



Pós-Graduação em Ciência da Computação

Renata Cristine de Sá Pedrosa Dantas

# **Modelos de Desempenho, Confiabilidade e Disponibilidade para o Planejamento de Sistemas de Transporte Público**



Universidade Federal de Pernambuco

[posgraduacao@cin.ufpe.br](mailto:posgraduacao@cin.ufpe.br)

<http://cin.ufpe.br/~posgraduacao>

RECIFE

2019

Renata Cristine de Sá Pedrosa Dantas

**Modelos de Desempenho, Confiabilidade e  
Disponibilidade para o Planejamento de Sistemas de  
Transporte Público**

Este trabalho foi apresentado à Pós-Graduação em Ciência da Computação do Centro de Informática da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para obtenção do grau de Doutor em Ciência da Computação.

Orientador: Paulo Romero Martins  
Maciel

RECIFE  
2019

**FICHA**

**Renata Cristine de Sá Pedrosa Dantas**

**Modelos de Desempenho, Confiabilidade e Disponibilidade para o  
Planejamento de Sistemas de Transporte Público**

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência da Computação da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para a obtenção do título de Doutora em Ciência da Computação.

---

Prof. Dr. Djamel Fawzi Hadj Sadok Centro de Informática/  
UFPE

---

Prof. Dr. João Carlos Souza  
Departamento de Arquitetura e Urbanismo / UFSC

---

Prof. Dr. Ricardo Massa Ferreira Lima  
Centro de Informática / UFPE

---

Prof. Dr. Eduardo Antonio Guimaraes Tavares  
Centro de Informática / UFPE

---

Prof. Francisco Moraes de Oliveira Neto  
Departamento de Engenharia de Transportes / UFCE

Visto e permitido a impressão.  
Recife, 22 de Fevereiro de 2019.

---

**Prof. Aluizio Fausto Ribeiro Araújo**

Coordenador da Pós-Graduação em Ciência da Computação do  
Centro de Informática da Universidade Federal de Pernambuco.

*Dedico esta tese a todos os meus amores, aos que partiram para eternidade durante esta jornada do doutorado, aos que foram alento para continuar e, em especial, ao meu maior amor, meu filho, Davi.*

# Agradecimentos

Antes de qualquer coisa, eu preciso agradecer aquele que me deu o Dom da vida, me permitiu chegar até aqui e me permitirá muito mais. A Deus, toda a minha fé e amor, a ele que sempre foi misericordioso e que me carregou no colo em todos os momentos em que hesitei. Obrigada meu DEUS, por tudo!

Ao meu brilhante orientador, Prof. Dr. Paulo Maciel, que foi como um pai nestes 5 anos, com uma mão firme para guiar e apoiar, trazer a realidade sempre que necessário. Muito obrigada pela empatia a mim dispensada, desculpas pelo trabalho que dei.

Ao meu Filho amado, Davi Dantas, você sempre foi e será a minha prioridade, foi duro ter que abrir mão de momentos para me dedicar a este projeto, mas espero que um dia você entenda e possa se orgulhar da sua mãe, que faz o que for necessário para te ver bem! Amo-te, meu amor!

Ao meu Marido, Jamilson Dantas, por todo apoio e incentivo, pois sei que todas as cobranças foram para o meu bem, no final deram certo e, fizeram-me chegar até aqui! Muito obrigada! Amo-te muito, Feio!

À minha mãe, Iraci Pereira, maior incentivadora e torcedora que posso ter nesta vida. Amo-te muito, mãe!

A toda minha família que, diga-se de passagem, é maravilhosa e torce muito por mim!

Aos companheiros desta jornada e amigos de laboratório, principalmente, Rosângela, Carlos, Ronierisson, João e Aline, por todo o companheirismo e apoio nesses anos.

Aos amigos do IFPE, que me apoiaram e ajudaram para que pudesse me dedicar a esta tese.

Aos Membros da banca, pela oportunidade de enriquecer este trabalho e pela disponibilidade em participar.

