdP permanece por algum tempo. Para o objetivo deste trabalho, a simulação da RdP será utilizada para a análise de desempenho de uma linha de TPU.

3.7 Modelagem e simulação

Várias etapas devem ser seguidas no estudo de um sistema com abordagem GSPN. Todas as etapas devem ser realizadas com uma ferramenta de *software* adequada, que forneça o ambiente de modelagem GSPN, permitindo a criação e a modificação gráfica do modelo, a definição dos índices de desempenho, a análise estrutural e a análise estocástica do modelo por simulação. Essas etapas são brevemente descritas abaixo.

1. O modelo deve ser construído usando uma técnica estruturada, de cima para baixo ou de baixo para cima, dependendo do sistema a ser modelado;
2. O modelo deve então ser validado;
3. Os índices de desempenho de interesse devem ser definidos em termos de marcações GSPN e disparos de transição;

A simulação de um sistema GSPN para fins de avaliação de desempenho corresponde à geração de um caminho de amostra através do espaço de estados (*state-space*) do sistema e a coleta de medidas em aspectos específicos do comportamento do sistema GSPN. Os sistemas GSPN são adequados para a simulação de eventos discretos em que os eventos que caracterizam as mudanças de estados e os tempos gastos nos estados são os aspectos relevantes mais do comportamento do modelo, caso do sistema de transporte público.

Os eventos no sistema correspondem a disparos de transição e o tempo gasto nos estados deriva da distância temporal entre disparos de transição. A simulação de um sistema GSPN corresponde a identificar um evento atual, que certamente acontecerá dada a marcação atual, bem como os outros eventos que podem acontecer no futuro, dadas as informações fornecidas por essa marcação (eventos programados). O disparo da transição que corresponde ao evento atual produz uma mudança de marcação em que novas transições podem ser habilitadas, e outras transições (que foram habilitados anteriormente) podem se tornar desabilitadas.

A análise estatística dos resultados da simulação pode ser realizada, no caso de GSPN, pelo método regenerativo ou o método de replicações independente, dependendo do caso analisado.

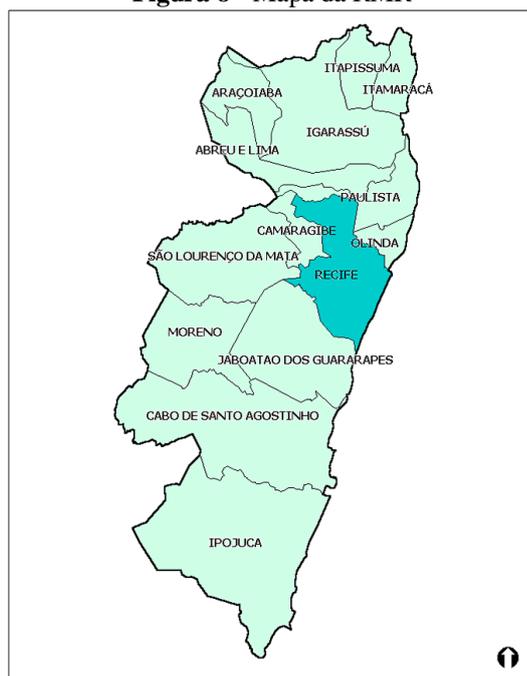
4 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE APLICAÇÃO DO ESTUDO

Este capítulo apresenta a linha escolhida para aplicação do modelo de análise de desempenho desenvolvido ao longo desta dissertação. Para isso, as subseções a seguir demonstram a relevância de estudar tal linha e como esta se insere na rede de transporte urbano da RMR.

4.1 A região metropolitana do Recife

A Região Metropolitana do Recife (RMR), mostrada na Figura 8, é formada por 14 municípios e concentra 42% da população de Pernambuco em 2,81% do território do estado. A área ocupada é de 2.508 km² onde reside uma população de 3,90 milhões de habitantes, o que torna a RMR uma das mais populosas do nordeste brasileiro (IBGE, 2016).

Figura 8 - Mapa da RMR



Fonte: Observatório de Políticas Urbanas e Gestão Municipal – IPPUR/UFRJ (2002)

4.1.1 Importância da capital para a RMR

A redistribuição espacial da oferta de empregos, gerada pelo processo de urbanização, favoreceu a dualidade das regiões metropolitanas, com cidades que exercem influência sobre a região e, também, as chamadas “cidades-dormitório”, que recebem grande parte de seus habitantes somente para o repouso. A falta de oportunidades de trabalho em seu lugar de

residência faz com que o trabalhador seja atraído para as cidades vizinhas, onde a atividade econômica é mais expressiva. Na RMR, em 2013, 26,6% da população economicamente ativa da região trabalhava fora do município de residência (CONDEPE-FIDEM, 2014).

A concentração de empregos formais está localizada na cidade de Recife, que atualmente representa 61,50% do total de postos de trabalho da RMR (MTE, 2017). A Tabela 1 mostra o protagonismo de Recife na economia do Estado, ao relacionar população, quantidade de empresas e número de empregos formais em cada cidade da RMR.

Tabela 1 - Razão entre população e o número de empresas nos municípios da RMR

Município	População estimada 2016	Número de empregos formais *	Número de empresas*	Número de empresas/1000 hab
Recife	1.625.583	509.672	62.301	38,33
Jaboatão dos Guararapes	691.125	100.773	12.692	18,36
Olinda	390.144	72.476	8.923	22,87
Cabo de Santo Agostinho	202.636	31.349	3.862	19,06
Ipojuca	92.965	30.656	2.379	25,59
Paulista	325.590	29.948	4.959	15,23
Igarassu	113.956	15.718	1.542	13,53
Abreu e Lima	98.990	10.400	1.390	14,04
Camaraçipe	155.228	8.904	2.159	13,91
São Lourenço da Mata	111.197	7.677	1.303	11,72
Moreno	61.577	6.418	986	16,01
Itapissuma	26.073	3.885	259	9,93
Itamaracá	25.346	809	316	12,47
Araçoiaba	20.046	247	112	5,59

Fonte: IBGE (2016); MTE (2017).

4.1.2 O principal CAV da RMR

Na seção anterior, foi possível constatar que a cidade do Recife exerce grande atratividade sobre a população da região RMR. Esta análise pode ser aprofundada por meio da investigação da importância econômica das sub-regiões de Recife, cidade dividida em RPAs (regiões político-administrativas), conforme Figura 9. Entre as seis RPAs de Recife, destaca-se a RPA 1 que corresponde à área central da cidade. A RPA 1 é composta por 11 bairros: Recife; Santo Amaro; Boa Vista; Cabanga; Ilha do Leite; Paissandu; Santo Antônio; São José; Coelho; Soledade; Ilha Joana Bezerra (PCR, 2017).

Figura 9 - Regiões Politico Administrativas do Recife

Fonte: PCR, 2017.

A RPA 1 é a região economicamente mais importante de Recife uma vez que abrange o centro administrativo municipal e estadual, representados respectivamente pela Prefeitura da Cidade do Recife (PCR) e pelo Palácio do Governo de Pernambuco; um importante polo médico com grande concentração de empresas do setor de saúde; um centro comercial diversificado com estabelecimentos de diferentes tipos e tamanhos; grande quantidade de empresas do setor bancário; o principal polo de inovação e tecnologia da região, onde se concentram vários empreendimentos dessa natureza; instituições de educação; além de lugares de interesse turístico.

O protagonismo econômico da área central do Recife pode ser comprovado pelo fato de que a RPA 1 possui a menor quantidade de residentes por empresa instalada na região, seguida da RPA 6, cuja razão é quase cinco vezes maior (SEABRA et al, 2016). Demonstra-se, com isso, que os funcionários das empresas instaladas na RPA 1, em geral, precisam se deslocar de outros pontos da RMR, resultando em uma considerável demanda de viagens para esta região.

Além disso, a RPA 1 concentra 43,26% da arrecadação do ISS (Imposto Sobre Serviços de Qualquer Natureza) da cidade de Recife, mesmo cobrando uma taxa inferior à das outras cinco regiões, 2% em contraste aos 5% das outras RPAs (ibid). Esse fato sugere que, apesar de haver poucos residentes na RPA 1, uma quantidade significativa de pessoas procura os

serviços disponíveis nessa região, provando, novamente, a grande atratividade dessa região sobre a população da RMR. Em conjunto, as evidências sugerem que a formação de renda é maior na RPA 1 do que nas outras RPAs, o que justifica a classificação da região como centro comercial, como ilustra a Tabela 2.

Tabela 2 - Razão entre número de empresas e população por RPA

RPA	População residente	Número de empresas	Nº de empresas/1000 hab
1	78.114	25.337	324,35
6	382.650	24.865	64,98
3	312.909	13.264	42,38
4	278.947	11.322	40,58
5	263.778	9.426	35,73
2	221.234	6.188	27,97

Fonte: SEABRA et al, 2016.

Diante da importância socioeconômica comprovada do centro do Recife para a RMR e, conseqüentemente, a expressiva demanda de viagens direcionadas a essa região, conclui-se que essa localidade pode ser considerada, ainda, o maior centro atrator de viagens (CAV) da Região Metropolitana do Recife.

4.2 Transporte urbano na RMR

Desde sua concepção, a rede de transporte urbano da RMR foi pensada para atender essencialmente o centro do Recife, o que é coerente com a importância deste local para a população da RMR. Ao longo dos anos, com o surgimento de outros CAVs relevantes e mudanças na gestão dos transportes coletivos na região, a rede tem sido adaptada, mas ainda apresenta configuração predominantemente radial.

4.2.1 Gestão e operação do serviço de transporte

Até o final dos anos 1970, todas as linhas de transporte coletivo da RMR tinham como destino o centro do Recife. Esses serviços eram diretamente administrados pelas prefeituras ou pelo Governo do Estado, no caso das linhas intermunicipais. O conceito de Sistema de Transporte Público de Passageiros da Região Metropolitana do Recife (STPP/RMR) surgiu no início dos anos 1980 com o zoneamento da RMR em áreas operacionais rádio-concêntricas e o aumento das linhas do tipo interbairros. Na época, a gestão dos serviços de transporte era

feita pela Empresa Metropolitana de Transportes Urbanos do Recife (EMTU/Recife), criada em 1979 (CAVADINHA, 2005).

A EMTU/Recife foi extinta em 2008, com a criação do Grande Recife Consórcio de Transporte, primeira experiência de consórcio de transportes metropolitano de passageiros no Brasil. Hoje o consórcio é responsável pela gestão da rede de transportes públicos da RMR e tem como principais funções planejar e gerir o STPP/RMR, assegurando a qualidade e a universalidade dos serviços, realizar licitações, regulamentar, fiscalizar e atualizar os contratos de concessão de serviços de transporte (GRANDE RECIFE, 2016b).

A Figura 10 mostra a atual configuração espacial da rede de transporte urbano da RMR. Atualmente, a rede é composta pelo Sistema Estrutural Integrado (SEI) e pelo Sistema de Transporte Complementar Metropolitano (STCM). O STPP/RMR transporta em média 2,07 milhões de passageiros por dia, dos quais 65% são usuários do SEI (GRANDE RECIFE, 2013). O projeto é que, gradualmente, todas as linhas passem a integrar o SEI, uma rede de transporte público com linhas de ônibus, BRT e metrô, integradas por terminais fechados que possibilitam que o usuário viaje dentro dessa região pagando apenas uma tarifa (GRANDE RECIFE, 2016c). Os corredores de BRT se integram ao SEI como linhas troncais, que transportam em média 121 mil passageiros por dia (ITDP, 2017).

Figura 10 - Rede de transporte urbano da RMR



Fonte: Grande Recife, 2016c.

4.2.2 Sistema BRT

Com vistas à Copa do Mundo de 2014, realizada no Brasil, foram projetados dois corredores BRT, integrados ao SEI, na RMR. O corredor Norte-Sul atravessa cinco municípios (Igarassu, Abreu e Lima, Paulista, Olinda e Recife) e liga o norte da RMR ao centro do Recife, e o corredor Leste-Oeste perpassa dois municípios (Camaragibe e Recife) conectando o oeste da RMR, também, ao centro do Recife.

ITDP (2017) indica que, em média, metade dos usuários do sistema BRT utiliza os corredores para acessar seus locais de trabalho. Com isso, observa-se que no pico da manhã 80% dos passageiros no corredor Leste-Oeste e 60% dos passageiros no corredor Norte-Sul tem como destino a RPA 1. Os bairros localizados nessa região são apontados como os principais destinos, correspondendo a 38% das viagens no corredor Leste-Oeste e 48% no corredor Norte-Sul. Esses dados corroboram com as informações apresentadas nas seções 4.1.1 e 4.1.2, que definem a RPA 1 de Recife como principal CAV da RMR.

Os corredores BRT têm como objetivo principal reduzir os tempos de viagem até o centro da cidade do Recife. O projeto prevê a operação em corredores fechados, ou seja, apenas veículos do sistema BRT poderiam operar nos corredores (MAIA MELO ENGENHARIA, 2013). Entretanto, é possível observar, em diversos pontos do sistema, BRTs circulando sem prioridade na via. Inclusive, nos casos onde há via segregada verifica-se o compartilhamento desta com ônibus convencionais. A proposta de restrição a outros veículos justifica-se porque quanto mais tipos de veículos circulam no corredor, maior a probabilidade de congestionamentos, e conseqüentemente, perda de velocidade e insatisfação dos usuários.

Atualmente, as principais críticas aos corredores são justamente pelo fato de ter se distanciado do projeto original devido à falta de prioridade na via ao longo do percurso (ITDP, 2017), o que prejudica a qualidade do serviço, uma vez que o sistema fica sujeito a congestionamentos e perde a essência de um sistema BRT.

O projeto do Corredor Leste-Oeste incluía a construção de dois terminais de integração na Avenida Caxangá, o T.I. da III Perimetral e o T.I. da IV Perimetral que, por enquanto, estão inacabados. Além disso, das 26 estações previstas no planejamento, apenas 15 estão funcionando. Conseqüentemente, hoje o corredor atende 64 mil pessoas por dia, volume

bastante reduzido em relação à demanda de projeto para o corredor, de 160 mil pessoas por dia (GRANDE RECIFE, 2016a).

Já o Corredor Norte-Sul opera plenamente, com 29 estações, das quais quatro são terminais de integração. São transportadas diariamente nesse corredor 56 mil pessoas, enquanto, o valor projetado é de 140 mil passageiros por dia (ITDP, 2017). As principais dificuldades enfrentadas no corredor Norte-Sul estão relacionadas aos tempos de viagem, pois ao contrário do que foi projetado, o corredor não é totalmente segregado. Por estar em estágio mais avançado em relação ao corredor Leste-Oeste, este foi o corredor selecionado para este estudo. A Tabela 3 mostra as velocidades operacionais previstas no planejamento original para cada subtrecho do corredor Norte-Sul.

Tabela 3 - Velocidade operacional projetada para o Corredor Norte/Sul

Subtrecho	Velocidade operacional média (km/h)
TI Igarassu – TI Abreu e Lima	33,59
TI Abreu e Lima – TI Pelópidas Silveira	28,45
TI Pelópidas Silveira – TI PE-015	26,32
TI PE-015 – Estação Kennedy	25,29
Estação Kennedy – Estação Tacaruna	23,57
Estação Tacaruna – Estação Treze de Maio	21,03
Trecho Centro	20,41

Fonte: MAIA MELO ENGENHARIA, 2013.

Uma pesquisa realizada por ITDP (2017), com 1.054 entrevistas, das quais 524 foram no corredor Norte-Sul, avaliou a qualidade percebida pelos usuários do sistema BRT na RMR. Em relação ao corredor Norte-Sul, 78% dos usuários consideram uma melhora geral no serviço, quando comparado aos modos utilizados anteriormente. A confiabilidade é um dos atributos com melhores avaliações, considerada por 78% dos entrevistados melhor ou muito melhor que antes. Os usuários relataram, ainda, uma redução média de 31% no tempo de viagem com a implantação do BRT. Já o aspecto com pior avaliação foi a lotação no veículo, considerada por 63% dos respondentes pior ou muito pior do que antes.

4.3 Descrição do trecho em análise

A escolha da linha para aplicação do modelo baseou-se na matriz origem-destino do corredor Norte-Sul no horário de pico da manhã, mostrada Tabela 4, que indica que Paulista e Olinda são os principais municípios de origem, e Recife é o principal destino das viagens nesse corredor. Por essa razão, foi selecionada linha BRT 1976 - Pelópidas (PCR), que começa no

T.I. Pelópidas Silveira, no município de Paulista, e tem como destino a área central de Recife, atravessando o município de Olinda.

Tabela 4 - Matriz Origem-Destino por município da RMR na parte da manhã no corredor Norte-Sul

Origem/Destino	Recife	Paulista	Olinda	Abreu e Lima	Igarassu	Ilha de Itamaracá	Cabo de Santo Agostinho	Itapissuma	Outros
Recife	6%	9%	2%	3%	2%	0%	0%	0%	21%
Paulista	22%	2%	6%	2%	2%	1%	0%	1%	36%
Olinda	18%	1%	0%	2%	1%	0%	0%	0%	21%
Abreu e Lima	6%	2%	0%	1%	0%	0%	0%	0%	9%
Igarassu	5%	1%	0%	0%	1%	0%	0%	0%	7%
Ilha de Itamaracá	2%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	2%
Cabo de Santo Agostinho	0%	1%	1%	1%	0%	0%	0%	0%	2%
Itapissuma	1%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	1%
Outros	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	1%
Total	60%	16%	9%	9%	6%	1%	0%	1%	100%

Fonte: ITDP (2017)

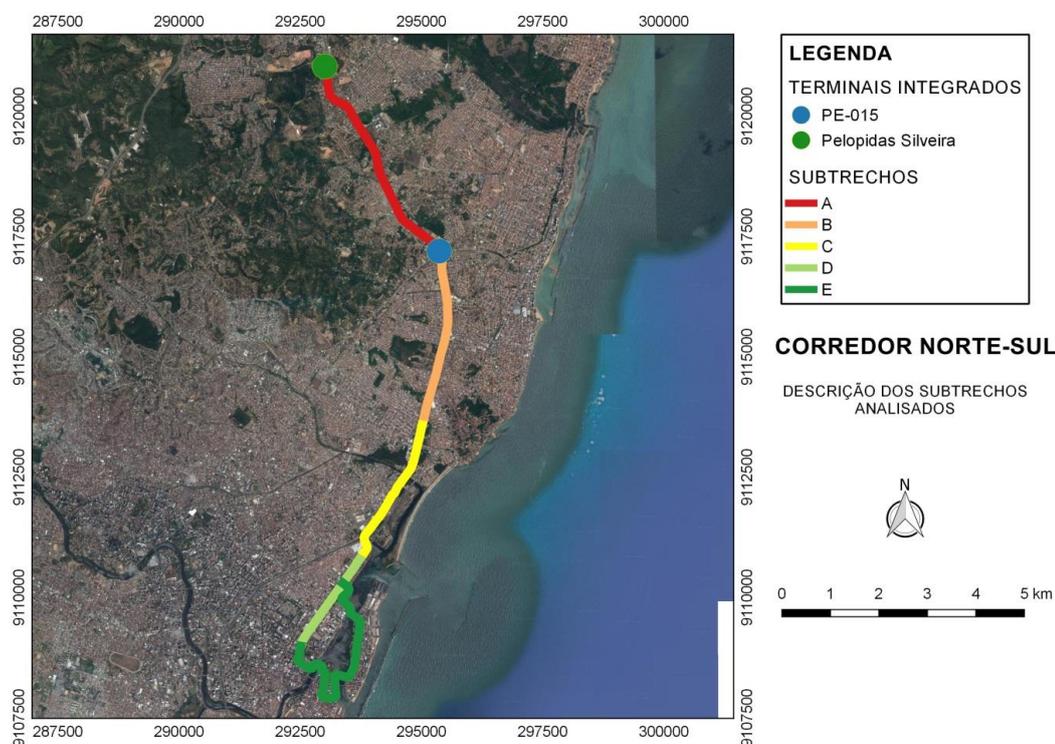
Outro fator determinante para a escolha da linha BRT 1976 é que, entre as linhas com origem no T.I. Pelópidas Silveira esta é a que apresenta maior demanda, e por isso, maior número de viagens diárias e maior frequência. De acordo com Grande Recife (2015), a linha realiza 178 viagens por dia útil, com frequência de seis minutos nos horários de pico. Aqui considera-se o horário de pico da manhã apontado por ITDP (2017) para o corredor Norte-Sul, de 6h às 7h.