Muito Obrigada!

*Ando devagar, porque já tive pressa  
E levo esse sorriso, porque já chorei demais  
Hoje me sinto mais forte, mais feliz, quem sabe  
Só levo a certeza de que muito pouco sei  
Ou nada sei  
Conhecer as manhas e as manhãs  
O sabor das massas e das maçãs  
É preciso amor pra poder pulsar  
É preciso paz pra poder sorrir  
É preciso a chuva para florir  
Penso que cumprir a vida seja simplesmente  
Compreender a marcha e ir tocando em frente  
Como um velho boiadeiro levando a boiada  
Eu vou tocando os dias  
Pela longa estrada, eu vou  
Estrada eu sou  
(...)  
Todo mundo ama um dia, todo mundo chora  
Um dia a gente chega e no outro vai embora  
Cada um de nós compõe a sua história  
Cada ser em si  
Carrega o dom de ser capaz  
E ser feliz  
(Tocando em Frente, Almir Sater e Renato Teixeira).*

# Resumo

Grandes cidades têm, cada vez mais, enfrentado problemas devido ao grande volume de veículos, o qual acarreta engarrafamentos e, conseqüentemente, perda de tempo e dinheiro, devido a falta de mobilidade urbana. O sistema de transporte público se apresenta como um componente essencial ao desenvolvimento de um país, no entanto, os países em desenvolvimento têm enfrentado diversos problemas. Este trabalho tem como objetivo o desenvolvimento de uma solução integrada, composta por modelos de desempenho, confiabilidade, disponibilidade e performabilidade para o planejamento de Sistema de Transporte Urbano de Média Prioridade (STUMP), com prioridade para a concorrência com os veículos na via. A solução que se busca permitirá que os gestores, com base nos modelos descritos, possam avaliar melhorias nos fatores que envolvem: otimização do tempo de viagem, confiança ao usuário sobre o tempo de chegada e o caminho do veículo, o impacto que a falha provoca no desempenho do sistema, diminuição do tempo de espera dos passageiros, melhor relação entre intervalos de partidas e quantidade de veículos na via, entre outros fatores. Nesta tese, são apresentados os conceitos básicos sobre avaliação de desempenho, confiabilidade, disponibilidade, modelagem analítica, bem como a composição dos Sistemas de Transporte, permitindo entender a aplicação de tais conceitos e possibilitar ao leitor uma visão global sobre o fundamento deste trabalho. Foram construídas metodologias para auxiliar os gestores de transporte apresentadas em: Metodologia para Modelagem de Desempenho, Metodologia de Modelagem para Confiabilidade e Disponibilidade e Metodologia de Modelagem para Performabilidade. Estas metodologias descrevem detalhadamente cada ponto necessário para a realização dos estudos que foram desenvolvidos nesta tese, que servem como instrumento auxiliar aos gestores. O emprego de estudos de caso endossou a importância de modelos para planejar o sistema: eles podem capturar informações sobre a chegada ao destino, o tempo de viagem, as probabilidades do passageiro desembarcar do veículo, além do processo de formação de filas no sistema, o que pode ajudar a desenvolver possibilidades de investimento e melhorias nos STUMP. Os principais resultados desta tese são os modelos desenvolvidos e avaliados que apontam novas perspectivas de avaliação para desempenho, confiabilidade, disponibilidade e performabilidade ao que se refere aos Sistemas de Transporte de Média prioridade. Esta tese se apresenta como um instrumento para melhorar os sistemas de forma contínua, servindo como apoio em processos de planejamento de Sistemas de Transporte.

**Palavras-chaves:** Sistema de Transporte de Média Prioridade, Modelagem Analítica, Avaliação de Desempenho e Performabilidade.