O percurso da linha totaliza 31,85 km, ida e volta. Na Figura 11 é possível observar os cinco subtrechos do corredor Norte-Sul que esta linha atravessa. Esses subtrechos são definidos, conforme projeto: (a) entre os terminais integrados Pelópidas Silveira e PE-015, em Olinda; (b) entre o terminal integrado PE-015 e a Estação Kennedy, na Avenida Pan Nordestina; (c) entre a Estação Kennedy e a Estação Tacaruna, na Avenida Cruz Cabugá, já na área central do Recife; (d) entre a Estação Tacaruna e a Estação 13 de Maio; e (e) na área central do Recife.

Cada subtrecho possui características distintas entre si. O primeiro (a), com 4,80 km de extensão e 7 estações intermediárias, opera nas faixas centrais da rodovia estadual PE-015, em via segregada. Apesar de o corredor contar com segregação física das faixas de tráfego comum, ocorrem algumas interferências, por isso considera-se essa operação como ROW B.

O trecho tem 12 retornos e cinco travessias de pedestres, ambos sem sinalização semafórica, e um semáforo para veículos, como mostra Figura 12.

Figura 11 - Apresentação dos subtrechos percorridos pela linha 1976 - T.I. Pelópidas (PCR).

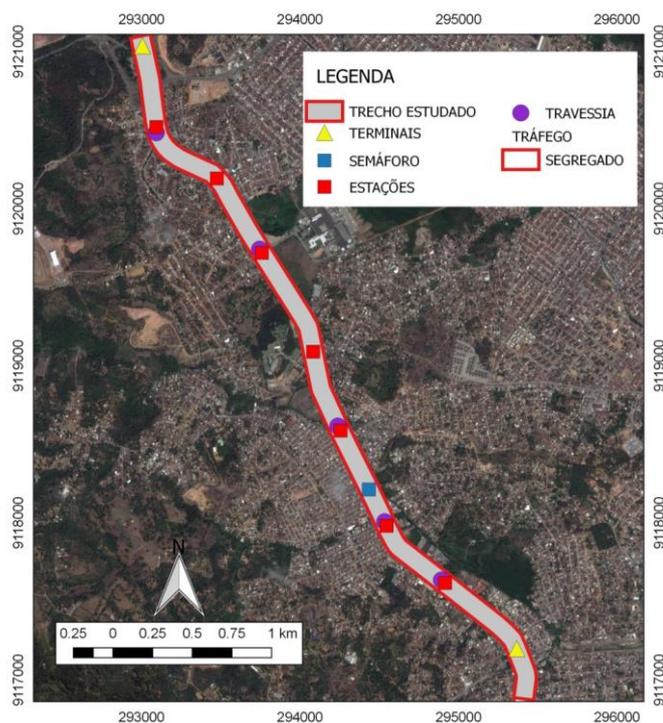


Fonte: Adaptado de Google Earth (2017).

Cada subtrecho possui características distintas entre si. O primeiro, com 4,80 km de extensão e 7 estações intermediárias, opera nas faixas centrais da rodovia estadual PE-015, e em via segregada. Apesar de o corredor contar com segregação física das faixas de tráfego comum, ocorrem algumas interferências, por isso considera-se essa operação como ROW B. O trecho tem 12 retornos não semaforizados, cinco travessias de pedestres, também sem sinalização semafórica, e um semáforo para veículos, como mostra Figura 12.

O subtrecho (b) está localizado na rodovia PE-015 e tem 3,75 km de extensão, dos quais 3,35km são fisicamente segregados do tráfego comum (ROW B), e 0,40km operam em tráfego misto (ROW C). Este subtrecho é composto por quatro estações intermediárias e contém interferências como duas travessias de pedestres e três semáforos, conforme ilustra a Figura 13.

Figura 12 - Subtrecho a



Fonte: Adaptado de Google Earth (2017).

Figura 13 - Subtrecho b



Fonte: Adaptado de Google Earth (2017).

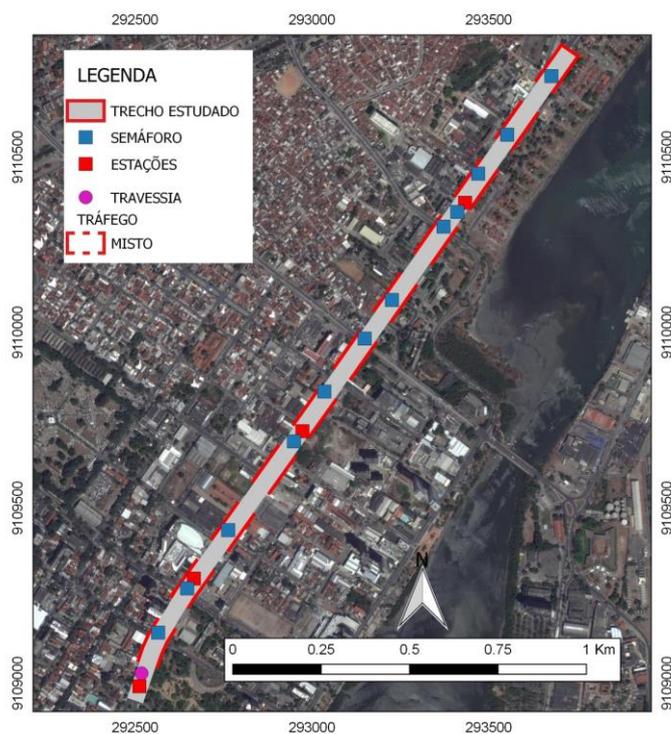
O subtrecho (c), com extensão de 3,20 km e uma estação intermediária, opera parte em rodovia estadual de múltiplas faixas (2,60km) e parte na Avenida Cruz Cabugá (0,60km). Este segmento, mostrado na Figura 14, opera totalmente em tráfego misto (ROW C), e contém três semáforos. Além disso, a estação intermediária apresenta baía recuada, que pode dificultar a volta dos coletivos ao fluxo.



Fonte: Adaptado de Google Earth (2017).

O subtrecho (d) opera completamente na Avenida Cruz Cabugá e sem separação do tráfego comum (ROW C). Este subtrecho tem 2,30 km de extensão, três estações intermediárias e contém algumas interferências como uma travessia de pedestres e 12 semáforos ao longo do segmento. O último subtrecho possui 5,15 km de extensão e está inserido na área central do Recife, onde não há vias segregadas ou faixa exclusiva para os transportes coletivos. O subtrecho (e) conta com 6 estações e 11 semáforos e opera em ROW C. A Figura 15 e a Figura 16 apresentam os subtrechos (d) e (e), respectivamente.

Figura 15 - Subtrecho d



Fonte: Adaptado de Google Earth (2017).

Figura 16 - Subtrecho e



Fonte: Adaptado de Google Earth (2017).

5 METODOLOGIA

Para a realização da análise proposta, foi elaborado um modelo em redes de Petri estocásticas generalizadas (GSPN), cuja simulação produz como resultados os tempos de viagem e de espera médios dos passageiros e o nível de ocupação médio do veículo.

Quanto ao procedimento, pelo menos três fases principais de pesquisa foram identificadas para o desenvolvimento deste trabalho. Primeiro, uma fase com uma abordagem mais teórica do tema. Essa fase inclui a pesquisa bibliográfica acerca dos tópicos mais relevantes para a compreensão da problemática proposta para este estudo. Com base nessa revisão bibliográfica definiram-se as variáveis de interesse, os cenários para simulação e o tipo de modelo mais adequado. As próximas fases apresentam uma abordagem mais prática. A segunda fase trata da escolha do objeto para aplicação do estudo e da coleta de dados em campo. Por fim, a terceira fase refere-se à elaboração e validação do modelo e análise dos resultados gerados.

5.1 Primeira fase metodológica

5.1.1 Definição do modelo, variáveis e parâmetros de interesse

A pesquisa bibliográfica consistiu no levantamento de referências teóricas, publicadas por meios escritos e eletrônicos, sobre os temas relevantes para a pesquisa como os elementos da rede de transporte urbano que afetam o desempenho operacional da rede, os aspectos da qualidade do serviço que são considerados mais relevantes pelos usuários e os métodos que podem ser aplicados para análise de desempenho dos transportes públicos. Com isso, foi definido que o modelo em GSPN é o mais adequado para a análise proposta, por ser uma ferramenta que permite a representação da característica estocástica do sistema, além de ser ideal para análise de SEDs.

Com base na revisão de literatura definiu-se, também, que os parâmetros de interesse para medir o desempenho de uma linha de transporte público são a confiabilidade do serviço, o tempo de viagem e o conforto ofertado aos passageiros, em relação ao nível de ocupação do veículo. Entre os elementos da rede de TPU capazes de afetar os parâmetros de interesse desta pesquisa foram selecionados para avaliação: o tipo de operação de embarque e desembarque,

o grau de prioridade do corredor de transporte público na via e nas interseções, que são os fatores que mais afetam a velocidade operacional do serviço; e a frequência, que é o fator que mais influencia o nível de ocupação do veículo e a confiabilidade do serviço.

5.1.2 Confecção dos cenários para simulação

A verificação do nível de conforto e da confiabilidade do serviço foram realizadas a partir da análise da ocupação média do veículo em cada segmento (l_i) e do tempo médio de espera (t_{esp}) na estação inicial E0. Esses parâmetros foram analisados para a frequência atual do serviço, e então, foram simuladas situações com diferentes frequências para verificar seu valor ótimo. Para análise da velocidade operacional da linha, além da situação atual, foram simuladas as situações: (i) com todas as operações de embarque e desembarque realizadas no mesmo nível do veículo e por quatro portas; (ii) com a linha operando em corredor exclusivo (ROW B) durante todo o percurso; (iii) com todos os semáforos priorizando a passagem dos coletivos; e (iv) com as três situações anteriores simultaneamente.

Para simular a situação (i), a estimativa do tempo de permanência nas estações onde atualmente não há embarque/desembarque em nível foi feita a partir da metodologia de TRB (2013), que estabelece um valor padrão por passageiro de 1,75 segundos, para embarque, e 1,20 segundos, para desembarque em nível e pagamento antecipado da tarifa. O cálculo do tempo de permanência na estação i é dado pela equação:

$$tp_i = t_{af} + p_{e,i} \times t_e + p_{d,i} \times t_d \quad (7)$$

Onde: tp_i é o tempo de permanência na estação i ; t_{af} é o tempo de abertura e fechamento das portas, cujo valor padrão mínimo é 2s; $p_{e,i}$ é a quantidade de passageiros embarcados na estação i na porta mais carregada; t_e é o tempo de embarque por passageiro; $p_{d,i}$ é a quantidade de passageiros que desembarcam na estação i na porta mais carregada; t_d é o tempo de desembarque por passageiro. A metodologia indica, ainda, que para um veículo com quatro portas 35% dos embarques e dos desembarques acontecem na porta mais carregada.

Para as situações (ii) e (iii), o tempo de viagem entre estações foi calculado subtraindo-se os atrasos, mostrados na Tabela 5, do tempo de viagem medido durante a pesquisa de campo.

Tabela 5 - Atrasos causados pelas condições do tráfego de linhas de ônibus

Localidade	Atraso	Via segregada	Via exclusiva	Tráfego misto
Na área central da cidade	Típico (s/km)	44,75	74,56	111,85
	Por semáforo (s/km)	22,37	52,20	0
	Com semáforos mais frequentes que estações (s/km)	55,92 – 74,56	93,21 – 111,85	130,49 – 149,13
Em rodovias fora do centro	Típico (s/km)	0	0	37,28

Fonte: TRB (2013)

Nota-se que para as operações em tráfego misto, quando há menos semáforos do que estações, o tempo perdido nos semáforos não é contabilizado. Entende-se, portanto, que esses atrasos já estão incluídos nos atrasos decorrentes do tráfego misto. Para os semáforos em rodovias arteriais, não explicitados na tabela, considerou-se os atrasos iguais aos da área central.

5.2 Segunda fase metodológica

5.2.1 Definição do objeto de estudo para aplicação do modelo

Para aplicação do estudo, foi selecionada a linha de BRT 1976 que opera na RMR, conforme detalhado no capítulo 4. A Tabela 6 resume as características de cada subtrecho da linha.

Tabela 6 - Caracterização do percurso da linha 1976 - T.I. Pelópidas (PCR)

Interferências	Subtrecho					Total
	a	b	c	d	e	
Terminais Integrados	1	1	0	0	0	2
Estações intermediárias	7	4	2	5	6	24
Retorno sem semáforo	12	-	-	-	-	12
Travessia sem semáforo	5	2	-	1	2	10
Semáforo	1	3	3	12	11	30
Estações em baía recuada	-	-	1	-	-	1
Percurso em Rodovia Estadual (m)	4.800	3.350	2.600	-	-	10.750
Percurso na Avenida Cruz Cabugá (m)	-	-	600	2.200	-	2.800
Percurso no centro do Recife (m)	-	-	-	-	5.150	5.150
Percurso em via segregada (m)	4.800	3.350	-	-	-	8.150
Percurso em tráfego misto (m)	-	400	3.200	2.200	5.150	5.800
Distância total do subtrecho (m)	4.800	3.750	3.200	2.200	5.150	19.100
Distância percorrida total - ida e volta (m)	9.600	7.500	6.400	3.200	5.150	31.850

5.2.2 Procedimento de coleta de dados

A coleta de dados teve como objetivo obter informações sobre a operação atual da linha de transporte público analisada. O procedimento foi realizado em dias úteis comuns no horário de pico da manhã, entre 6h e 7h, nos meses de outubro e novembro de 2017. Na ocasião foram coletadas informações sobre os tempos de viagem e a quantidade de embarques e desembarques em cada estação, em oito das onze viagens programadas para o horário. A contagem de passageiros foi realizada com o auxílio de contadores manuais, a planilha de coleta é mostrada no Apêndice A.

Os tempos de viagem foram medidos, com cronômetro, da seguinte maneira: (i) tempo de aceleração – t_a , do momento em que o veículo começa a se mover até chegar à velocidade de cruzeiro; (ii) tempo em velocidade constante - t_{vc} , do momento em que o veículo atinge a velocidade de cruzeiro até começar a frear; (iii) tempo de desaceleração - t_f , do momento em que o veículo começar a frear até parar completamente na estação; e (iv) tempo de permanência - t_p , tempo em que o veículo permanece parado na estação, que inclui abertura das portas, embarque e desembarque de passageiros e fechamento das portas. O Apêndice B mostra o modelo de planilha de coleta de dados de tempo de viagem.

5.3 Terceira fase metodológica

5.3.1 Descrição do modelo GSPN

Para a elaboração do modelo, as estações foram numeradas de 0 a 24, sendo a estação E0 o T.I. Pelópidas Silveira e a E24, a estação Forte do Brum, no centro do Recife. A grande quantidade de paradas ao longo do percurso, 42 contando ida e volta, poderia resultar em um modelo complexo demais para esta análise. Por isso, como forma de simplificar a elaboração do modelo, o sistema foi dividido em 10 segmentos, que correspondem ao previsto no projeto do corredor, conforme seção 4.3. O Quadro 2 explica a composição de cada segmento.

Os dados coletados para cada estação foram compatibilizados somando-se as medidas obtidas para cada estação do segmento correspondente para cada viagem realizada durante a pesquisa

de campo, e então, calculando-se a média aritmética dessas somas. Por exemplo, para obter o número de embarques correspondente ao S_2 calculou-se a média das somas do número de embarques das estações E1 a E7 das oito viagens realizadas.

Quadro 2 - Segmentos utilizados na modelagem

Segmento	Sentido	Subtrecho	Estações
S ₁	Subúrbio-Cidade	a	Saída de E0 até parada em E1
S ₂	Subúrbio-Cidade	a	Saída em E1 até parada em E7
S ₃	Subúrbio-Cidade	b	Saída em E7 até parada em E12
S ₄	Subúrbio-Cidade	c	Saída em E12 até parada em E14
S ₅	Subúrbio-Cidade	d	Saída em E14 até parada em E18
S ₆	Cidade-Subúrbio	e	Saída em E18 até parada em E24
S ₇	Cidade-Subúrbio	d	Saída em E24, passando por E16, até parada em E15
S ₈	Cidade-Subúrbio	c	Saída em E15 até parada em E13
S ₉	Cidade-Subúrbio	b	Saída em E13 até parada em E8
S ₁₀	Cidade-Subúrbio	a	Saída em E8 até parada em E0

O *software* utilizado para elaboração e simulação do modelo GSPN foi o timeNET (Technische Universität Ilmenau, 2015). As informações de entrada para o modelo são: taxa de chegada de passageiros; tempo de permanência médio nas estações do segmento; tempo de viagem entre os segmentos; e probabilidade de um passageiro desembarcar em cada segmento. As planilhas de cálculo serão apresentadas nos apêndices de C a H.

- A taxa de chegada (TC_i) é o tempo entre chegadas de passageiros ao ponto de embarque, conforme equação (8), onde e_i é o número médio de embarques por viagem no segmento i .

$$TC_i = \frac{\text{headway}}{e_i} \quad (8)$$

- O tempo de permanência (tpp_i) é o tempo médio, por passageiro, em que o veículo fica parado nas estações do segmento i para realização de operações de embarque e desembarque. Calculado conforme equação (9), onde tp_i é o tempo de permanência médio no segmento i e l_i é a ocupação média do veículo ao chegar ao segmento i .

$$tpp_i = \frac{tp_i}{l_i} \quad (9)$$

- O tempo em movimento (tm_{ij}), entre dois segmentos consecutivos i e j , é:

$$tm_{ij} = ta_{ij} + tv_{c_{ij}} + tf_{ij} \quad (10)$$

- A probabilidade de desembarque ($P(d)_i$) é dada pela equação (11), onde d_i é o número de desembarques contabilizado no segmento i .

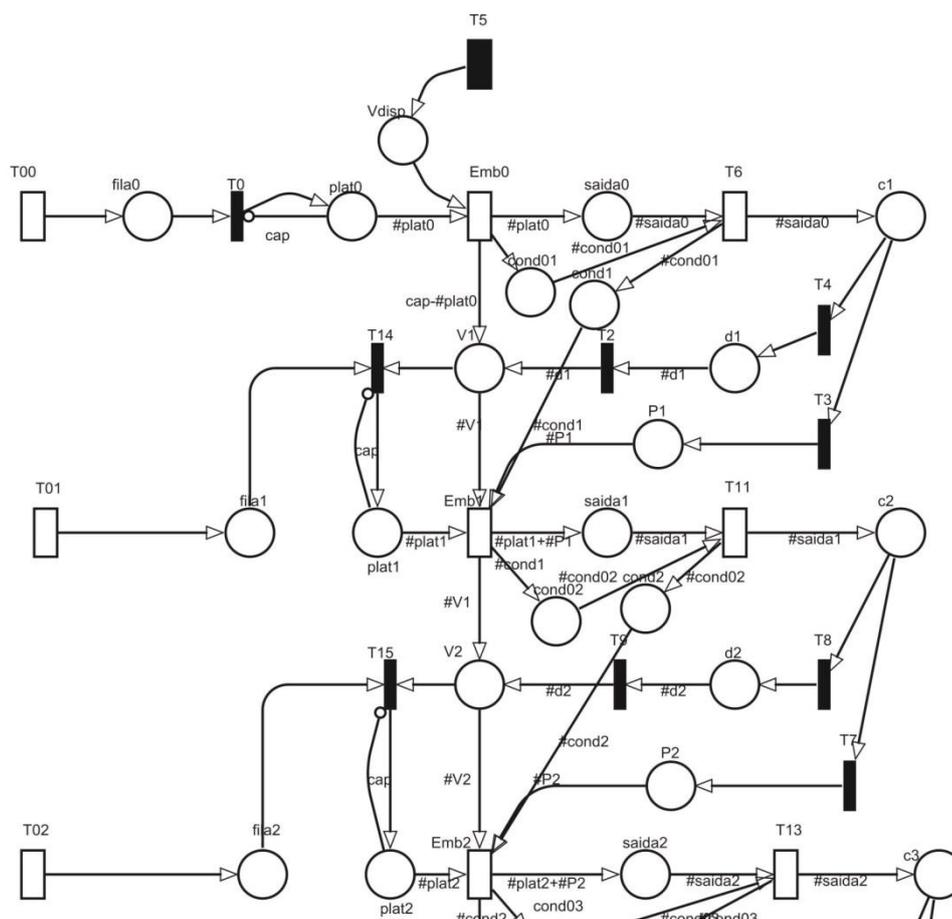
$$P(d)_i = \frac{d_i}{l_i} \quad (11)$$

A Figura 17 mostra parte do modelo elaborado, o apêndice I mostra o modelo completo e o apêndice J detalha a função de cada elemento utilizado na modelagem da linha. A modelagem em GSPN apresenta quatro elementos básicos: os lugares, que representam o estado do sistema; e três tipos de transições.

As transições imediatas foram usadas para incluir eventos importantes para a lógica do sistema, mas que não demandam tempo, como a limitação da capacidade do veículo e a decisão dos passageiros de descer em um determinado ponto ou seguir viagem. Uma transição determinística, cujo tempo de disparo é exatamente predeterminado pelo analista, representa a frequência de chegada de um veículo à estação de partida E0. E as transições exponenciais, cujo tempo de disparo segue uma distribuição de probabilidade exponencial, representam os tempos de chegada de passageiros às estações, de permanência do veículo nas estações e de viagem entre dois segmentos consecutivos. Todas as transições exponenciais tem semântica de disparo *single-server*.

No modelo elaborado, os lugares podem simbolizar a quantidade de pessoas ou de veículos no sistema. Os lugares “filai” representam a quantidade de pessoas que aguardam na fila no segmento i , além do valor da capacidade do veículo, ou seja, que não poderão embarcar imediatamente. Já os lugares “plati” indicam a quantidade de pessoas que aguardam na fila no segmento i , que realmente poderão embarcar. Os lugares “saidai” e “ci” representam a ocupação do veículo no segmento i . Os lugares “di”, “Pi” e “Vi” mostram, respectivamente, a quantidade de passageiros que desembarcam, a quantidade que segue viagem e o número de vagas no veículo quando este chega ao segmento i . O lugar “Vdisp” indica quando um veículo fica disponível na estação E0. Os lugares “cond0i” e “condi” representam o número de veículos em operação no segmento i .

Figura 17 - Parte do modelo GSPN elaborado



A análise do comportamento permanente do sistema é realizada a partir da simulação estacionária (*stationary simulation*) com nível de confiança 95%, valor semente 12.345 e, no mínimo, 50 disparos de cada transição. O método de estimação do intervalo de confiança utilizado é o método espectral.

5.3.2 Análise dos resultados

A simulação do modelo deve gerar como resultados, com intervalo de confiança de 95%, o tempo de espera dos passageiros em S_0 (t_{esp}), a ocupação média dos veículos em cada segmento i (l_i) e o tempo médio de viagem entre os segmentos i e j (t_{ij}). Para isso foram inseridas as equações baseadas na teoria das filas:

$$t_{esp} = (fila0 + plat0) \times TC_0 \quad (12)$$

$$l_i = \frac{\text{saida}_i}{\text{cond0}_i} \quad (13)$$

$$t_{ij} = (l_i \times \text{tpp}_i) + \text{tm}_{ij} \quad (14)$$

Onde fila0 é o número médio de *tokens* no lugar fila0 ; plat0 é o número médio de *tokens* no lugar plat0 ; saida_i é o número médio de *tokens* no lugar saida_i para cada segmento i ; e cond0_i é a quantidade de veículos operando para cada segmento i .

Para validação do modelo, comparou-se os resultados da ocupação média, por segmento, gerados pela simulação da situação atual e os dados coletados em campo. Após comprovada a efetividade do modelo, seguiu-se a análise dos resultados para cada situação proposta.

A análise da confiabilidade do serviço baseou-se nas definições de TRB (2013). Desse modo, um serviço é considerado pontual se os veículos partem do ponto inicial entre 5 minutos de atraso e 1 minuto de adiantamento. Essa definição é melhor utilizada para serviços com headways longos (maiores que 10 minutos). Em headways curtos (menores que 10 minutos), entende-se que atrasos não causam grandes impactos aos passageiros, já que se um veículo atrasar, outro chega em um curto espaço de tempo. Em serviços com headways curtos, considera-se perfeitamente confiável, um serviço no qual o tempo médio de espera dos passageiros é igual à metade do headway.

A ocupação média do veículo foi analisada segundo a metodologia do TRB (2013). Pra isso, primeiro é calculado o espaço disponível para os passageiros que viajam em pé:

$$A_p = [(l - 0,15) \times (c - 2,60)] - (a_c \times q) \quad (15)$$

Onde l é a largura do veículo; 0,15 representa a espessura das paredes; c é o comprimento do veículo; 2,60 representa os perímetros do motor, do motorista e das portas, todos os valores em metros; a_c é a área de cada cadeira, em m^2 ; e q é a quantidade de cadeiras no veículo. A metodologia indica $a_c=0,50 \text{ m}^2$, que inclui a área onde ficam os pés dos passageiros sentados.

O veículo utilizado na linha BRT 1976 é o Viale BRT articulado da Marcopolo, cujo catálogo informa as dimensões: $l= 21$ m; $c= 2,60$ m; $q= 24$. Portanto, $A_p= 33,08$ m². A capacidade máxima do veículo é de 165 passageiros, sendo 48 sentados. A área disponível (A_p) dividida pela ocupação de cada segmento (lot_i) menos a quantidade de passageiros sentados representa o carregamento do veículo. Esses valores podem ser relacionados com a qualidade do serviço ofertado aos passageiros, conforme Quadro 3.

Quadro 3 - Nível de ocupação do veículo

A_p/lot_i (m ² /pessoa)	Nível do serviço
>1,00	A – a maioria dos passageiros pode sentar.
0,50 – 1,00	B – Espaço confortável entre os passageiros.
0,40 – 0,49	C – Confortável, não há contato físico entre os passageiros de pé.
0,30 – 0,39	D – Pouco confortável com contato ocasional entre os passageiros de pé.
0,20 – 0,29	E – Desconfortável, com dificuldades para quem carrega mochilas e bolsas, por exemplo. Prejudica as operações de embarque e desembarque
<0,20	F – limite da capacidade, extremamente desconfortável e prejudicial para as operações de embarque e desembarque.

Fonte: TRB (2013)

A velocidade média foi calculada como a distância entre os segmentos dividida pelo tempo de viagem entre eles. Com isso, foi possível comparar as velocidades resultantes com aquelas previstas no projeto do corredor Norte-Sul, e ainda, com as velocidades consideradas adequadas para serviços de BRT de acordo com o manual do ITDP (2016), acima de 25 km/h.

6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo são elencados os resultados da análise operacional da linha BRT 1976. Esses resultados podem contribuir para o planejamento da rede de transporte público urbano, no sentido de balizar políticas públicas voltadas para a otimização operacional do corredor de transporte público por onde passa a linha analisada, o corredor de BRT Norte-Sul. Essas ações beneficiariam, além da linha em estudo, mais cinco linhas de BRT que circulam no corredor e outras linhas de ônibus convencional, que também usam parte do corredor.

6.1 Dados coletados

Durante as pesquisas de campo, foram realizadas oito das onze viagens programadas para partir do ponto inicial entre 6h e 7h da manhã. Os apêndices C e D apresentam os valores calculados para a média de embarques e desembarques por segmento, respectivamente, com base nos dados coletados para cada estação.

Nota-se que a soma dos dados coletados para algumas viagens apresenta uma grande distorção em relação ao observado nas demais viagens. Nesses casos, seus valores foram excluídos do cálculo da média. Para o embarque, esse procedimento acontece na viagem 8 em S₁; nas viagens 7 e 8 em S₂; na viagem 1 em S₃ e S₆; e na viagem 7 em S₉. Para o desembarque, isso acontece nas viagens 1 e 5 em S₅; e nas viagens 1, 2, 5 e 6 em S₆.

Tabela 7 - Cálculo da taxa de chegada e probabilidade de desembarque por segmento

Segmento	e	TC (s)	l	d	p(d)	1-p(d)
1	136,2857	2,64	136,2857	0,0000	0%	100%
2	38,3333	9,39	165,6190	9,0000	7%	93%
3	26,4286	13,62	115,1726	76,8750	46%	54%
4	4,5000	80,00	109,9226	9,7500	8%	92%
5	7,1250	50,53	87,2143	29,8333	27%	73%
6	27,0000	13,33	39,2143	75,0000	86%	14%
7	3,8750	92,90	37,2143	5,8750	15%	85%
8	4,0000	90,00	40,2143	1,0000	3%	97%
9	25,2857	14,24	53,8750	11,6250	29%	71%
10	15,8750	22,68	32,7500	37,0000	69%	31%

A Tabela 7 mostra como foram calculados os dados de entrada do modelo relacionados à quantidade de passageiros por segmento. A taxa de chegada - TC, em segundos, corresponde

ao inverso do quociente entre o número de embarques por viagem “e” e o headway da linha. E a probabilidade de desembarque “p(d)” em um segmento é o número médio de desembarques “d” dividido pela ocupação média do veículo no segmento “ l_i ”.

Os dados mostram que o principal ponto de embarque de passageiros é na E0 que, por ser o ponto de partida da linha, não tem desembarques. Enquanto a maior parte dos desembarques acontece nos segmentos 3 e 6. O segmento 3 engloba o T.I. PE-015, onde muitos passageiros realizam transbordo para completar suas viagens em outras linhas de ônibus. Já o segmento 6 corresponde à área central do Recife, destino da maior parte dos passageiros da linha BRT 1976. Reiterando, novamente, o papel do centro enquanto principal CAV da região. Nos segmentos que representam o sentido cidade-subúrbio, observa-se que a ocupação do veículo é menor, isso porque esta análise se restringe ao horário de pico da manhã, período no qual o maior fluxo de viagens segue em direção ao centro do Recife.

Os apêndices E, F, G e H apresentam os valores calculados de tempo de permanência, aceleração, desaceleração e em velocidade constante por segmento, com base nos dados coletados para cada estação. Conforme esses dados, a Tabela 8 mostra o cálculo dos dados de entrada do modelo relacionados ao tempo de viagem.

Tabela 8 - Cálculo do tempo de viagem entre os segmentos e do tempo de permanência em cada segmento

Segmento	ta (s)	tvc (s)	tf (s)	tm (s)	tp (s)	l	tpp (s)
1	49,2500	23,1250	10,6250	83,000	109,0000	136,286	0,79979
2	61,2500	268,0000	114,0000	443,250	103,0000	165,619	0,621909
3	71,5000	380,8750	85,7500	538,125	104,1250	115,173	0,904078
4	23,8750	317,0000	29,0000	369,875	27,7500	109,923	0,25245
5	42,8750	418,7500	64,3750	526,000	71,2500	87,214	0,816953
6	70,0000	848,3750	106,8750	1025,250	111,6250	39,214	2,846538
7	16,0000	188,2500	21,8750	226,125	24,3750	37,214	0,65499
8	11,0000	149,0000	21,5000	181,500	20,8750	40,214	0,519094
9	39,5000	298,8750	85,1250	423,500	82,1250	53,875	1,524362
10	57,3750	281,0000	139,7500	478,125	83,7500	32,75	2,557252

Observou-se que o maior tempo de viagem ocorre no segmento 6, área central do Recife, segmento mais longo do percurso com 5,15 km. Entretanto, o segmento 10 tem 4,80 km de extensão e apresenta um tempo de viagem muito menor em relação ao segmento 6. Isso se deve ao tratamento preferencial dado ao transporte público no segmento 10, que não ocorre no segmento 6.

6.2 Validação do modelo

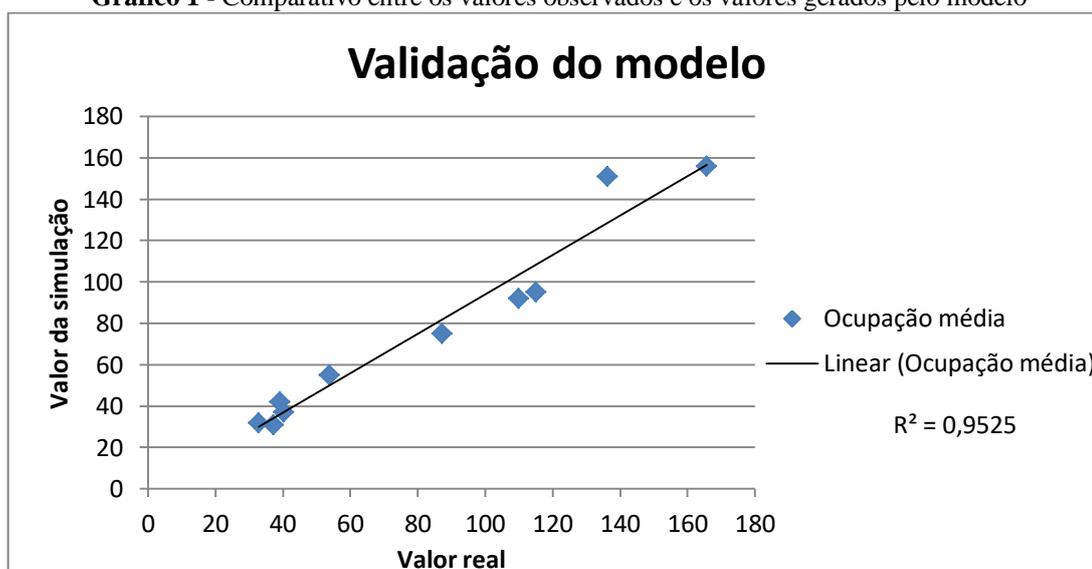
Para testar e validar o modelo de simulação desenvolvido nesta dissertação, os valores de ocupação média do veículo em cada segmento observados em campo foram comparados com os valores gerados pela simulação do modelo, como mostra a Tabela 9.

Tabela 9 - Comparativo entre os valores observados e os valores gerados pelo modelo

Segmento	Ocupação (l)		Diferença percentual
	Valor real	Valor da simulação	
1	136	151	11%
2	166	156	-6%
3	115	95	-18%
4	110	92	-16%
5	87	75	-14%
6	39	42	7%
7	37	31	-17%
8	40	37	-8%
9	54	55	2%
10	33	32	-2%

A partir dessa análise, constatou-se que a diferença percentual máxima entre o resultado gerado na simulação e o valor observado em campo é de -18%. Levando em consideração que o sistema modelado é bastante complexo e afetado por muitas variáveis (comportamento individual das pessoas, situação dos veículos e do trânsito, condições do tempo e estado das estruturas físicas), como apontam Di Febbraro et al (2016), a dinâmica desses sistemas é geralmente afetada por incertezas. Com base nesses fundamentos, a diferença percentual aferida entre valores observados e resultantes de simulação é considerada aceitável.

Além da diferença percentual, outros parâmetros foram examinados para validação do modelo. O valor do coeficiente de determinação (R^2), maior que 95%, mostrado no Gráfico 1, demonstra o elevado poder de explicação do modelo. Além disso, a linha de tendência, apresentada no mesmo gráfico, indica a proximidade e convergência entre os valores reais e obtidos pelo modelo de simulação.