# Abstract

Large cities have increasingly faced problems due to the large volume of vehicles that leads to traffic jams, as well as to a consequent loss of time and money given the lack of urban mobility. The public transport system presents itself as an essential component of a country's development, though developing countries have faced a number of problems in this regard. The objective of this thesis is the development of an integrated solution comprising models of performance, reliability, availability and performance for the planning of a Medium-Priority Urban Transport System. The solution will enable managers, based on the models described, to evaluate improvements in the factors involving: the optimization of travel time, confidence of the user regarding the time of arrival and the route of the vehicle, the impact that failure causes in the performance of the system, decrease in passengers waiting time, better relation between intervals of departures and quantity of vehicles along the route, among others. In this thesis, the basic concepts concerning performance evaluation, reliability, availability, analytical modeling and the composition of Transportation Systems are presented, allowing to understand the application of such concepts and to provide the reader with a global view on the basis of this work. The use of case studies has endorsed the importance of models to plan the system, as they can capture information on the arrival at the destination, travel time, passenger's probabilities to disembark from the vehicle and the queuing process in the system, which can help developing investment possibilities and improvements in Medium-Priority Urban Transport Systems. This thesis presents itself as an instrument to improve the systems in a continuous way, serving as a support in the planning of Transport Systems.

**Key-words:** Medium-Priority Urban Transport Systems, Analytical Modeling, Performance Evaluation and Performability.

# Lista de ilustrações

Figura 1 – Relação performance do sistema <i>versus</i> custo de investimento. Adaptado de (VUCHIC, 2007) . . . . .	20
Figura 2 – Dependabilidade para sistemas. Extraído de (AVIZIENIS et al., 2001). . . . .	26
Figura 3 – Exemplo RBD . . . . .	31
Figura 4 – Elementos da Rede de Petri. . . . .	35
Figura 5 – Modelo de SPN . . . . .	36
Figura 6 – Exemplo de uma Rede de Petri com Disparo de Transição em Single e Infinite Server. . . . .	36
Figura 7 – Distribuição Empírica. . . . .	38
Figura 8 – Distribuição Erlang. . . . .	38
Figura 9 – Distribuição Hiper-exponencial. . . . .	39
Figura 10 – Distribuição Hipo-exponencial. . . . .	40
Figura 11 – Elementos de um STUMP. Adaptado de (DIAZ, 2004). . . . .	44
Figura 12 – Dependabilidade para sistemas de transporte. Adaptado de (AVIZIENIS et al., 2001). . . . .	48
Figura 13 – Metodologia. . . . .	62
Figura 14 – Metodologia para diagnóstico de desempenho em STUMPs. . . . .	63
Figura 15 – Metodologia para planejamento de STUMPs - Perspectiva de Desempenho. . . . .	64
Figura 16 – Metodologia para diagnóstico de confiabilidade e disponibilidade em STUMPs. . . . .	66
Figura 17 – Metodologia para planejamento de STUMPs - Perspectiva de confiabilidade e disponibilidade. . . . .	68
Figura 18 – Metodologia para diagnóstico de performabilidade em STUMPs. . . . .	70
Figura 19 – Metodologia para planejamento de STUMPs - Perspectiva de confiabilidade e disponibilidade. . . . .	72
Figura 20 – Distribuição Hypo-Exponencial. . . . .	76
Figura 21 – Distribuição Erlang. . . . .	76
Figura 22 – Modelo CTMC - Probabilidade de chegada do Veículo ao Destino. . . . .	76
Figura 23 – Modelo SPN - Probabilidade de chegada do Veículo ao Destino. . . . .	78
Figura 24 – SPN model of the BRT System. . . . .	80
Figura 25 – Modelo RBD para avaliação de STUMP. . . . .	90
Figura 26 – Modelo RBD para Dependabilidade de STUMPs . . . . .	93
Figura 27 – Modelo CTMC para avaliação de Performabilidade no STUMP . . . . .	94
Figura 28 – Probabilidades associadas aos estados absorventes. . . . .	95
Figura 29 – Modelo CTMT para avaliação de Performabilidade do Sistema de BRT, considerando viagens contínuas. . . . .	95

Figura 30 – Arquitetura Proposta . . . . .	98
Figura 31 – Probabilidade de Alcance de Destino. . . . .	100
Figura 32 – Probabilidade de Alcance de Destino no Intervalo ( $25 < T < 35$ ). . . . .	100
Figura 33 – Estudo dos Tempos - Caso 1. . . . .	101
Figura 34 – Probabilidade de Alcance de Destino - Modelo SPN Caso 1. . . . .	102
Figura 35 – Probabilidade de Alcance de Destino no Intervalo ( $25 < T < 35$ ) - Modelo SPN Caso 1. . . . .	103
Figura 36 – Probabilidade de Alcance do Destino - Cenário 2 . . . . .	105
Figura 37 – Probabilidade de Alcance do Destino em determinado Intervalo - Cenário 2	105
Figura 38 – Estudo dos Tempos - Caso 2. . . . .	106
Figura 39 – Combinações de parâmetros para o cenário. . . . .	107
Figura 40 – Resultados para MSS. . . . .	108
Figura 41 – Resultados para MQS. . . . .	109
Figura 42 – Resultados para MQT. . . . .	110
Figura 43 – Probabilidade de não embarcar no primeiro veículo do Sistema BRT. . . . .	112
Figura 44 – Utilização do Sistema BRT. . . . .	114
Figura 45 – Vazão do Sistema BRT. . . . .	116
Figura 46 – Resultados para MSS - Cenário 2. . . . .	118
Figura 47 – Resultados para MQS. . . . .	119
Figura 48 – Resultados para MQT. . . . .	120
Figura 49 – Resultados para Probabilidade de não embarcar no primeiro veículo. . . . .	120
Figura 50 – Resultados para Utilização . . . . .	121
Figura 51 – Resultados para Vazão. . . . .	122
Figura 52 – Análise de Sensibilidade para MSS. . . . .	124
Figura 53 – Análise de Sensibilidade para MQS. . . . .	124
Figura 54 – Análise de Sensibilidade para MQT. . . . .	125
Figura 55 – Análise de Sensibilidade para a Probabilidade de não embarcar no primeiro veículo do Sistema BRT. . . . .	126
Figura 56 – Análise de Sensibilidade para Utilização do Sistema BRT. . . . .	127
Figura 57 – Análise de Sensibilidade para Vazão do Sistema BRT. . . . .	128
Figura 58 – Modelo CTMC para avaliação de performabilidade no Sistema BRT . . . . .	132
Figura 59 – Performabilidade para o Sistema BRT . . . . .	133
Figura 60 – Performabilidade do sistema considerando o deslocamento constante. . . . .	134
Figura 61 – Performabilidade no Cenário 2. . . . .	135
Figura 62 – Performabilidade do sistema considerando viagens constantes, Caso 2. . . . .	136