Gráfico 1 - Comparativo entre os valores observados e os valores gerados pelo modelo

Os parâmetros analisados comprovam que o modelo desenvolvido, portanto, está devidamente validado. O modelo é efetivamente capaz de representar o comportamento do sistema e poderá, então, ser utilizado para realização de análise de desempenho do sistema e dos efeitos de possíveis interferências.

6.3 Análise da situação atual

Com o modelo validado, foram analisados os resultados gerados para o perfil atual de operação da linha.

6.3.1 Confiabilidade

A simulação mostra que o tempo médio de espera no ponto inicial da linha é 244 segundos, que corresponde a aproximadamente 4 minutos. O headway da linha é de 6 minutos, portanto, o tempo de espera ideal seria 3 minutos. Esse resultado indica a formação de fila na E0, o que reflete a situação constatada nas pesquisas de campo. No horário de pico analisado, a movimentação é intensa e o tempo de permanência é alto no ponto inicial da linha, pois é nesse ponto onde há a maior demanda.

6.3.2 Conforto

A Tabela 10 classifica o nível de conforto dos passageiros para o tipo de operação atual da linha BRT 1976. Na coluna “ l_i ” é mostrada a ocupação média do veículo ao sair do segmento i . Observa-se, portanto, que até a saída do segmento 4, que representa o subtrecho Kennedy-Tacaruna no sentido subúrbio-cidade, último antes da chegada ao centro do Recife, a viagem é um pouco desconfortável para os passageiros mas não chega a prejudicar a qualidade do serviço prestado. A partir desse ponto, com o desembarque de muitos passageiros no centro e a baixa demanda no sentido cidade-subúrbio no horário de pico analisado, a ocupação média do veículo diminui e o nível de serviço passa a ser “A”.

Tabela 10 - Conforto na situação atual

	Segmento	l_i	A_p/l_i (m ² /pessoa)	Nível de serviço
Sentido subúrbio-cidade	1	151	0,32	D
	2	156	0,31	D
	3	95	0,70	B
	4	92	0,75	B
	5	75	1,23	A
Sentido cidade-subúrbio	6	42	-	A
	7	31	-	A
	8	37	-	A
	9	55	4,73	A
	10	32	-	A

Os resultados mostraram-se bastante coerentes com o que foi observado nas pesquisas de campo. O segmento 3 inclui o T.I. PE-015, onde a quantidade de desembarques é expressiva devido à possibilidade de integração com outras linhas de ônibus, principalmente no caso de passageiros que desejam ir à zona sul do Recife. Por isso, a partir desse segmento a ocupação média do veículo diminui consideravelmente e o nível de serviço passa de “D” para “B”.

Destaca-se, também, que o segmento 6, que representa a área central do Recife, marca o início do sentido cidade-subúrbio. Ao longo desse segmento, 86% dos passageiros que estão no veículo desembarcam e poucos embarques acontecem, como mostra a Tabela 7. No horário de pico da manhã, que foi analisado neste estudo, a demanda por viagens em direção ao centro é predominante. Com isso, nos segmentos que representam o sentido cidade-subúrbio, a maioria dos passageiros podem viajar sentados, o que garante uma viagem confortável segundo o critério aqui utilizado.

Com base nesta análise foi possível comprovar que, em relação ao conforto ofertado aos usuários, o nível de serviço é considerado adequado em todo o percurso da linha BRT 1976, mesmo nas situações com maior ocupação, caso dos segmentos 1 e 2.

6.3.3 Tempo de Viagem

Os valores gerados pela simulação para os tempos médios de viagem entre os segmentos (t_{ij}) para o tipo de operação atual da linha estão expostos na Tabela 11. Os resultados refletem fielmente a situação constatada nas pesquisas de campo. A velocidade média do percurso total da linha, maior que os 25 km/h estabelecidos como critério para que um sistema de BRT seja considerado de bom desempenho por ITDP (2016), demonstra que o corredor apresenta um bom nível de qualidade nesse aspecto. Além disso, o corredor consegue superar a velocidade operacional definida em seu projeto original. Esses resultados sugerem que o corredor atende às condições necessárias para que seja classificado como um corredor de bom desempenho. Ressalta-se, no entanto, a importância da avaliação por segmento para a identificação dos pontos críticos do corredor.

Tabela 11 - Velocidades na situação atual

Sentido	Segmento	t (s)	Distância (km)	Velocidade (km/h)	Velocidade de projeto (km/h)
subúrbio-cidade	1	179	0,50	10,05	26,32
	2	536	4,30	28,88	26,32
	3	646	3,75	20,90	25,29
	4	394	3,20	29,24	23,57
	5	594	2,20	13,33	21,03
	Velocidade média			24,70	25,49
cidade-subúrbio	6	1106	5,15	16,76	20,41
	7	276	1,00	13,04	21,03
	8	212	3,20	54,34	23,57
	9	499	3,75	27,05	25,29
	10	574	4,80	30,10	26,32
	Velocidade média			29,15	23,62
Velocidade média do percurso total				26,81	24,04

No sentido subúrbio-cidade, a velocidade média está ligeiramente abaixo do padrão. Esse fato se deve, principalmente, às baixas velocidades apresentadas pelos segmentos 1 e 5. A velocidade insatisfatória obtida para o segmento 1 pode ser atribuída ao tempo de permanência do veículo no ponto inicial da linha, estação E0, em média maior que o tempo de

deslocamento até a estação E1. Isso ocorre devido à intensa movimentação de passageiros na E0 nesse horário, pois é nesse ponto onde há a maior demanda de todo o percurso. Retomando as principais características de um sistema BRT, elencadas por Lindau (2013), possivelmente, o tipo de operação de embarque realizado na E0, por três portas à direita do veículo e com dois degraus, é uma das causas do elevado tempo de permanência. Essa hipótese corresponde ao cenário 1 a ser simulado, como descrito na seção 5.1.2.

Já a baixa velocidade atingida no segmento 5, que representa a Avenida Cruz Cabugá sentido subúrbio-cidade, pode ser consequência da falta de prioridade para os coletivos, já que o segmento 5 opera totalmente em tráfego misto. Além disso, ao longo dos 2,20 km do segmento existem 12 semáforos, uma média de um semáforo a cada 180 metros, o que impede o desenvolvimento de uma velocidade de cruzeiro apropriada para o sistema.

No sentido cidade-subúrbio, a velocidade média atinge os 29 km/h, valor considerado muito bom. Esse resultado reproduz o que acontece no sistema real, visto que, neste caso, a viagem acontece no contra fluxo do horário de pico analisado. Destoam dessa elevada velocidade média, as baixas velocidades alcançadas nos segmentos 6 e 7, que representam o centro do Recife e a Avenida Cruz Cabugá sentido cidade-subúrbio, respectivamente. A deficiência encontrada nos segmentos 6 e 7, reflete a dificuldade imposta ao trânsito dos coletivos nesses trechos, onde o há muitos semáforos e não há faixa exclusiva para o transporte público.

Chama atenção a excelente velocidade operacional atingida no segmento 8, que representa o subtrecho Kennedy-Tacaruna no sentido cidade-subúrbio, apesar da falta de faixa exclusiva. Há apenas duas estações neste segmento, o que exige poucas paradas, e sua operação acontece em rodovia estadual, que induz velocidades médias maiores em relação à área central do Recife. Além de que, no sentido cidade-subúrbio, não há congestionamento no horário analisado, já que o maior fluxo das viagens acontece no sentido contrário.

De forma geral, os resultados mostram que o corredor consegue atingir boas velocidades operacionais médias, tanto para o sentido subúrbio-cidade quanto para o sentido cidade-subúrbio, porém, em alguns segmentos, é possível melhorar ainda mais essa operação.

6.4 Proposta de otimização para confiabilidade e conforto

Os resultados obtidos para a confiabilidade e conforto para a situação atual comprovam o bom desempenho da linha sob esses aspectos. A função “*experiment*” do timeNET foi utilizada para verificar como a variação do parâmetro “headway” afeta a ocupação média do veículo por segmento e o tempo médio de espera no ponto inicial da linha BRT 1976. Foram analisados os headway entre 120 segundos e 420 segundos, como mostra a Tabela 12.

Tabela 12 - Ocupação média e tempo médio de espera de acordo com o headway

headway (s)	l ₁	l ₂	l ₃	l ₄	l ₅	l ₆	l ₇	l ₈	l ₉	l ₁₀	tesp (s)
120	48	58	43	34	27	19	12	18	18	14	115
180	54	88	73	56	45	22	16	19	25	15	137
240	83	114	134	76	51	26	30	28	48	21	189
300	110	146	84	87	59	29	33	35	66	26	236
360	158	154	116	92	117	38	30	34	55	30	243
420	187	165	210	120	134	47	45	51	67	39	309

Observa-se que, para os headways de 120 e 180 segundos, a ocupação média do veículo é muito baixa, caracterizando uma viagem muito confortável para os passageiros, que podem viajar sentados. No entanto, não se pode desconsiderar o fato de que essa situação geraria um alto custo operacional para o sistema de transporte público. A otimização visa tornar a operação mais eficiente e, apesar do máximo conforto alcançado nessa configuração, as viagens seriam onerosas para o sistema, gerando uma situação de ineficiência. Portanto, essa situação de ociosidade não é apropriada para um sistema de média capacidade em horário de pico.

Os níveis de serviço A e B, que indicam viagens altamente confortáveis para os passageiros, são coerentes quando se trata dos segmentos no sentido cidade-subúrbio, que nesta análise representam o contra fluxo. No entanto, esses níveis de serviço podem representar uma subutilização do serviço quando se apresentam nos segmentos no sentido subúrbio-cidade, onde há uma demanda intensa no horário analisado. O nível de serviço D, considerado satisfatório para os usuários, representa um limite do conforto dos passageiros, pois a partir do nível E já existe uma situação de desconforto indesejável. A Tabela 13 mostra o nível de serviço para dos headways acima de 180 segundos.

Tabela 13 - Nível de serviço de acordo com o headway

headway= 240 s				headway= 300 s			
Segmento	Ocupação (loti)	Ap/loti (m ² /pessoa)	Nível de serviço	Segmento	Ocupação (loti)	Ap/loti (m ² /pessoa)	Nível de serviço
1	83	0,95	B	1	110	0,53	B
2	114	0,50	B	2	146	0,34	D
3	134	0,38	D	3	84	0,92	B
4	76	1,18	A	4	87	0,85	B
5	51	11,03	A	5	59	3,01	A
6	26	-	A	6	29	-	A
7	30	-	A	7	33	-	A
8	28	-	A	8	35	-	A
9	48	-	A	9	66	1,84	A
10	21	-	A	10	26	-	A
headway= 360 s				headway= 420 s			
Segmento	Ocupação (loti)	Ap/loti (m ² /pessoa)	Nível de serviço	Segmento	Ocupação (loti)	Ap/loti (m ² /pessoa)	Nível de serviço
1	158	0,30	D	1	187	0,24	E
2	154	0,31	D	2	165	0,28	E
3	116	0,49	C	3	210	0,20	E
4	92	0,75	B	4	120	0,46	C
5	117	0,48	C	5	134	0,38	D
6	38	-	A	6	47	-	A
7	30	-	A	7	45	-	A
8	34	-	A	8	51	11,03	A
9	55	4,73	A	9	67	1,74	A
10	30	-	A	10	39	-	A

Considerando a capacidade máxima do veículo, que é de 165 passageiros, demonstra-se que a frequência atual da linha BRT 1976 é o mais apropriado em relação ao conforto. Visto que valores menores poderiam indicar uma situação de ociosidade, onerando o sistema, e headways maiores ultrapassariam o limite da capacidade e atingiriam níveis de serviço prejudiciais à qualidade do serviço prestado ao usuário.

No que se refere à confiabilidade do sistema, os resultados obtidos mostram uma diferença de, em média, um minuto em comparação com a situação ideal (metade do headway). No entanto, por se tratar de uma linha com headway menor que 10 minutos, considera-se que a confiabilidade do sistema não é prejudicada, apesar do tempo de espera moderadamente maior que o ideal. A pesquisa realizada por ITDP (2017) confirma que, do ponto de vista dos usuários, a qualidade do serviço não é afetada. Nessa pesquisa, 78% dos entrevistados

indicaram a confiabilidade como melhor do que antes da implantação do corredor BRT. Portanto, ratifica-se que o headway atual, de 360 segundos ou 6 minutos, está de acordo com as necessidades de conforto e confiabilidade dos passageiros da linha BRT 1976.

6.5 Proposta de otimização para tempo de viagem

Para a otimização dos tempos de viagem foram analisados quatro cenários com diferentes formas de operação do corredor. O ideal seria que todas as medidas propostas pudessem ser implantadas e, assim, a linha BRT 1976 poderia atingir seu melhor desempenho, garantindo a qualidade no serviço para os usuários. Verificou-se, porém, que algumas medidas operacionais podem ser mais efetivas do que outras, como mostram as subseções a seguir.

6.5.1 Cenário 1

No cenário 1 a proposta é que todas as operações de embarque e desembarque aconteçam pelas quatro portas da esquerda e no mesmo nível do veículo. Isso implica modificações nos terminais integrados Pelópidas Silveira e PE-015, representados pelas estações E0 e E8, onde atualmente essas operações ocorrem por três portas no lado direito do veículo e com dois degraus.

Para simular a operação proposta neste cenário, foram inseridos novos tempos de permanência para os segmentos 1, 3 e 9. Para isso foram calculados os tempos médios de permanência nas estações E0 e E8, de acordo com a equação (9), e em seguida, foram somadas as médias das estações que compõem os segmentos 1, 3 e 9. As médias foram, então, inseridas no modelo. As Tabela 14 e Tabela 15 mostram as etapas de cálculo.

Tabela 14 - Cálculo dos tempos de permanência nas estações E0 e E8 no cenário 1

Estações	$t_{ar}(s)$	e	$p_{e,i}$	$t_e(s)$	d	$p_{d,i}$	$t_d(s)$	$tp_i(s)$
E0	2	136,286	47,70	1,75	0	0	1,20	85,475
E8 subúrbio-cidade	2	8,875	3,11	1,75	57,88	20,26	1,20	31,743
E8 cidade-subúrbio	2	11,625	4,07	1,75	8,00	2,80	1,20	12,480

Tabela 15 - Cálculo dos tempos de permanência dos segmentos 1, 3 e 9 no cenário 1

Sentido	Segmento	Estações	tp _i (s)
subúrbio-cidade	1	E0	85,475
		Total	85,475
	3	E8	31,743
		E9	15,750
		E10	15,125
		E11	17,500
cidade-subúrbio	9	E12	16,000
		Total	96,118
		E12	12,250
		E11	11,000
		E10	12,125
cidade-subúrbio	9	E9	18,250
		E8	12,480
		Total	66,105

Com as modificações nos tempos de permanência nas estações E0 e E8, os tempos médios de viagem entre os segmentos gerados pela simulação são mostrados na Tabela 16.

Tabela 16 - Velocidades no cenário 1

Sentido	Segmento	t (s)	Distância (km)	Velocidade (km/h)	Velocidade de projeto (km/h)
subúrbio-cidade	1	164	0,50	10,98	26,32
	2	560	4,30	27,64	26,32
	3	628	3,75	21,50	25,29
	4	390	3,20	29,54	23,57
	5	582	2,20	13,61	21,03
	Velocidade média			23,61	25,49
cidade-subúrbio	6	1116	5,15	16,61	20,41
	7	251	1,00	14,34	21,03
	8	202	3,20	57,03	23,57
	9	485	3,75	27,84	25,29
	10	561	4,80	30,80	26,32
	Velocidade média			29,87	23,62
Velocidade média do percurso total				27,13	24,04

Assim como na situação atual, a velocidade média do percurso total simulada para o cenário 1 sugere que o corredor atenderia às condições necessárias para que seja considerado um sistema de BRT de bom desempenho, superando, inclusive, a velocidade operacional projetada para o corredor. Nota-se, no entanto, que no sentido subúrbio-cidade, a velocidade operacional ainda é menor que a de projeto, além de ficar abaixo dos 25 km/h.

Ao contrário do que se poderia esperar, os resultados da simulação sugerem que os efeitos dessa mudança operacional nos terminais não apresentam reflexos consideráveis na velocidade operacional média da linha. Em comparação com a situação atual, os ganhos seriam de 1% em cada sentido e de 2% na velocidade operacional do percurso total da linha. O tempo de um ciclo de ida e volta da linha passaria de, em média, 1h23min para 1h22min. Além disso, as baixas velocidades obtidas nos segmentos 5, 6 e 7 persistem neste cenário.

Apesar da importância das plataformas de embarque e desembarque estarem no mesmo nível do veículo evidenciada na revisão de literatura sobre os sistemas BRT, essa análise permite constatar que as operações de embarque e desembarque diferenciadas nos terminais de integração não representam um impedimento significativo para que a linha BRT 1976 atinja um desempenho satisfatório, sob a perspectiva da velocidade operacional.

6.5.2 Cenário 2

No cenário 2, trabalhou-se com a hipótese de que todo o percurso da linha BRT 1976 fosse realizado em ROW B, com a adoção de faixa exclusiva nos segmentos onde atualmente não há separação entre o tráfego comum e o transporte público. Para isso, foram calculados novos tempos de viagem conforme mostra a Tabela 17.

Tabela 17 - Tempo em movimento – cenário 2

Segmento	Extensão total (km)	Extensão em tráfego misto (km)	t - situação atual (s)	atrasos (s)	tm - cenário 2 (s)
1	0,50	0,00	83,00	0	83,00
2	4,30	0,00	443,25	0	443,25
3	3,75	0,40	538,13	14,916	523,21
4	3,20	3,20	369,88	119,328	250,55
5	2,20	2,20	526,00	82,038	443,96
6	5,15	5,15	1025,25	192,044	833,21
7	1,00	1,00	226,13	37,290	188,84
8	3,20	3,20	181,50	119,328	62,17
9	3,75	0,40	423,50	14,916	408,58
10	4,80	0,00	478,13	0	478,13

Destaca-se que, na situação atual, o segmento 8 já atinge uma velocidade operacional considerada bastante elevada. Devido a isso, no caso desse segmento, manteve-se o valor dos

dados coletados para a situação atual, pois nota-se que uma redução resultaria em uma velocidade operacional demasiadamente elevada que não condiz com a realidade. Com as modificações nos tempos de viagem nos segmentos de 3 a 9, exceto o 8, os tempos médios de viagem entre os segmentos gerados pela simulação são mostrados na Tabela 18.