# Lista de tabelas

Tabela 1 – Classificação dos modos de transporte público urbanos por categoria de prioridade e tecnologia. Adaptado de (VUCHIC, 2007) . . . . .	42
Tabela 2 – Comparação de Custos de Implantação de Sistemas de Transporte. Extraído de (HOOK; WRIGHT et al., 2016). . . . .	45
Tabela 3 – Custos do transporte público por ônibus, definido por (ANTP, 2017) . .	46
Tabela 4 – Valor Operacional para os tipos de veículos. Extraído de (AHMAD et al., 2018). . . . .	47
Tabela 5 – Custo de operação do veículo proporcional ao período de tempo desejado.	47
Tabela 6 – Trabalhos Relacionados mais relevantes. . . . .	58
Tabela 7 – Transições para o Modelo SPN. . . . .	81
Tabela 8 – Pesos dos Arcos para o Modelo SPN. . . . .	82
Tabela 9 – Métricas para avaliação do Modelo SPN. . . . .	89
Tabela 10 – Tempo de Viagem de um Sistema BRT, por (HUO et al., 2014). . . . .	99
Tabela 11 – Parâmetros de Entrada para cada Intervalo (Pico) . . . . .	99
Tabela 12 – Erro Médio para o MTTA. . . . .	101
Tabela 13 – Parâmetros de Entrada por cenário. . . . .	103
Tabela 14 – Relação entre os MTTAs. . . . .	104
Tabela 15 – Parâmetros de entrada para chegadas e desembarques nas estações. . .	107
Tabela 16 – Parâmetros de entrada para chegadas e desembarques nas estações. . .	117
Tabela 17 – Correlação entre diminuição do Tempo de Chegada e o Tamanho Médio do Sistema . . . . .	118
Tabela 18 – Correlação entre diminuição do Tempo de Chegada e o Tamanho Médio da Fila. . . . .	119
Tabela 19 – Transições para Análise de Sensibilidade. . . . .	123
Tabela 20 – Relação entre as métricas avaliadas e o custo operacional por veículos na rota - Intervalo de Partidas de 300s. . . . .	130
Tabela 21 – Tempo de Viagem de um Sistema BRT, por (HUO et al., 2014). . . . .	131
Tabela 22 – Parâmetros de Entrada para cada Intervalo (Pico) . . . . .	132
Tabela 23 – Dados de entrada do modelo. . . . .	133
Tabela 24 – Dados de entrada para CTMC de Performabilidade, Caso 2. . . . .	135
Tabela 25 – Relação entre as métricas avaliadas e o custo operacional por veículos na rota - Intervalo de Partidas de 60s. . . . .	156
Tabela 26 – Relação entre as métricas avaliadas e o custo operacional por veículos na rota - Intervalo de Partidas de 120s. . . . .	156
Tabela 27 – Relação entre as métricas avaliadas e o custo operacional por veículos na rota - Intervalo de Partidas de 600s. . . . .	157

Tabela 28 – Relação entre as métricas avaliadas e o custo operacional por veículos na rota - Intervalo de Partidas de 900s. . . . .	157
--	-----

# Lista de abreviaturas e siglas

**ACB** *Analise de Custo Beneficio.*

**BRT** *Bus Rapid Transit.*

**CEM** *combined evaluation method.*

**CTMC** Cadeia de Markov de tempo contínuo.

**DEA** *Data Envelopment Analysis.*

**DTMC** cadeia de Markov de tempo discreto.

**GIS** *Geographic information systems.*

**JTBI** *journey time buffer index.*

**LNS** *Large Neighborhood Search.*

**LP** *Linear Programming.*

**MTTA** *tempo médio de absorção.*

**MTTF** tempo médio de falha.

**MTTR** tempo médio de reparo.

**RBD** Diagrama de bloco de confiabilidade.

**ROW** *Right-of-Way.*

**SE-DEA** *Super-Efficiency Data Envelopment Analysis.*

**SPN** Rede de Petri Estocásticas.

**STUMP** *Sistema de Transporte Urbano de Média Prioridade.*

**VLT** Veículo Leve sobre Trilho.

# Sumário

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>17</b>
1.1	Contexto	17
1.2	Motivação e Justificativa	18
1.3	Objetivos	21
1.4	Contribuições	21
1.5	Organização do Trabalho	22
<b>2</b>	<b>REFERENCIAL TEÓRICO</b>	<b>23</b>
2.1	Avaliação de Desempenho	23
2.2	Dependabilidade	25
2.2.1	Confiabilidade	27
2.2.2	Disponibilidade	27
2.2.3	Manutenabilidade	29
2.3	Performabilidade	29
2.4	Técnicas para Modelagem de Desempenho, Dependabilidade e Performabilidade	30
2.4.1	Diagrama de Blocos de Confiabilidade - RBD	30
2.4.2	Cadeias de Markov	32
2.4.3	Redes de Petri	34
2.5	Técnica de Aproximação de Fases - <i>Moment Matching</i>	37
2.6	Análise de Sensibilidade	40
2.7	Sistemas de Transporte Urbano	41
2.7.1	Custos para STUMP	45
2.7.2	A Dependabilidade em STUMP	48
2.8	Considerações Finais	49
<b>3</b>	<b>TRABALHOS RELACIONADOS</b>	<b>50</b>
3.1	Avaliação em Sistemas de Transporte	50
3.2	Performabilidade Aplicada	55
3.3	Comparação Entre Trabalhos Relacionados	56
3.4	Considerações Finais	60
<b>4</b>	<b>METODOLOGIA</b>	<b>61</b>
4.1	Visão Geral	61
4.2	Modelagem para Desempenho	62
4.2.1	Método Diagnóstico para o Desempenho de STUMPs	62