Tabela 18 - Velocidades no cenário 2

Sentido	Segmento	t (s)	Distância (km)	Velocidade (km/h)	Velocidade de projeto (km/h)
Subúrbio-cidade	1	182	0,50	9,89	26,32
	2	545	4,30	28,40	26,32
	3	637	3,75	21,19	25,29
	4	273	3,20	42,20	23,57
	5	501	2,20	15,81	21,03
		Velocidade média		26,98	25,49
Cidade-subúrbio	6	935	5,15	19,83	20,41
	7	213	1,00	16,90	21,03
	8	200	3,20	57,60	23,57
	9	485	3,75	27,84	25,29
	10	556	4,80	31,08	26,32
		Velocidade média		31,11	23,62
		Velocidade média		29,30	24,04

A velocidade operacional média simulada para o cenário 2 indica que o corredor atenderia às condições necessárias para que seja considerado um sistema de BRT de bom desempenho. Em comparação com a situação atual, o ganho em velocidade operacional no percurso total da linha seria de aproximadamente 9%. Enquanto, comprando-se o cenário 2 com o cenário 1, o primeiro representaria um aumento de 8% na velocidade operacional média do percurso total da linha. O tempo de um ciclo de ida e volta da linha seria, em média, 1h16min.

A análise das velocidades operacionais médias no sentido subúrbio-cidade, sentido de maior demanda no horário, sugere um aumento mais expressivo de velocidade em relação ao sentido cidade-subúrbio. Nesse caso, o aumento foi de 9% em relação à situação atual, frente a 7% de aumento no sentido contrário. Os segmentos onde a velocidade mostra maior crescimento são os segmentos 4, 5, 6 e 7, que são exatamente aqueles onde atualmente a operação em tráfego misto impõe restrições à velocidade do transporte público.

A partir dessa análise pode-se afirmar que a prioridade para os coletivos na via é capaz de melhorar efetivamente a operação do sistema de transporte público, ratificando o que foi

definido na revisão bibliográfica apresentada na seção 2.2.2. O aumento da velocidade operacional, principalmente no sentido subúrbio-cidade, superando a velocidade operacional de projeto, afeta fortemente a qualidade do serviço ofertado aos passageiros, visto que é nesse sentido que encontra-se o maior fluxo de viagens e o maior congestionamento no horário. É possível, inclusive, que a velocidade alcançada pelo transporte público consiga chamar atenção dos usuários de carro particular.

6.5.3 Cenário 3

O cenário 3 prevê uma situação na qual todos os coletivos tem prioridade de passagem nos semáforos durante o percurso. Para isso, foram calculados novos tempos de viagem conforme mostra a Tabela 19. Assim como no cenário 2, para este cenário o valor dos dados coletados para a situação atual foi mantido no segmento 8, pois nota-se que o segmento já atinge uma velocidade operacional elevada e uma redução no tempo de viagem resultaria em uma velocidade operacional demasiadamente alta que não condiz com a realidade.

Tabela 19 - Tempo em deslocamento – cenário 3

Segmento	quantidade de estações	Quantidade de semáforos	Tipo de circulação	Atraso (s)	t - situação atual (s)	t - cenário 3 (s)
1	1	0	Faixa exclusiva	0	83,000	83,000
2	7	1	Faixa exclusiva	52,20	443,250	391,050
3	5	3	Faixa exclusiva	52,20	538,125	485,925
4	2	3	Tráfego misto	52,20	369,875	317,675
5	5	12	Tráfego misto	149,13	526,000	376,870
6	6	11	Tráfego misto	149,13	1025,250	876,120
7	2	5	Tráfego misto	149,13	226,125	76,995
8	2	3	Faixa exclusiva	52,20	181,500	181,500
9	5	3	Faixa exclusiva	52,20	423,500	371,300
10	8	1	Faixa exclusiva	52,20	478,125	425,925

Com as modificações nos tempos em movimento de todos os segmentos, exceto 1 e 8, os tempos médios de viagem entre os segmentos gerados pela simulação são mostrados na Tabela 20. A velocidade operacional média simulada para o cenário 3 indica que o corredor atenderia às condições necessárias para que seja considerado um sistema de BRT de bom desempenho. Em comparação com a situação atual, o ganho em velocidade operacional no percurso total da linha seria de aproximadamente 12%. Enquanto, comparando-se o cenário 3

com o cenário 1, o primeiro representaria um ganho de 10%, e comparando-se o cenário 3 com o cenário 2, o ganho seria de apenas 2% na velocidade média do percurso total da linha.

Tabela 20 - Velocidades no cenário 3

Sentido	Segmento	t (s)	Distância (km)	Velocidade (km/h)	Velocidade de projeto (km/h)
Subúrbio-cidade	1	184	0,50	9,78	26,32
	2	501	4,30	30,90	26,32
	3	592	3,75	22,80	25,29
	4	341	3,20	33,78	23,57
	5	434	2,20	18,25	21,03
Velocidade média				26,63	25,49
Cidade-subúrbio	6	1078	5,15	17,20	20,41
	7	101	1,00	35,64	21,03
	8	203	3,20	56,75	23,57
	9	453	3,75	29,80	25,29
	10	505	4,80	34,22	26,32
Velocidade média				32,50	23,62
Velocidade média do percurso total				29,93	24,04

Esse foi o cenário que proporcionou o maior aumento na velocidade operacional da linha. No sentido subúrbio-cidade o aumento, em relação à situação atual, foi de 12%, assim como no sentido cidade-subúrbio. Observa-se, a partir dessa análise, que o principal obstáculo para que a linha BRT 1976 atinja maiores velocidades operacionais e, com isso, melhore a qualidade oferecida aos passageiros, são os semáforos existentes ao longo do percurso da linha.

6.5.4 Cenário 4

O cenário 4 mescla os três cenários apresentados até aqui. A proposta é que o sistema BRT possa operar com embarques e desembarques nos terminais do mesmo modo que ocorre nas estações, ROW B durante todo o percurso e prioridade nos semáforos. A Tabela 21 mostra os dados inseridos no modelo. Assim como nos cenários 2 e 3, para este cenário no segmento 8 o valor dos dados coletados para a situação atual foi mantido. Com as modificações inseridas, os tempos médios de viagem entre os segmentos gerados pela simulação são mostrados na Tabela 22.

Tabela 21 - Tempo em deslocamento – cenário 4

Segmento	Quantidade de estações	Quantidade de semáforos	Tipo de circulação	Extensão total (km)	Extensão em tráfego misto (km)	atraso (s)	t – situação atual (s)	t – cenário 4 (s)
1	1	0	Faixa exclusiva	0,50	0,00	0	83,000	83,00
2	7	1	Faixa exclusiva	4,30	0,00	52,200	443,250	391,05
3	5	3	Faixa exclusiva	3,75	0,40	67,116	538,125	471,01
4	2	3	Tráfego misto	3,20	3,20	171,528	369,875	198,35
5	5	12	Tráfego misto	2,20	2,20	231,168	526,000	294,83
6	6	11	Tráfego misto	5,15	5,15	341,174	1025,250	684,08
7	2	5	Tráfego misto	1,00	1,00	186,420	226,125	188,84
8	2	3	Faixa exclusiva	3,20	3,20	171,528	181,500	181,500
9	5	3	Faixa exclusiva	3,75	0,40	67,116	423,500	356,38
10	8	1	Faixa exclusiva	4,80	0,00	52,200	478,125	425,93

Os resultados da Tabela 22 indicam que o corredor atingiria uma velocidade operacional considerada muito boa, podendo atender às expectativas da demanda em relação ao tempo de deslocamento. Em comparação com a situação atual, o ganho em velocidade operacional no percurso total da linha seria de aproximadamente 22%.

Tabela 22 - Velocidades no cenário 4

Sentido	Segmento	tempo de viagem (s)	Distância (km)	Velocidade (km/h)	Velocidade de projeto (km/h)
Subúrbio-cidade	1	159	0,50	11,32	26,32
	2	489	4,30	31,66	26,32
	3	579	3,75	23,32	25,29
	4	221	3,20	52,13	23,57
	5	350	2,20	22,63	21,03
Velocidade média				31,96	25,49
Cidade-subúrbio	6	793	5,15	23,38	20,41
	7	211	1,00	17,06	21,03
	8	204	3,20	56,47	23,57
	9	431	3,75	31,32	25,29
	10	515	4,80	33,55	26,32
Velocidade média				33,33	23,62
Velocidade média				32,73	24,04

No principal sentido para esta análise, o sentido subúrbio-cidade, o ganho em velocidade operacional se mostrou bastante expressivo, 34% em comparação com a situação atual. Destacando-se, o segmento 5, que consegue superar a velocidade projetada, o que não acontece nos cenários anteriores. Apenas nesse segmento a velocidade operacional aumenta aproximadamente 69%. Esse resultado indica que é possível melhorar consideravelmente a operação do corredor Norte-Sul.

No cenário 4, a velocidade operacional no segmento 6 aumentou 39%, conseguindo superar a velocidade projetada para o trecho. O segmento 7, entretanto, apesar do aumento significativo de 30% na velocidade operacional, não atingiu o valor previsto no projeto. Isso ocorre, possivelmente, porque o segmento tem apenas 1,00 km de extensão, o que dificulta a execução de velocidades maiores. Nesse contexto, é possível afirmar que a velocidade operacional nesse segmento é bastante satisfatória.

No sentido cidade-subúrbio, a velocidade operacional aumentou 14% em relação à situação atual. Por ser um sentido com menor demanda e menor ocorrência de congestionamentos, no horário de pico analisado, o sentido cidade-subúrbio alcança, em todos os cenários, velocidades operacionais, em média 22%, maiores do que o sentido subúrbio-cidade. No cenário 4, no entanto, essa diferença foi reduzida para apenas 4%, indicando uma operação mais equilibrada e com menor interferência das condições do tráfego.

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Possíveis melhorias na qualidade de uma linha de transporte público poderiam beneficiar tanto as empresas operadoras, por meio da redução dos custos operacionais, quanto os usuários e a sociedade em geral, visto que, a longo prazo, um serviço de transporte público de qualidade poderia causar uma redução do uso do automóvel particular, e consequentemente, uma redução na poluição e nos congestionamentos. Nesse contexto, ferramentas de análise de desempenho de linhas de transporte público são fundamentais para a identificação de pontos críticos da operação e proposição de medidas de otimização operacional.

As variáveis avaliadas em uma análise de desempenho devem refletir o nível de qualidade do serviço ofertado aos usuários, consumidores finais cuja satisfação deve ser o principal foco das atividades de prestação de serviços, como o transporte público. A otimização do serviço de transporte público deve, portanto, analisar o sistema atual, avaliar os efeitos de possíveis intervenções e, por fim, indicar ações visando o aprimoramento desse serviço.

O problema de eficiência dos serviços de transporte público é recorrente, principalmente em pontos da cidade onde a demanda de viagens é mais intensa, caso dos centros atratores de viagens (CAVs). O planejamento das linhas de transporte público que atendem a esses locais deve ser cuidadosamente realizado e monitorado continuamente, pois um atendimento deficiente a esses locais poderia causar prejuízos à dinâmica da cidade.

Diante desse quadro, esta dissertação buscou propor um modelo em redes de Petri para análise de desempenho de linhas de transporte público que atendem a importantes CAVs, em relação a confiabilidade do serviço, conforto e tempo de viagem, que se apresentaram como os aspectos mais valorizados pelos usuários. Essa ferramenta pretende contribuir para o planejamento da rede de transporte a partir da indicação dos pontos positivos e negativos da operação e verificação dos efeitos de possíveis intervenções na qualidade do serviço prestado.

Entre as classes de rede de Petri disponíveis, o modelo de simulação escolhido foi em redes de Petri estocásticas generalizadas (GSPN), instrumento abrangente que contempla diversos métodos de Pesquisa Operacional, como teoria das filas e teoria dos grafos, além de representar adequadamente as características estocásticas do sistema, e ainda, ser um modelo

simples e prático de lidar e realizar alterações. Para validação, o modelo foi aplicado a uma linha de BRT na Região Metropolitana do Recife, e então, foi realizada a comparação entre os dados observados em campo e os resultados gerados pela simulação do modelo para a ocupação média do veículo.

O modelo de simulação em GSPN proposto possui poder de explicação maior que 95%, sendo, então, efetivamente capaz de representar o comportamento do sistema. Com isso, comprovou-se que o modelo elaborado é uma ferramenta útil para testar possíveis modificações no sistema através da simulação. Testes que seriam impraticáveis no sistema real podem ser exaustivamente repetidos com diversas configurações diferentes com o auxílio desse modelo. Retomando o que estabelecem Silva et al (2010), um bom modelo é aquele apresenta desempenho próximo do real e é de fácil experimentação. O modelo elaborado reúne essas características e, portanto, é adequado e viável para análise de desempenho de linhas de transporte público.

Foi selecionada para análise a linha BRT 1976, que circula no corredor BRT Norte-Sul entre o Terminal Integrado Pelópidas Silveira, no município de Paulista, e a área central da cidade do Recife. Trata-se de uma linha de extrema importância, pois atende ao principal CAV da RMR, o centro do Recife, onde se concentram atividades de ramos variados, como comércio, educação e saúde, que geram empregos e exercem grande atratividade sobre a população de toda a Região Metropolitana do Recife. Por sua importância, o centro do Recife é bem servido de transportes públicos, contando com linhas de metrô, ônibus convencionais e BRT. De modo geral, a linha analisada apresenta bom desempenho para todos os aspectos avaliados.

Os pontos positivos identificados na operação atual da linha são a confiabilidade e o conforto ofertado aos passageiros. O tempo de espera médio no ponto inicial é de aproximadamente 4 minutos, enquanto a frequência do serviço é de um veículo partindo a cada 6 minutos. O tempo de espera é considerado aceitável já que se trata de uma linha com headway menor que 10 minutos e, por isso, a diferença de um minuto em relação ao tempo de espera ideal não afeta a confiabilidade, do ponto de vista dos passageiros. Uma pesquisa realizada por ITDP (2017) confirma que, para os usuários, a qualidade do serviço não é afetada, visto que 78% dos entrevistados indicaram a confiabilidade como melhor ou muito melhor do que antes da implantação do corredor BRT.

Já em relação ao conforto, o nível de serviço mínimo observado é o D, que corresponde a uma situação satisfatória para os usuários e que não prejudica as operações de embarque e desembarque. Foram analisados cenários com frequências entre 2 minutos e 7 minutos, que evidenciaram que a frequência atual, de 6 minutos, é a mais adequada tanto sob a perspectiva da confiabilidade quanto do conforto, além de ser a solução economicamente mais viável.

Para o horário de pico da manhã, analisado nesta dissertação, a linha BRT 1976 atinge 24,70 km/h, no sentido subúrbio-cidade, que tem maior demanda e maior congestionamento, e 29,15 km/h, no sentido cidade-subúrbio. No entanto, os resultados dessa análise mostraram que apesar do bom desempenho geral apresentado, há possibilidade de aumentar ainda mais a velocidade operacional média da linha.

Os principais pontos críticos identificados nesta análise são a quantidade de semáforos, 42 no total, e a operação em tráfego misto em 15,55 km dos 31,85 km do percurso total, ou seja, 49% do itinerário é realizado em tráfego misto. A maior parte dos semáforos se concentra na Avenida Cruz Cabugá e no centro do Recife, representados pelos segmentos 5, 6 e 7, que somam 8,35 km e 28 semáforos, indicando uma média de um semáforo a cada 300 metros. Os resultados demonstram que, nesses segmentos, as velocidades operacionais médias são, respectivamente, 13,33 km/h, 16,76 km/h e 13,04 km/h, bem abaixo do definido no projeto do corredor BRT, que propunha velocidades acima dos 20 km/h para todos os segmentos.

Visando a redução no tempo de viagem, foram propostos quatro cenários com diferentes alternativas operacionais. No cenário 1, a hipótese é que as operações de embarque e desembarque nos terminais integrados ocorra de maneira similar ao que acontece nas estações intermediárias: através de quatro portas à esquerda e no mesmo nível do veículo. O cenário 2 representa a operação realizada totalmente em ROW B e o cenário 3, a operação com total prioridade de passagem para os coletivos nos semáforos. Finalmente, o cenário 4 abrange todas as estratégias indicadas pelos três cenários anteriores.

O resultado da análise dos cenários indica que as mudanças nas plataformas nos T.I.s, sugeridas no cenário 1, não resultam em melhorias significativas no tempo de viagem. Destaca-se que o resultado aqui obtido não invalida as definições dos elementos essenciais do

sistema BRT, apresentados por Lindau et al (2013). Posto que no caso do corredor analisado, em um total de 42 paradas ao longo de todo o percurso da linha, apenas 4 paradas acontecem nos terminais integrados com operação diferenciada, ou seja, em aproximadamente 90% das paradas as operações de embarque e desembarque acontecem no nível do veículo. Credita-se a isso o fato da hipótese levantada nesse cenário não contribuir significativamente para a otimização do tempo de viagem da linha BRT 1976.

Ressalta-se, também, o fato de que os resultados da comparação entre os cenários demonstram que o número de semáforos ao longo do percurso é mais prejudicial para o desempenho da linha BRT 1976 do que a operação em tráfego misto, uma vez que no cenário 3 o ganho em velocidade seria de 12%, enquanto no cenário 2 o ganho seria de 9%, em relação à situação atual. Ratifica-se, então, a importância da operação semafórica de modo que o transporte público tenha prioridade de passagem, conforme indicaram Ferraz e Torres (2004), Pereira et al (2013) e Chakrabarti (2017), entre outros autores.

Na prática, para haver a prioridade de passagem nos semáforos é necessária a implantação de faixa exclusiva no corredor. Demonstra-se, portanto, a importância da separação do sistema BRT em relação ao tráfego misto como principal fator para que o sistema alcance um bom desempenho, fato apontado por muitos autores, como Currie e Delbosc (2011), Hensher et al (2014) e Gunawan (2015). A partir disso, conclui-se que o cenário 4 é o que melhor representa a otimização operacional da linha analisada, pois além de melhorar sua velocidade em 22%, indica uma operação com menor grau de interferências do tráfego comum.

Como foi evidenciado em ITDP (2017), desde sua inauguração, os corredores de BRT da Região Metropolitana do Recife são alvos de críticas que apontam, principalmente, a falta de prioridade para os coletivos ao longo dos corredores. Apesar disso, e ao contrário do que se poderia esperar, os resultados deste estudo indicam que a velocidade operacional média da linha BRT 1976, que opera no corredor Norte-Sul, é satisfatória e supera os valores previstos no projeto original do corredor. No entanto, os resultados desta análise mostram que existe espaço para uma otimização significativa na velocidade operacional média da linha.