4.2.2	Método de Planejamento para o Desempenho de STUMPs . . . . .	64
<b>4.3</b>	<b>Modelagem para Confiabilidade e Disponibilidade . . . . .</b>	<b>66</b>
4.3.1	Método Diagnóstico para Confiabilidade e Disponibilidade de STUMPs . . .	66
4.3.2	Método de Planejamento para a Confiabilidade e Disponibilidade de STUMPs	68
<b>4.4</b>	<b>Modelagem para Performabilidade . . . . .</b>	<b>69</b>
4.4.1	Método Diagnóstico para Performabilidade de STUMPs . . . . .	70
4.4.2	Método de Planejamento para a Performabilidade de STUMPs . . . . .	71
<b>4.5</b>	<b>Considerações Finais . . . . .</b>	<b>73</b>
<b>5</b>	<b>MODELOS . . . . .</b>	<b>74</b>
<b>5.1</b>	<b>Modelos de Desempenho . . . . .</b>	<b>75</b>
5.1.1	Modelo de Distribuição de Probabilidade do Tempo de Alcance de Destino - CTMC . . . . .	75
5.1.2	Modelo de Distribuição de Probabilidade do Tempo de Alcance de Destino - SPN . . . . .	77
5.1.3	Modelo para Avaliação de Métricas Estacionárias de Desempenho - SPN . .	79
5.1.4	Métricas para Avaliação do Modelo . . . . .	85
5.1.4.1	Métrica do Tamanho Médio do Sistema - MSS . . . . .	85
5.1.4.2	Métrica do Tamanho Médio da Fila - MQS . . . . .	86
5.1.4.3	Métrica do Tempo Médio de Fila - MQT . . . . .	86
5.1.4.4	Probabilidade de o Usuário perder o Ônibus (Probabilidade de não-embarcar no primeiro veículo (PNE) . . . . .	87
5.1.4.5	Métrica de Utilização . . . . .	87
5.1.4.6	Métrica de Vazão . . . . .	88
5.1.4.7	Métricas de Entrada no ®Mercury . . . . .	88
<b>5.2</b>	<b>Modelos de Confiabilidade e Disponibilidade . . . . .</b>	<b>90</b>
<b>5.3</b>	<b>Modelos de Performabilidade . . . . .</b>	<b>93</b>
<b>5.4</b>	<b>Considerações Finais . . . . .</b>	<b>96</b>
<b>6</b>	<b>ESTUDOS DE CASOS . . . . .</b>	<b>97</b>
<b>6.1</b>	<b>Estudos de Caso para Modelos de Desempenho . . . . .</b>	<b>97</b>
6.1.1	Estudos de Caso para Modelo de Distribuição de Probabilidade do Tempo de Alcance de Destino - CTMC . . . . .	98
6.1.1.1	Estudo de Caso 1 . . . . .	98
6.1.1.1.1	Comparando os resultados com o Modelo SPN . . . . .	102
6.1.1.2	Estudo de Caso 2 . . . . .	102
6.1.2	Estudos de Caso para Avaliação de Métricas Estacionárias de Desempenho - SPN . . . . .	105
6.1.2.1	Estudo de Caso 1 . . . . .	106
6.1.2.1.1	Tamanho Médio do Sistema (MSS) . . . . .	108