O uso de ferramentas de modelagem matemática e simulação para análise de desempenho de sistemas é uma área fundamental da pesquisa em transportes por possibilitar uma análise

quantitativa e qualitativa do sistema e por permitir a verificação do comportamento do sistema frente a modificações operacionais ou físicas. As redes de Petri podem agregar ao estudo dos transportes meios formais de modelagem matemática simples e facilmente inteligíveis. Uma possível ampliação dessa pesquisa seria a aplicação do modelo aqui elaborado a linhas de ônibus convencionais e linhas de transporte metroviário. Este estudo poderia ser, ainda, aprofundado adicionando outros parâmetros de qualidade do serviço à análise. Um nicho de pesquisa possível, também, é a elaboração de um modelo em redes de Petri que permita a análise de desempenho operacional dos terminais de integração de transporte público.

REFERÊNCIAS

ABBAS-TURKI, A.; GRUNDER, O.; ELMOUDNI, A. Public transportation systems: modeling and analysis based on a new Petri net approach. In: **IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics**, vol. 4, 2002.

ARAGÃO, Joaquim José Guilherme; YAMASHITA, Yaeko; ORRICO FILHO, Romulo Dante. BRT in Brazil: Designing services in function of given infrastructure projects or designing infrastructure in function of established service quality patterns?. **Research in Transportation Economics**, v. 59, p. 304-312, 2016.

ARENALES, Marcos; MORABITO, Reinaldo; ARMENTANO, Vinícius. **Pesquisa operacional: para cursos de engenharia**. Elsevier Brasil, 2017.

BADIA, Hugo; ESTRADA, Miquel; ROBUSTÉ, Francesc. Bus Network Structure and Mobility Pattern: A Monocentric Analytical Approach on a Grid Street Layout. **Transportation Research Part B**, n. 93, p.37-56, 2016. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.trb.2016.07.004>

BARABINO, Benedetto; DEIANA, Eusebio. On the attributes and influencing factors of end-users quality perceptions in urban transport: An exploratory analysis. **Procedia-Social and Behavioral Sciences**, v. 87, p. 18-30, 2013.

BARABINO, Benedetto; DI FRANCESCO, Massimo. Characterizing, measuring, and managing transit service quality. **Journal of Advanced Transportation**, v. 50, n. 5, p. 818-840, 2016.

BELFIORE, Patrícia; FÁVERO, Luiz Paulo. **Pesquisa Operacional para cursos de Engenharia**. Elsevier Brasil, 2013.

BOAVENTURA NETTO, Paulo Oswaldo. **Grafos - Teoria, Modelos, Algoritmos**. 5. ed. São Paulo: Blucher, 2012.

BOUYEKHF, R.; ABBAS-TURKI, A.; GRUNDER, O.; EL MOUDNI, A. Modelling, performance evaluation and planning of public transport systems using generalized stochastic Petri nets. **Transport reviews**, v. 23, n. 1, p. 51-69, 2003.

BRT Centre of Excellence; EMBARQ; IEA e SIBRT. **Global BRTdata**: version 3.26, last modified on July 5, 2017. Disponível em: <<http://www.brtdata.org>>. Acesso em: 17 jul. 2017.

CAO, Xinyu (Jason); SCHONER, Jessica. The influence of light rail transit on transit use: An exploration of station area residents along the Hiawatha line in Minneapolis. **Transportation Research Part A**, v. 59, p.134-143, 2014. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.tra.2013.11.001>.

CASTELAIN, Emmanuel; MESGHOUNI, Khaled. Regulation of a Public Transport Network with consideration of the passenger flow: modeling of the system with High-level Petri Nets. In: **IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics**, vol. 6, 2002.

CAVADINHA, Eliane Vitória Corrêa. **Avaliação do Desempenho de Sistemas Metropolitanos Integrados de Transporte Público sob os Aspectos da Produtividade, da Eficiência e da Qualidade: O Sistema Estrutural Integrado da Região Metropolitana do Recife**. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil/UFPE, Recife, 2005.

CHAKRABARTI, Sandip. How can public transit get people out of their cars? An analysis of transit mode choice for commute trips in Los Angeles. **Transport Policy**, v. 54, p. 80-89, 2017.

_____. The demand for reliable transit service: New evidence using stop level data from the Los Angeles Metro bus system. **Journal of Transport Geography**, v. 48, p.154-164, 2015.

CHAUDHURI, Gargi; CLARKE, Keith C.. On the spatiotemporal dynamics of the coupling between land use and road networks: does political history matter?. **Enviromental and Planning B: Planning and Design**, v. 42, p.133-156, 2015.

CONDEPE-FIDEM – Agência Estadual de Planejamento e Pesquisas de Pernambuco. **Mobilidade para o Trabalho na Região Metropolitana do Recife: Deslocamento Pendular e Perfil Socioeconômico dos Ocupados 2011/2013**. 2014.

CURRIE, Graham; DELBOSC, Alexa. Understanding bus rapid transit route ridership drivers: An empirical study of Australian BRT systems. **Transport Policy**, v. 18, n. 5, p. 755-764, 2011.

DE ONÃ, Juan; DE ONÃ, Rocío; LÓPEZ, Griselda. Transit service quality analysis using cluster analysis and decision trees: a step forward to personalized marketing in public transportation. **Transportation**, v. 43, n. 5, p. 725-747, 2016.

DEZANI, Henrique. **Otimização do fluxo do tráfego urbano modelado em redes de Petri utilizando algoritmo genético**. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2012.

DI FEBBRARO, Angela; GIGLIO, Davide. On adopting a Petri net-based switching modeling system to represent and control urban areas. In: **Procedures of 8th IEEE International Conference on Intelligent Transportation Systems**, p. 185-190, 2005.

DI FEBBRARO, Angela; GIGLIO, Davile; SACCO, Nicola. A Deterministic and Stochastic Petri Net Model for Traffic-Responsive Signaling Control in Urban Areas. **IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems**, v. 17, n. 2, p. 510-524, 2016.

DI FEBBRARO, Angela; SACCO, Nicola. On modelling urban transportation networks via hybrid Petri nets. **Control engineering practice**, v. 12, n. 10, p. 1225-1239, 2004.

DI FEBBRARO, Angela; SACONE, Simona. Hybrid Petri nets for the performance analysis of transportation systems. In: **Proceedings of the 37th IEEE Conference on Decision and Control**, p. 3232-3237, 1998.

DOLOTI, Mariagrazia; FANTI, Maria Pia. An urban traffic network model via coloured timed Petri nets. **Control Engineering Practice**, v. 14, n. 10, p. 1213-1229, 2006.

FARIAS, Everton da Silveira; BORENSTEIN, Denis. Mobilidade urbana e transporte público: modelos e perspectivas a partir da Pesquisa Operacional. **Revista eletrônica Pesquisa Operacional para o desenvolvimento**. São Paulo. v. 6, n. 3, p. 385-409, 2014.

FENG, Wei; FIGLIOZZI, Miguel; BERTINI, Robert L. Quantifying the joint impacts of stop locations, signalized intersections, and traffic conditions on bus travel time. **Public Transport**, v. 7, n. 3, p. 391-408, 2015.

FERRAZ, Antônio Clóvis “Coca” Pinto; TORRES, Isaac Guillermo Espinosa. **Transporte Público Urbano**. São Carlos: RiMa, Ed. 2, 2004.

GIGLIO, Davide; SACCO, Nicola. A Petri net model for analysis, optimisation, and control of railway networks and train schedules. In: **19th IEEE International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)**, p. 2442-2449, 2016.

GIUA, Alessandro; SEATZU, Carla. Modeling and supervisory control of railway networks using Petri nets. **IEEE Transactions on automation science and engineering**, v. 5, n. 3, p. 431-445, 2008.

GODAVARTHI, Gautam Raj; CHALUMURI, Ravi Sekhar; VELMURUGUN, Senathipathi. Measuring the performance of bus rapid-transit corridors based on volume by capacity ratio. **Journal of Transportation Engineering**, v. 140, n. 10, p. 04014049, 2014.

GOOGLE EARTH. **Google Earth Pro 7.3.0.3832**. 2017. Acesso em: 03 outubro 2017.

GRANDE RECIFE. **BRT – Via Livre. 2016a**. Disponível em: <<http://www.granderecife.pe.gov.br/web/grande-recife/brt-via-livre>>. Acesso em: 05 maio 2016.

_____. **Caracterização do STPP/RMR: Anexo 1 do Edital de Licitação da Concorrência Nº 002/2013**. Grande Recife Consórcio de Transporte. Recife – PE. 2013. Disponível em <www.granderecife.pe.gov.br/c/document_library/get_file?uuid=eedf1472-0fdd-48fd-acec-87dcbde5409e&groupId=1726912>. Acessado em abril de 2016.

_____. **Grande Recife - Histórico. 2016b**. Disponível em: <<http://www.granderecife.pe.gov.br/web/grande-recife/historico>>. Acesso em: 17 abril 2016.

_____. **Horário x Linha. 2015**. Disponível em: <http://200.238.84.28/site/consulta/quadro_horarios.asp?linha=1976&nomeitinerario=12625>. Acesso em: 03 outubro 2017.

_____. **Sistema Estrutural Integrado. 2016c**. Disponível em: <<http://www.granderecife.pe.gov.br/web/grande-recife/sistema-estrutural-integrado>>. Acesso em: 05 abril 2016.

GUIRAO, Begoña; GARCÍA-PASTOR, Antonio; LÓPEZ-LAMBAS, María Eugenia. The importance of service quality attributes in public transportation: Narrowing the gap between scientific research and practitioners' needs. **Transport Policy**, v. 49, p. 68-77, 2016.

GUNAWAN, Fergyanto E. Empirical Assessment on Factors Affecting Travel Time of Bus Rapid Transit. **International Journal of Engineering and Technology (IJET)**, v. 7, n. 1, p.327-334, 2015.

HADAS, Yuval; CEDER, Avishai (Avi). Optimal coordination of public-transit vehicles using operational tactics examined by simulation. **Transportation Research Part C**, v. 18, p.879-895, 2010. Elsevier BV. doi:10.1016/j.trc.2010.04.002.

HENSHER, David A.; LI, Zheng; MULLEY, Corinne. Drivers of bus rapid transit systems—Influences on patronage and service frequency. **Research in Transportation Economics**, v. 48, p. 159-165, 2014.

HIDALGO, Dario. Bus Rapid Transit: End of a Love Affair in Latin America and South Asia? No, moving to a serious and long lasting relationship. **Thredbo International Conference Series on Competition and Ownership in Land Passenger Transport**, Estolcomo, 2017.

HIDALGO, Darío; GUTIERREZ, Luís. BRT and BHLS around the world: Explosive growth, large positive impacts and many issues outstanding. **Research in Transportation Economics**, v. 39, p. 8-13, 2013.

HIDALGO, Darío; PEREIRA, Liliana; ESTUPIÑAN, Nicolás; JIMÉNEZ, Pedro Luis. TransMilenio BRT system in Bogota, high performance and positive impact—Main results of an ex-post evaluation. **Research in Transportation Economics**, v. 39, n. 1, p. 133-138, 2013.

HILLIER, Frederick S.; LIEBERMAN, Gerald J. **Introdução à pesquisa operacional**. McGraw Hill Brasil, 2013.

HOSSMANN, Maria Helena Stagi; CAMPOS, Vania Barcellos Gouvêa. Estruturação De Terminais De Integração Em Sistemas De Transporte Urbano De Passageiros. **XXVIII Congresso da Associação Nacional de Pesquisa e Ensino em Transportes - ANPET**, Curitiba, 2014.

HUANG, Jie; LEVINSON, David M.. Circuitry in urban transit networks. **Journal of Transport Geography**, v. 48, p.145-153, 2015.

IBGE. **Estimativas da População Residente nos Municípios Brasileiros** com Data de Referência em 1º de Julho de 2016. Disponível em: <ftp://ftp.ibge.gov.br/Estimativas_de_Populacao/Estimativas_2016/estimativa_2016_TCU_20160211.pdf>. Acesso em: 06 abr. 2016.

_____. **Séries Históricas e Estatísticas**. 2010. Disponível em: <<http://seriesestatisticas.ibge.gov.br/series.aspx?no=10&op=2&vcodigo=POP122&t=taxa-urbanizacao>>. Acesso em: 01 fev. 2017.

ISLAM, Md Rokibul; HADIUZZAMAN, Md; BANIK, Rajib; HASNAT, Md Mehedi; MUSABBIR, Sarder Rafee; HOSSAIN, Sanjana. Bus service quality prediction and attribute ranking: a neural network approach. **Public Transport**, v. 8, n. 2, p. 295-313, 2016.

ITDP. **Sistema Via Livre de BRT: Avaliação de resultados e recomendações de melhorias**. Recife: ITDP Brasil, 2017.

_____. **The BRT Standard** - 2016 Edition. Institute for Transportation and Development Policy, 2016.

JAIN, Suresh; AGGARWAL, Preeti; KUMAR, Prashant; SINGHAL, Shaleen; SHARMA, Prateek.. Identifying public preferences using multi-criteria decision making for assessing the shift of urban commuters from private to public transport: A case study of Delhi. **Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour**, v. 24, p. 60-70, 2014.

KAAKAI, Fateh; HAYAT, Said; EL MOUDNI, Abdellah. A Hybrid Petri nets-based Simulation Model for Evaluating the Design of Railway Transit Stations. **Simulation Modeling Practice and Theory**, v. 15, p. 935-969, 2007.

KATHURIA, Ankit; PARIDA, M.; SEKHAR, Ch Ravi. Route performance evaluation of a closed bus rapid transit system using GPS data. **Current Science**, v. 112, n. 8, p. 1642-1652, 2017.

KOIZUMI, Yukihiro; NISHIMIA, Noriaki.; KANEKO, Motoko. Urban Transportation Characteristics and Urban Mass Transit Introduction in the Cities of Developing Countries. **Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies**, v. 10, p.81-99, 2013.

LIN, Peiqun; ZHANG, Ning; XU, Jianmin; WANG, Yu. Combinatorial Optimization for the Guangzhou, China, Bus Rapid Transit System: Multiple Bus Substops and Docking Bays. Transportation Research Record: **Journal of the Transportation Research Board**, n. 2418, p. 30-38, 2014.

LINDAU, Luís Antônio; PETZHOLD, Guillermo Sant'Anna; SILVA, Cristina Albuquerque Moreira; FACCHINI, Daniela. BRT e Corredores Prioritários para Ônibus: panorama no continente americano. In: **XXVII ANPET-Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes**, 2013.

LITMAN, Todd. Bus Evaluating rail transit benefits: A comment. **Transport Policy**, v. 14, p.94-97, 2007.

LOPEZ, D. F.; TRIANA, A. M.; CHAMORRO, H. R. Simulation model of public transportation system using multiagent approach by means of petri nets: Bogotá study case. In: Robotics symposium, 2011 **IEEE IX Latin American and IEEE Colombian conference on automatic control and industry applications (LARC)**, p. 1-6, 2011.

MAIA MELO ENGENHARIA. Grande Recife Consórcio de Transporte. **Corredor de Transporte Público de Passageiros Norte-Sul: Relatório de Projeto de Infraestrutura do Sistema de Gestão Operacional do Corredor Norte-Sul**. Recife: 2013.

MARINS, Fernando Augusto Silva. **Introdução à pesquisa operacional**. São Paulo: Cultura Acadêmica: Universidade Estadual Paulista, 2011.

MARSAN, Marco Ajmone; BALBO, Gianfranco; CONTE, Gianni. A class of generalized stochastic Petri nets for the performance evaluation of multiprocessor systems. **ACM Transactions on Computer Systems (TOCS)**, v. 2, n. 2, p. 93-122, 1984.

MARSAN, Marco Ajmone; BALBO, Gianfranco; CONTE, Gianni; DONATELLI, Susanna. **Modelling with generalized stochastic Petri nets**. John Wiley & Sons, 1994.

MEERSCHAERT, Mark M. **Mathematical modeling**. Academic press, 2013.

MELLO, Bráulio Adriano. **Modelagem e simulação de sistemas**. Universidade Regional Integrada do Alto Uruguai e das Missões. Santo Ângelo, 2007.

MORTON, Craig; CAULFIELD, Brian; ANABLE, Jillian. Customer perceptions of quality of service in public transport: Evidence for bus transit in Scotland. **Case Studies on Transport Policy**, v. 4, n. 3, p. 199-207, 2016.

MOURA, José Luis et al. A two-stage urban bus stop location model. **Networks and Spatial Economics**, v. 12, n. 3, p. 403-420, 2012.

MTE – Ministério do Trabalho e Emprego. **Cadastro Geral de Empregados e Desempregados (CAGED)**. Data de referência em 1º de Janeiro de 2017. Disponível em: <http://bi.mte.gov.br/bgcaged/caged_perfil_municipio/index.php>. Acesso em: 03 outubro 2017.

MURATA, Tadao. Petri Nets: Properties, Analysis and Applications. **Proceedings of the IEEE**. v.77, n. 4, 1989. p. 541-580.

NG, Kok Mun; REAZ, Mamun Bin Ibne; ALI, Mohd Alauddin Mohd. A Review on the Application of Petri Nets in Modeling, Analysis, and Control of UrbanTraffic. **IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems**, Vol. 14, n. 2, 2013. p. 858-870.

Observatório de Políticas Urbanas e Gestão Municipal – IPPUR/UFRJ. **Informações básicas das Regiões Metropolitanas**. 2002. Disponível em: <http://www.observatoriodasmetropoles.ufrj.br/imagens/rm_recife.gif>. Acesso em: 03 outubro 2017.

ONU – Organização das Nações Unidas. **Department of Economic and Social Affairs, Population Division. World Urbanization Prospects: The 2014 Revision, Highlights**. 2014. Disponível em <<https://esa.un.org/unpd/wup/Publications/Files/WUP2014-Highlights.pdf>> Acesso em: 30 jan. 2017.

ORTÚZAR, Juan de Dios WILLUMSEN, Luis G.. **Modelling Transport**. Chichester: John Wiley & Sons, 4. ed., 2011.

PARANHOS, Gustavo Carvalho. **Avaliação da Configuração de Redes de Transporte Público Urbano por Meio de Indicadores**. Brasília, 2011. Dissertação de Mestrado. Universidade de Brasília.

PCR – Prefeitura da Cidade do Recife. **Sobre a RPA 1**. Disponível em: <<http://www2.recife.pe.gov.br/servico/sobre-rpa-1>>. Acesso em: 09 jun. 2017.

PEREIRA, Brenda Medeiros; LINDAU, Luís Antônio; DIÓGENES, Mara Chagas; CASTILHO, Rodrigo Alberto. Avaliação do desempenho limite de corredores Bus Rapid Transit (BRT) sem ultrapassagem. **Transportes**, v. 21, n. 1, p. 5-13, 2013.