6.1.2.1.2	Tamanho Médio da Fila (MQS) . . . . .	109
6.1.2.1.3	Tempo Médio de Fila (MQT) . . . . .	110
6.1.2.1.4	Probabilidade de Não Embarcar no Primeiro Veículo que Chega à Estação . . . . .	111
6.1.2.1.5	Utilização do Sistema BRT . . . . .	113
6.1.2.1.6	Vazão do Sistema BRT . . . . .	115
6.1.2.2	Estudo de Caso 2 . . . . .	117
6.1.2.2.1	Tamanho Médio do Sistema (MSS) . . . . .	117
6.1.2.2.2	Tamanho Médio da Fila (MQS) . . . . .	118
6.1.2.2.3	Tempo Médio de Fila (MQT) . . . . .	119
6.1.2.2.4	Probabilidade de Não Embarcar no Primeiro Veículo que Chega à Estação . . . . .	120
6.1.2.2.5	Utilização do Sistema BRT . . . . .	121
6.1.2.2.6	Vazão do Sistema BRT . . . . .	122
6.1.3	Análise de Sensibilidade . . . . .	122
6.1.3.1	Análise de Sensibilidade para o Tamanho Médio do Sistema (MSS) . . . . .	123
6.1.3.2	Análise de Sensibilidade para o Tamanho Médio da Fila (MQS) . . . . .	124
6.1.3.3	Análise de Sensibilidade para o Tempo Médio de Fila (MQT) . . . . .	124
6.1.3.4	Análise de Sensibilidade para a Probabilidade de Não Embarcar no Primeiro Veículo que Chega à Estação . . . . .	125
6.1.3.5	Análise de Sensibilidade para a Utilização do Sistema BRT . . . . .	125
6.1.3.6	Análise de Sensibilidade para a Vazão do Sistema BRT . . . . .	128
6.1.4	Sumarizando Resultados com Comparativo de Custos . . . . .	129
<b>6.2</b>	<b>Estudos de Caso para Modelos de Performabilidade . . . . .</b>	<b>130</b>
6.2.1	Estudo de Caso 1 . . . . .	131
6.2.2	Estudo de Caso 2 . . . . .	134
<b>6.3</b>	<b>Resultados Alcançados . . . . .</b>	<b>136</b>
<b>7</b>	<b>CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS . . . . .</b>	<b>138</b>
<b>7.1</b>	<b>Limitações . . . . .</b>	<b>139</b>
<b>7.2</b>	<b>Trabalhos futuros . . . . .</b>	<b>140</b>
	<b>REFERÊNCIAS . . . . .</b>	<b>141</b>
	<b>APÊNDICE A – SCRIPT PARA AVALIAÇÃO DE MÉTRICAS DE DESEMPENHO EM SISTEMAS DE TRANSPORTE DE MÉDIA PRIORIDADE . . . . .</b>	<b>147</b>
	<b>APÊNDICE B – TABELAS ADICIONAIS SOBRE A RELAÇÃO DE MÉTRICAS COM O CUSTO . . . . .</b>	<b>156</b>

# 1 INTRODUÇÃO

Este capítulo apresenta uma breve introdução aos Sistemas de Transportes Públicos de Passageiros, com destaque aos *Sistema de Transporte Urbano de Média Prioridade* (STUMP), sob a perspectiva da avaliação de desempenho, disponibilidade, confiabilidade e performabilidade. Em seguida, são apresentadas as motivações e objetivos desta tese. Por fim, a estrutura geral da tese é apresentada.

## 1.1 Contexto

Grandes cidades têm, cada vez mais, enfrentado problemas devido ao grande volume de veículos, o que acarreta engarrafamentos e, conseqüentemente, perda de tempo e dinheiro, gerados pela falta de mobilidade urbana. É tema recorrente o tempo desperdiçado por cidadãos que precisam se deslocar para muitos lugares na sua rotina; como deixar os filhos na escola, ou ir e voltar do trabalho, bem como a realização de todas as outras atividades diárias necessárias que, recorrentemente, tem se tornado um problema para aqueles que estão em áreas metropolitanas (DENG; NELSON, 2013).