PETRI, Carl Adam. **Communication with automata**. Translated by Clifford F. Greene. Applied Data Research inc. Princeton, New Jersey, 1966.

REDE PGV. **O que é um PGV**. Rede Íbero-americana de Estudos em Polos Geradores de Viagens. 2016. Disponível em <<http://redpgv.coppe.ufrj.br>> Acesso em: 09 jun. 2016.

REDMAN, Lauren; FRIMAN, Margareta; GÄRLING, Tommy; HARTIG, Terry. Quality attributes of public transport that attract car users: A research review. **Transport Policy**, v. 25, p. 119-127, 2013.

RODRIGUE, Jean-Paul; COMTOIS, Claude; SLACK, Brian. **The Geography of Transport Systems**. Ed. 3. Routledge, 2013.

SARAMAGO, Simone Pereira; STEFFEN JUNIOR, Valder. Introdução às técnicas de otimização em engenharia. **Horizonte científico**, v. 2, n. 2, 2008.

SEABRA, Deborah Maria da Silva; SILVEIRA NETO, Raul da Mota; MENEZES, Tatiane Almeida. **Amenidades Urbanas e Valor das Residências: Uma Análise Empírica para a Cidade do Recife**. Economia Aplicada, v. 20, n. 1, p. 143-169, 2016.

SHI, Baiying; HUANG, Wei. Modeling and development of Multi-agent traffic control experimental system based on Petri net. In: **IEEE International Conference on Intelligent Computation Technology and Automation (ICICTA)**, p. 811-816, 2008.

SHRIVASTAVA, Prabhat; O'MAHONY, Margaret. A model for development of optimized feeder routes and coordinated schedules - A genetic algorithms approach. **Transport Policy**, v. 13, p.413-425, 2006. Elsevier BV. doi:10.1016/j.tranpol.2006.03.002.

SILVA, Ermes Medeiros; SILVA, Elio Medeiros; GONÇALVES, Valter; MUROLO, Afrânio Carlos. **Pesquisa operacional para os cursos de administração e engenharia**. São Paulo: Atlas, 4.ed., 2010.

SILVEIRA, Márcio Rogério; COCCO, Rodrigo Giraldi. Transporte público, mobilidade e planejamento urbano: contradições essenciais. **Estudos Avançados**, v. 27, n. 79, 2013.

SOUZA, Filipe Leonardo Cardoso; ORRICO FILHO, Rômulo Dante. As Redes de TP & Desenho Urbano em Cidades Brasileiras. **XIII Rio de Transportes**, Rio de Janeiro, 2015.

STEWART, Colin; EL-GENEIDY, Ahmed. Don't stop just yet! A simple, effective, and socially responsible approach to bus-stop consolidation. **Public Transport**, n. 1, v. 8, p.1-23, 2016. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. 10.1007/s12469-015-0112-9.

TECHNISCHE UNIVERSITÄT ILMENAU. **TimeNET for windows v. 4.3**. Ilmenau, 2015.

TEDESCO, Giovanna Megumi Ishida. **Metodologia para Elaboração do Diagnóstico de um Sistema de Transporte**. Brasília, 2008. Dissertação de Mestrado. Universidade de Brasília.

TIRACHINI, Alejandro. The economics and engineering of bus stops: Spacing, design and congestion. **Transportation Research Part A**, v. 59, p.37-57, 2014.

TIRACHINI, Alejandro; HENSHER, David A.; ROSE, John M. Crowding in public transport systems: effects on users, operation and implications for the estimation of demand. **Transportation research part A: policy and practice**, v. 53, p. 36-52, 2013.

TRB. Transit Cooperative Highway Research Program (TCRP) Report 165: **Transit Capacity and Quality of Service Manual**. Nacional Academy of Sciences: Washington, 2013.

TUN, Thet Hein; GUARDA, Pablo; RAMOS, Camila; HIDALGO, Dario. Understanding Bus Rapid Transit (BRT) Performance: Examining the Relationship between Speed and BRT Design Indicators. **Thredbo Conference**, Estolcomo, 2017.

TZES, Anthony; KIM, Seongho; MCSHANE, William R.. Applications of Petri Networks to Transportation Network Modeling. **IEEE Transactions On Vehicular Technology**, Vol. 45, n. 2, 1996. p. 391-400.

VASCONCELLOS, Eduardo Alcântara. **A Cidade, o Transporte e o Trânsito**. São Paulo: Prolivros, 2005.

VILLATE, Jaime E. **Introdução aos sistemas dinâmicos: uma abordagem prática com máxima**. 2011.

VUCHIC, V. R. **Urban Transit Systems and Technology**. New Jersey: John Wiley & Sons, 2007.

WANG, Jiacun. Petri Nets for Dynamic Event-Driven System Modeling. **Handbook of Dynamic System Modeling**, v. 1, 2007.

WANG, Jiacun; JIN, Chun; DENG, Yi. Performance Analysis of Traffic Networks Based on Stochastic Timed Petri Net Models. In: Proceedings of the 5th International Conference on Engineering of Complex Computer Systems. **IEEE Computer Society**, p. 77-85, 1999.

WANG, Pengling; MA, Lei; GOVERDE, Rob M. P.; WANG, Qingyuan. Rescheduling trains using Petri nets and heuristic search. **IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems**, v. 17, n. 3, p. 726-735, 2016.

YAMADA, Cinthia Kaori; SILVA, Marcelo Ferreira Moraes; JUNQUEIRA, Fabrício. Modelagem da rede de trens urbanos em rede de petri utilizando o google maps. **Anais do XI Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente**. Fortaleza, 2013.

YEN, Hsu-Chun. Introduction to Petri Net Theory. **Recent Advances in Formal Languages and Applications**, v. 25, p. 343-373, 2006.

ZHANG, X.; MILLER-HOOKS, E.; DENNY, K.. Bus Assessing the role of network topology in transportation network resilience. **Journal of Transport Geography**, v. 46, p.35-45, 2015.

APÊNDICE A – Planilha de coleta de dados de passageiros

Estação		Embarque	Desembarque
T.I. Pelópidas	E0		
José de Alencar	E1		
São Francisco de Assis	E2		
Hospital Central	E3		
São Salvador do Mundo	E4		
Cidade Tabajara	E5		
Jupirá	E6		
Aluísio Magalhães	E7		
T.I. PE-015	E8		
Bultrins	E9		
Quartel	E10		
Sítio Histórico	E11		
Mathias de Albuquerque	E12		
Kennedy	E13		
Complexo Salgadinho	E14		
Tacaruna	E15		
Santa Casa de Misericórdia	E16		
Araripina	E17		
IEP	E18		
13 de maio	E19		
Riachuelo	E20		
Nossa Sra. Do Carmo	E21		
Maurício de Nassau	E22		
Istmo do Recife	E23		
Forte do Brum	E24		
Santa Casa de Misericórdia	E16		
Tacaruna	E15		
Complexo Salgadinho	E14		
Kennedy	E13		
Mathias de Albuquerque	E12		
Sítio Histórico	E11		
Quartel	E10		
Bultrins	E9		
T.I. PE-015	E8		
Aluísio Magalhães	E7		
Jupirá	E6		
Cidade Tabajara	E5		
São Salvador do Mundo	E4		
Hospital Central	E3		
São Francisco de Assis	E2		
José de Alencar	E1		
TI. Pelópidas	E0		

APÊNDICE B – Planilha de coleta de dados de tempo de viagem

Estação		para	abre porta	fecha porta	acelera	constante	desacelera
Nome	Número						
T.I. Pelópidas	E0						
José de Alencar	E1						
São Francisco de Assis	E2						
Hospital Central	E3						
São Salvador do Mundo	E4						
Cidade Tabajara	E5						
Jupirá	E6						
Aluísio Magalhães	E7						
T.I. PE-015	E8						
Bultrins	E9						
Quartel	E10						
Sítio Histórico	E11						
Mathias de Albuquerque	E12						
Kennedy	E13						
Complexo Salgadinho	E14						
Tacaruna	E15						
Santa Casa de Misericórdia	E16						
Araripina	E17						
IEP	E18						
13 de maio	E19						
Riachuelo	E20						
Nossa Sra. Do Carmo	E21						
Maurício de Nassau	E22						
Istmo do Recife	E23						
Forte do Brum	E24						
Santa Casa de Misericórdia	E16						
Tacaruna	E15						
Complexo Salgadinho	E14						
Kennedy	E13						
Mathias de Albuquerque	E12						
Sítio Histórico	E11						
Quartel	E10						
Bultrins	E9						
T.I. PE-015	E8						
Aluísio Magalhães	E7						
Jupirá	E6						
Cidade Tabajara	E5						
São Salvador do Mundo	E4						
Hospital Central	E3						
São Francisco de Assis	E2						
José de Alencar	E1						
Tl. Pelópidas	E0						

APÊNDICE C - Cálculo do embarque de passageiros por segmento

Segmento	Estação	Viagem								e
		1	2	3	4	5	6	7	8	
1	E0i	145	146	108	128	126	142	159	92	136,2857
2	E1i	1	2	1	1	1	2	2	1	1,3750
	E2i	8	2	0	2	4	3	1	0	2,5000
	E3i	1	8	5	4	7	4	1	0	3,7500
	E4i	7	12	7	8	9	6	2	2	6,6250
	E5i	11	1	7	6	10	3	2	2	5,2500
	E6i	4	5	11	14	7	20	0	2	7,8750
	E7i	6	6	5	0	3	6	0	0	3,2500
	soma	38	36	36	35	41	44	8	7	38,3333
3	E8i	2	11	3	16	8	12	7	12	8,8750
	E9i	1	3	8	4	4	13	7	0	5,0000
	E10i	0	3	8	4	2	9	6	0	4,0000
	E11i	2	6	7	4	2	7	1	1	3,7500
	E12i	2	2	3	1	4	1	1	5	2,3750
	soma	7	25	29	29	20	42	22	18	26,4286
4	E13i	0	1	3	0	1	1	0	1	0,8750
	E14i	4	5	0	0	4	4	1	11	3,6250
	soma	4	6	3	0	5	5	1	12	4,5000
5	E15i	5	3	2	0	2	4	2	1	2,3750
	E16i	0	3	0	0	7	1	9	1	2,6250
	E17	1	1	3	1	4	1	1	0	1,5000
	E18	0	1	1	0	1	2	0	0	0,6250
	soma	6	8	6	1	14	8	12	2	7,1250
6	E19	0	1	2	0	1	1	1	1	0,8750
	E20	5	6	12	16	4	15	1	5	8,0000
	E21	1	8	23	4	5	10	4	12	8,3750
	E22	2	6	4	3	2	3	1	0	2,6250
	E23	0	0	0	3	0	5	0	12	2,5000
	E24	0	5	1	5	0	4	1	2	2,2500
	soma	8	26	42	31	12	38	8	32	27,0000
7	E16v	0	1	1	2	1	0	0	0	0,6250
	E15v	4	0	4	2	3	5	4	4	3,2500
	soma	4	1	5	4	4	5	4	4	3,8750
8	E14v	0	0	0	1	0	1	0	7	1,1250
	E13v	1	4	7	3	3	1	2	2	2,8750
	soma	1	4	7	4	3	2	2	9	4,0000

9	E12v	2	3	2	3	0	0	2	1	1,6250
	E11v	1	1	4	6	5	3	2	11	4,1250
	E10v	0	1	4	3	2	2	2	5	2,3750
	E9v	1	3	9	1	2	2	0	8	3,2500
	E8v	20	6	6	24	3	18	1	15	11,6250
	soma	24	14	25	37	12	25	7	40	25,2857
10	E7v	1	4	3	1	0	0	0	0	1,1250
	E6v	10	6	4	3	0	0	0	9	4,0000
	E5v	5	6	6	0	1	0	1	9	3,5000
	E4v	6	4	3	1	1	0	0	8	2,8750
	E3v	3	1	2	4	0	4	0	5	2,3750
	E2v	2	1	0	1	0	2	0	1	0,8750
	E1v	4	1	0	1	0	1	2	0	1,1250
	E0v	0	0	0	0	0	0	0	0	0,0000
	soma	31	23	18	11	2	7	3	32	15,8750

APÊNDICE D – Cálculo do desembarque de passageiros por segmento

Segmento	Estação	Viagem								d
		1	2	3	4	5	6	7	8	
1	E0i	0	0	0	0	0	0	0	0	0,0000
2	E1i	1	0	0	0	1	2	0	0	0,5000
	E2i	1	3	1	3	7	7	0	0	2,7500
	E3i	0	0	3	3	1	2	0	3	1,5000
	E4i	0	0	1	3	3	0	0	1	1,0000
	E5i	0	0	1	0	0	2	0	0	0,3750
	E6i	0	1	0	0	2	1	0	0	0,5000
	E7i	11	0	1	1	3	3	0	0	2,3750
	soma	13	4	7	10	17	17	0	4	9,0000
3	E8i	20	70	71	74	51	66	32	79	57,8750
	E9i	0	1	1	3	2	6	9	2	3,0000
	E10i	2	3	6	4	0	6	14	3	4,7500
	E11i	1	3	6	2	13	4	5	3	4,6250
	E12i	7	6	4	11	7	7	5	6	6,6250
	soma	30	83	88	94	73	89	65	93	76,8750
4	E13i	5	4	3	10	9	11	3	11	7,0000
	E14i	0	5	4	4	2	2	4	1	2,7500
	soma	5	9	7	14	11	13	7	12	9,7500
5	E15i	9	5	5	9	4	4	6	2	5,5000
	E16i	8	1	3	1	7	7	0	3	3,7500
	E17	22	18	6	9	21	13	16	6	13,8750
	E18	12	23	7	4	17	19	6	6	11,7500
	soma	51	47	21	23	49	43	28	17	29,8333
6	E19	25	29	7	10	13	16	9	12	15,1250
	E20	37	38	17	22	23	21	12	11	22,6250
	E21	66	26	50	40	47	48	18	25	40,0000
	E22	4	1	2	2	9	1	5	4	3,5000
	E23	6	12	11	9	13	14	5	13	10,3750
	E24	4	7	5	4	3	12	5	2	5,2500
	soma	142	113	92	87	108	112	54	67	75,0000
7	E16v	2	8	3	4	1	7	2	13	5,0000
	E15v	0	0	4	1	0	0	0	2	0,8750
	soma	2	8	7	5	1	7	2	15	5,8750
8	E14v	0	0	0	0	1	1	0	0	0,2500
	E13v	0	0	1	2	0	1	0	2	0,7500
	soma	0	0	1	2	1	2	0	2	1,0000

9	E12v	1	2	2	2	2	0	1	2	1,5000
	E11v	0	0	0	0	0	0	1	0	0,1250
	E10v	1	1	1	0	1	0	1	1	0,7500
	E9v	0	1	3	3	0	0	1	2	1,2500
	E8v	2	8	7	10	8	6	3	20	8,0000
	soma	4	12	13	15	11	6	7	25	11,6250
10	E7v	2	0	0	0	0	0	0	3	0,6250
	E6v	0	3	5	1	1	3	0	0	1,6250
	E5v	0	1	1	1	0	0	1	1	0,6250
	E4v	0	5	1	1	0	0	0	2	1,1250
	E3v	1	2	3	6	0	0	2	2	2,0000
	E2v	1	0	3	1	0	3	0	2	1,2500
	E1v	5	0	19	2	0	5	0	1	4,0000
	E0v	27	35	0	36	6	30	11	61	25,7500
	soma	36	46	32	48	7	41	14	72	37,0000

APÊNDICE E - Cálculo dos dados de tempo de permanência por segmento

Segmento	Estação	Viagem								tp
		1	2	3	4	5	6	7	8	
1	E0i	127	73	129	131	97	133	91	91	109,0000
2	E1i	12	11	12	12	12	11	12	12	12,3333
	E2i	14	14	16	15	12	15	15	13	15,6667
	E3i	15	18	10	15	13	13	14	11	14,5000
	E4i	14	17	18	23	19	15	11	11	17,7500
	E5i	14	22	33	14	15	17	11	19	18,9167
	E6i	11	20	16	15	14	14	17	16	22,0000
	E7i	13	13	16	19	13	13	10	14	15,5833
	soma	93	115	121	113	98	98	90	96	103,0000
3	E8i	48	32	55	35	35	32	37	44	43,0833
	E9i	12	15	21	15	15	12	16	20	17,0000
	E10i	14	18	15	19	12	11	16	16	15,5833
	E11i	10	13	22	15	16	21	19	24	17,6667
	E12i	11	16	14	18	13	11	21	24	18,4167
	soma	95	94	127	102	91	87	109	128	104,1250
4	E13i	14	14	13	13	12	11	17	19	15,1667
	E14i	21	14	12	12	12	12	14	12	15,3333
	soma	35	28	25	25	24	23	31	31	27,7500
5	E15i	17	15	19	29	21	12	14	20	19,5833
	E16i	24	21	17	14	20	21	20	18	19,0833
	E17	17	12	18	25	23	16	13	13	17,9167
	E18	20	23	17	16	12	12	17	14	21,7500
	soma	78	71	71	84	76	61	64	65	71,2500
6	E19	15	14	23	20	13	49	17	26	23,6667
	E20	18	15	23	16	19	23	19	16	20,3333
	E21	37	33	32	33	28	22	22	39	35,0833
	E22	13	18	12	12	11	18	10	10	13,3333
	E23	10	13	13	18	13	11	13	12	27,2500
	E24	13	16	20	10	15	13	14	13	17,5833
	soma	106	109	123	109	99	136	95	116	111,6250
7	E16v	15	15	13	12	12	10	16	14	15,1667
	E15v	12	10	15	12	12	9	6	12	12,9167
	soma	27	25	28	24	24	19	22	26	24,3750
8	E14v	11	9	10	10	10	11	9	12	11,5833
	E13v	9	11	13	13	11	11	9	8	10,7500
	soma	20	20	23	23	21	22	18	20	20,8750

9	E12v	12	13	15	12	14	11	11	10	12,6667
	E11v	8	11	9	15	13	15	8	9	12,0833
	E10v	10	13	14	14	11	13	10	12	12,7500
	E9v	18	12	18	15	33	9	14	27	16,7500
	E8v	30	17	20	26	26	34	39	36	28,9167
	soma	78	66	76	82	97	82	82	94	82,1250
10	E7v	12	10	10	18	9	16	24	12	12,5000
	E6v	9	16	12	16	10	12	11	13	12,5833
	E5v	18	15	12	15	11	10	12	13	13,9167
	E4v	9	9	11	18	9	14	14	8	12,1667
	E3v	13	13	9	11	12	10	11	8	11,9167
	E2v	13	14	0	14	10	12	9	9	9,1667
	E1v	13	12	11	14	12	11	11	10	10,1667
	E0v	0	0	0	0	0	0	0	0	0,0000
	soma	87	89	65	106	73	85	92	73	83,7500

APÊNDICE F - Cálculo dos dados de tempo de aceleração por segmento

Segmento	Estação	Viagem								ta
		1	2	3	4	5	6	7	8	
1	E0i	36	47	85	47	31	57	34	57	49,2500
2	E1i	23	8	13	8	10	7	6	5	12,2500
	E2i	10	8	9	9	9	8	7	6	9,8333
	E3i	13	9	10	7	16	4	8	6	11,0000
	E4i	12	12	10	7	9	5	6	5	9,4167
	E5i	8	8	8	6	12	9	9	6	9,4167
	E6i	9	9	7	7	11	8	6	8	10,8333
	E7i	7	15	13	8	11	8	7	5	9,6667
	soma	82	69	70	52	78	49	49	41	61,2500
3	E8i	23	22	16	8	22	27	8	32	35,1667
	E9i	13	12	6	7	10	4	10	22	11,2500
	E10i	13	13	8	11	10	25	7	27	19,4167
	E11i	12	18	9	5	12	4	12	19	13,6667
	E12i	8	21	10	12	11	3	7	53	25,8333
	soma	69	86	49	43	65	63	44	153	71,5000
4	E13i	10	7	10	6	0	6	15	35	10,1667
	E14i	9	18	17	6	12	6	18	16	11,8333
	soma	19	25	27	12	12	12	33	51	23,8750
5	E15i	8	6	8	27	2	5	15	5	18,0833
	E16i	10	9	0	13	6	54	14	17	31,0833
	E17	8	16	8	5	6	8	5	25	11,3333
	E18	5	11	9	14	7	4	6	7	9,4167
	soma	31	42	25	59	21	71	40	54	42,8750
6	E19	7	7	11	6	8	5	6	6	13,4167
	E20	7	7	11	34	8	29	6	6	20,0833
	E21	7	5	8	76	7	47	64	15	30,5000
	E22	7	8	5	13	7	3	4	7	7,9167
	E23	9	8	7	10	9	2	5	4	6,8333
	E24	9	8	10	8	7	4	5	8	13,0833
	soma	46	43	52	147	46	90	90	46	70,0000
7	E16v	7	8	7	4	8	7	19	5	10,5833
	E15v	8	8	13	6	8	10	4	6	10,5833
	soma	15	16	20	10	16	17	23	11	16,0000
8	E14v	6	6	5	7	9	4	4	5	10,0833
	E13v	8	8	3	9	6	4	4	0	7,9167
	soma	14	14	8	16	15	8	8	5	11,0000

9	E12v	8	7	8	4	10	6	5	6	8,0000
	E11v	8	5	7	7	7	6	7	5	8,1667
	E10v	10	6	13	5	7	5	4	6	8,9167
	E9v	5	7	19	6	8	5	4	6	11,4167
	E8v	0	9	20	9	31	7	7	11	17,0833
	soma	31	34	67	31	63	29	27	34	39,5000
10	E7v	20	7	8	5	7	7	6	10	9,0000
	E6v	10	6	9	6	9	7	6	9	8,6667
	E5v	13	5	8	7	8	6	5	11	8,0833
	E4v	13	6	9	7	11	6	5	5	7,9167
	E3v	14	6	9	8	11	5	7	12	9,2500
	E2v	0	14	0	5	16	15	12	17	9,1667
	E1v	0	5	7	6	11	6	5	11	6,5833
	E0v	0	0	0	0	0	0	0	0	0,0000
	soma	70	49	50	44	73	52	46	75	57,3750

APÊNDICE G - Cálculo dos dados de tempo de desaceleração por segmento

Segmento	Estação	Viagem								tf
		1	2	3	4	5	6	7	8	
1	E0i	12	13	8	12	13	8	11	8	10,6250
2	E1i	13	9	16	12	12	6	11	5	10,3333
	E2i	14	9	7	12	11	28	10	8	11,7500
	E3i	15	21	21	18	12	10	13	26	16,5000
	E4i	20	14	12	18	15	7	12	47	17,8333
	E5i	11	11	24	11	25	6	13	8	18,9167
	E6i	23	17	11	13	13	8	12	5	14,9167
	E7i	50	3	38	49	38	18	23	18	27,1667
	soma	146	84	129	133	126	83	94	117	114,0000
3	E8i	52	9	9	11	28	11	10	18	17,4167
	E9i	35	27	12	36	6	15	9	43	20,9167
	E10i	23	16	12	11	8	13	10	5	12,5000
	E11i	37	22	25	18	15	15	7	5	26,5000
	E12i	34	22	7	6	10	11	8	15	11,1667
	soma	181	96	65	82	67	65	44	86	85,7500
4	E13i	10	12	12	9	5	8	10	7	9,7500
	E14i	10	6	10	20	29	52	22	10	34,8333
	soma	20	18	22	29	34	60	32	17	29,0000
5	E15i	68	29	10	13	9	12	6	6	32,5000
	E16i	8	9	10	12	8	7	11	6	13,0833
	E17	9	53	49	5	34	7	7	42	35,8333
	E18	5	13	11	25	12	7	5	7	13,4167
	soma	90	104	80	55	63	33	29	61	64,3750
6	E19	15	12	12	16	6	37	9	32	20,0833
	E20	46	11	16	9	37	115	11	32	34,1667
	E21	6	10	13	8	4	45	5	10	14,5833
	E22	8	4	37	10	17	12	61	8	7,7500
	E23	8	12	14	6	5	8	10	11	8,2500
	E24	6	46	15	10	5	11	7	7	13,3333
	soma	89	95	107	59	74	228	103	100	106,8750
7	E16v	14	10	10	9	12	5	16	10	11,5000
	E15v	5	14	15	12	11	13	9	10	10,9167
	soma	19	24	25	21	23	18	25	20	21,8750
8	E14v	7	7	12	11	13	12	7	8	11,4167
	E13v	12	26	10	9	9	12	11	6	9,2500
	soma	19	33	22	20	22	24	18	14	21,5000

9	E12v	29	16	11	8	10	7	12	7	11,3333
	E11v	6	9	17	12	13	5	8	6	7,9167
	E10v	34	15	15	13	12	16	10	7	13,0000
	E9v	115	15	40	30	28	8	25	43	37,3333
	E8v	0	18	12	11	12	6	13	7	13,5833
	soma	184	73	95	74	75	42	68	70	85,1250
10	E7v	8	7	14	11	9	6	12	7	8,5833
	E6v	5	12	10	10	9	7	4	9	8,2500
	E5v	7	10	13	6	16	7	12	7	8,7500
	E4v	7	22	15	8	7	6	15	9	10,0833
	E3v	5	100	7	13	9	10	93	7	22,8333
	E2v	6	0	0	8	18	7	0	9	6,0000
	E1v	110	0	105	44	95	85	0	80	45,3333
	E0v	0	0	0	0	0	0	0	0	0,0000
	soma	148	151	164	100	163	128	136	128	139,7500

APÊNDICE H - Cálculo dos dados de tempo em velocidade constante por segmento

Segmento	Estação	Viagem								tvc
		1	2	3	4	5	6	7	8	
1	E0i	21	14	28	16	37	20	36	13	23,1250
2	E1i	42	43	38	36	43	51	34	47	38,6667
	E2i	33	35	41	32	39	20	26	42	30,5833
	E3i	54	46	46	48	53	50	48	29	45,3333
	E4i	37	25	32	30	32	40	30	6	28,0833
	E5i	42	43	42	45	43	49	40	52	45,0000
	E6i	38	35	47	38	37	41	34	45	35,3333
	E7i	40	22	35	19	31	36	28	54	32,5833
	soma	286	249	281	248	278	287	240	275	268,0000
3	E8i	63	82	102	112	134	133	140	80	99,9167
	E9i	32	46	33	39	55	86	63	46	54,7500
	E10i	28	79	60	124	45	53	37	86	55,4167
	E11i	260	53	42	51	43	82	82	37	90,0833
	E12i	82	80	91	110	41	79	100	56	72,5000
	soma	465	340	328	436	318	433	422	305	380,8750
4	E13i	146	139	237	217	149	262	119	179	183,5000
	E14i	125	146	153	140	171	139	103	111	163,4167
	soma	271	285	390	357	320	401	222	290	317,0000
5	E15i	85	117	100	75	62	160	135	160	133,8333
	E16i	207	192	187	242	186	215	186	258	214,6667
	E17	44	40	45	48	95	96	62	60	63,3333
	E18	85	18	23	44	32	34	30	27	40,1667
	soma	421	367	355	409	375	505	413	505	418,7500
6	E19	178	141	100	122	179	115	20	167	119,3333
	E20	236	196	175	243	162	310	217	231	220,0833
	E21	92	168	79	88	93	126	131	84	106,8333
	E22	172	124	84	182	198	128	167	107	142,0000
	E23	66	45	50	59	55	46	44	47	49,2500
	E24	139	267	256	202	224	208	149	115	182,5000
	soma	883	941	744	896	911	933	728	751	848,3750
7	E16v	70	63	67	64	86	77	86	88	61,6667
	E15v	103	107	110	110	131	109	126	109	108,4167
	soma	173	170	177	174	217	186	212	197	188,2500
8	E14v	97	122	110	113	121	120	105	112	108,0000
	E13v	59	29	35	32	37	37	31	32	33,2500
	soma	156	151	145	145	158	157	136	144	149,0000

9	E12v	48	33	60	70	50	38	37	37	44,3333
	E11v	61	43	36	39	35	41	76	75	45,3333
	E10v	53	54	58	61	64	52	54	55	54,9167
	E9v	105	91	85	96	82	98	125	92	96,0000
	E8v	41	63	30	56	47	65	31	54	43,8333
	soma	308	284	269	322	278	294	323	313	298,8750
10	E7v	65	25	31	36	35	36	24	28	34,8333
	E6v	70	42	45	46	41	53	47	65	52,4167
	E5v	28	28	38	41	31	39	35	30	34,2500
	E4v	41	38	49	53	51	53	47	51	49,2500
	E3v	33	117	39	58	40	35	35	32	45,4167
	E2v	28	0	28	37	35	42	26	25	23,5000
	E1v	18	0	105	13	24	23	96	17	44,7500
	E0v	0	0	0	0	0	0	0	0	0,0000
	soma	283	250	335	284	257	281	310	248	281,0000

APÊNDICE J – Definição de cada elemento do modelo

Lugar	Função
Vdisp	número de veículos disponível na saída do T.I. Pelópidas Silveira
fila0	número de pessoas na fila em S0
plat0	número de pessoas na fila em S0 que realmente poderão embarcar
saida0	ocupação do veículo ao sair de S0
cond01	número de veículos operando em S0
cond1	número de veículos que saem de S0
c1	ocupação do veículo ao chegar em S1
d1	número de desembarques em S1
P1	Número de passageiros que não desembarcam em S1
V1	Quantidade de vagas no veículo ao chegar em S1
fila1	número de pessoas na fila em S1
plat1	número de pessoas na fila em S1 que realmente poderão embarcar
saida1	ocupação do veículo ao sair de S1
cond02	número de veículos operando em S1
cond2	número de veículos que saem de S1
c2	ocupação do veículo ao chegar em S2
d2	número de desembarques em S2
P2	Número de passageiros que não desembarcam em S2
V2	Quantidade de vagas no veículo ao chegar em S2
fila2	número de pessoas na fila em S2
plat2	número de pessoas na fila em S2 que realmente poderão embarcar
saida2	ocupação do veículo ao sair de S2
cond03	número de veículos operando em S2
cond3	número de veículos que saem de S2
c3	ocupação do veículo ao chegar em S3
d3	número de desembarques em S3
P3	Número de passageiros que não desembarcam em S3
V3	Quantidade de vagas no veículo ao chegar em S3
fila3	número de pessoas na fila em S3
plat3	número de pessoas na fila em S3 que realmente poderão embarcar
saida3	ocupação do veículo ao sair de S3
cond04	número de veículos operando em S3
cond4	número de veículos que saem de S3
c4	ocupação do veículo ao chegar em S4
d4	número de desembarques em S4
P4	Número de passageiros que não desembarcam em S4
V4	Quantidade de vagas no veículo ao chegar em S4
fila4	número de pessoas na fila em S4
plat4	número de pessoas na fila em S4 que realmente poderão embarcar
saida4	ocupação do veículo ao sair de S4
cond05	número de veículos operando em S4
cond5	número de veículos que saem de S4
c5	ocupação do veículo ao chegar em S5

d5	número de desembarques em S5
P5	Número de passageiros que não desembarcam em S5
V5	Quantidade de vagas no veículo ao chegar em S5
fila5	número de pessoas na fila em S5
plat5	número de pessoas na fila em S5 que realmente poderão embarcar
saida5	ocupação do veículo ao sair de S5
cond06	número de veículos operando em S5
cond6	número de veículos que saem de S5
c6	ocupação do veículo ao chegar em S6
d6	número de desembarques em S6
P6	Número de passageiros que não desembarcam em S6
V6	Quantidade de vagas no veículo ao chegar em S6
fila6	número de pessoas na fila em S6
plat6	número de pessoas na fila em S6 que realmente poderão embarcar
saida6	ocupação do veículo ao sair de S6
cond07	número de veículos operando em S6
cond7	número de veículos que saem de S6
c7	ocupação do veículo ao chegar em S7
d7	número de desembarques em S7
P7	Número de passageiros que não desembarcam em S7
V7	Quantidade de vagas no veículo ao chegar em S7
fila7	número de pessoas na fila em S7
plat7	número de pessoas na fila em S7 que realmente poderão embarcar
saida7	ocupação do veículo ao sair de S7
cond08	número de veículos operando em S7
cond8	número de veículos que saem de S7
c8	ocupação do veículo ao chegar em S8
d8	número de desembarques em S8
P8	Número de passageiros que não desembarcam em S8
V8	Quantidade de vagas no veículo ao chegar em S8
fila8	número de pessoas na fila em S8
plat8	número de pessoas na fila em S8 que realmente poderão embarcar
saida8	ocupação do veículo ao sair de S8
cond09	número de veículos operando em S8
cond9	número de veículos que saem de S8
c9	ocupação do veículo ao chegar em S9
d9	número de desembarques em S9
P9	Número de passageiros que não desembarcam em S9
V9	Quantidade de vagas no veículo ao chegar em S9
fila9	número de pessoas na fila em S9
plat9	número de pessoas na fila em S9 que realmente poderão embarcar
saida9	ocupação do veículo ao sair de S9
cond10	número de veículos operando em S9
final	ocupação do veículo ao chegar em S0

Transição	Função
Transição determinística	
T5	tempo para que um veículo esteja disponível em S0
Transições exponenciais	
T00	chegada de pessoas a S0
Emb0	tempo de permanencia em S0
T6	Tempo de viagem entre S0 e S1
T01	chegada de pessoas a S1
Emb1	tempo de permanencia em S1
T11	Tempo de viagem entre S1 e S2
T02	chegada de pessoas a S2
Emb2	tempo de permanencia em S2
T13	Tempo de viagem entre S2 e S3
T03	chegada de pessoas a S3
Emb3	tempo de permanencia em S3
T51	Tempo de viagem entre S3 e S4
T04	chegada de pessoas a S4
Emb4	tempo de permanencia em S4
T52	Tempo de viagem entre S4 e S5
T05	chegada de pessoas a S5
Emb5	tempo de permanencia em S5
T53	Tempo de viagem entre S5 e S6
T06	chegada de pessoas a S6
Emb6	tempo de permanencia em S6
T54	Tempo de viagem entre S6 e S7
T07	chegada de pessoas a S7
Emb7	tempo de permanencia em S7
T55	Tempo de viagem entre S7 e S8
T08	chegada de pessoas a S8
Emb8	tempo de permanencia em S8
T56	Tempo de viagem entre S8 e S9
T09	chegada de pessoas a S9
Emb9	tempo de permanencia em S9
T57	Tempo de viagem entre S9 e S0
Transições imediatas	
T0	Impede a quantidade de embarques em S0 seja maior que a capacidade do veículo
T4	Probabilidade de desembarques em S1
T3	Probabilidade de seguir viagem em S1
T2	Adiciona os desembarques em S1 à quantidade de vagas no veículo
T14	Garante que a quantidade de embarques em S1 seja menor ou igual à quantidade de vagas no veículo
T8	Probabilidade de desembarques em S2
T7	Probabilidade de seguir viagem em S2
T9	Adiciona os desembarques em S2 à quantidade de vagas no veículo
T15	Garante que a quantidade de embarques em S2 seja menor ou igual à quantidade de vagas no veículo

T12	Probabilidade de desembarques em S3
T10	Probabilidade de seguir viagem em S3
T18	Adiciona os desembarques em S3 à quantidade de vagas no veículo
T19	Garante que a quantidade de embarques em S3 seja menor ou igual à quantidade de vagas no veículo
T16	Probabilidade de desembarques em S4
T17	Probabilidade de seguir viagem em S4
T23	Adiciona os desembarques em S4 à quantidade de vagas no veículo
T22	Garante que a quantidade de embarques em S4 seja menor ou igual à quantidade de vagas no veículo
T20	Probabilidade de desembarques em S5
T21	Probabilidade de seguir viagem em S5
T28	Adiciona os desembarques em S5 à quantidade de vagas no veículo
T27	Garante que a quantidade de embarques em S5 seja menor ou igual à quantidade de vagas no veículo
T24	Probabilidade de desembarques em S6
T25	Probabilidade de seguir viagem em S6
T33	Adiciona os desembarques em S6 à quantidade de vagas no veículo
T32	Garante que a quantidade de embarques em S6 seja menor ou igual à quantidade de vagas no veículo
T26	Probabilidade de desembarques em S7
T29	Probabilidade de seguir viagem em S7
T36	Adiciona os desembarques em S7 à quantidade de vagas no veículo
T37	Garante que a quantidade de embarques em S7 seja menor ou igual à quantidade de vagas no veículo
T30	Probabilidade de desembarques em S8
T31	Probabilidade de seguir viagem em S8
T43	Adiciona os desembarques em S8 à quantidade de vagas no veículo
T42	Garante que a quantidade de embarques em S8 seja menor ou igual à quantidade de vagas no veículo
T34	Probabilidade de desembarques em S9
T35	Probabilidade de seguir viagem em S9
T48	Adiciona os desembarques em S9 à quantidade de vagas no veículo
T47	Garante que a quantidade de embarques em S9 seja menor ou igual à quantidade de vagas no veículo
T8	Probabilidade de desembarques em S10
T1	Impede o acúmulo de tokens no lugar final