O sistema de transporte público se apresenta como um componente essencial ao desenvolvimento de um país, no entanto, estes que estão em desenvolvimento têm enfrentado diversos problemas. A falta de financiamento restringe os investimentos necessários para manutenção e ampliação do sistema de transporte público existente, o que acarreta em vários problemas tais como: acidentes, degradação ambiental, congestionamento e superlotação. Dessa maneira, eleva-se a necessidade de que se garanta que os sistemas de transporte público sejam seguros, acessíveis, eficientes e eficazes (PANCHORE; KHUSHWAHA, 2016).

Tais problemas levaram à falta de confiança do usuário, fazendo com que muitos parassem de usar o transporte público e continuassem usando seus veículos particulares (HISCOCK et al., 2002). Nos países em desenvolvimento, quanto maior o incentivo à indústria e o poder econômico, maior o número de pessoas que escolherão comprar um veículo próprio. O que, de fato, levará ao "caos" no tráfego, dada a incapacidade das estradas de suportar tantos veículos. Na maioria dos casos, os serviços de ônibus são considerados inseguros, insalubres e não confiáveis (BEIRÃO; CABRAL, 2007).

O desempenho do transporte público em algumas cidades que estão em desenvolvimento, está piorando, resultando, assim, uma pesada carga de tráfego, já que a sociedade prefere usar veículos particulares. Isso é inversamente proporcional ao rápido desenvolvimento da tecnologia de transporte público (SILAEN; NASUTION; SUWANTORO, 2018).

Em alternativa aos cenários de tráfego intenso, os governos têm investido em alter-

nativas de transporte público, visando criar sistemas de qualidade que permitam aos cidadãos migrar do uso de veículos particulares para o uso dos transportes públicos, o que possibilitaria a redução da quantidade de veículos nas vias. Uma solução que tem mostrado resultados satisfatórios são os Sistemas de Transporte Urbano de Média Prioridade STUMP (VUCHIC, 2007), estes sistemas são considerados de Média Prioridade, pois não competem diretamente com outros veículos na via, e operam em rotas exclusivas, ainda que em concorrência com o tráfego geral, com um método de cobrança de taxas diferenciado (antes do embarque), permitindo, assim, maior confiança no veículo em seu destino em um intervalo de tempo planejado.-

STUMP, mais precisamente os Sistemas BRTs, ganharam popularidade em todo o mundo, uma vez que oferecem serviços rápidos, verdes, seguros e eficientes. Além do que, o custo de um projeto de BRT pode ser cerca de um terço do custo de um projeto de transporte ferroviário. Os BRTs podem fornecer desempenho de qualidade com capacidade de transporte suficiente. (SILAEN; NASUTION; SUWANTORO, 2018)

O tráfego pesado gera grande impacto pela perda de tempo para o usuário e cria mais problemas ambientais, como a poluição sonora e emissões excessivas de gases de efeito estufa. Existe, também, um impacto econômico negativo, a exemplo do custo de congestionamento no Brasil em 2018, medido em termos de horas de trabalho perdidas e consumo de combustível extra, que foi estimado em R\$ 267 bilhões (RAMALHO, 2018).

Alguns fatores mostram diferenciais para que se escolha o tipo de transporte que se quer utilizar. Parâmetros como o desempenho, a confiabilidade e a performabilidade aparecem como referência para balizar e referendar esta escolha, ou seja, planejamentos de sistemas de transporte que considerem estes fatores poderão oferecer garantias de qualidade ao usuário.

## 1.2 Motivação e Justificativa

É recorrente a leitura de notícias que relatam o caos enfrentado no transporte público nos países *em desenvolvimento*. Em uma busca no Google ©, em Língua Portuguesa, pelos termos "Problemas no Transporte Público", surgem mais de 60 milhões de resultados possíveis, dos quais mais de 2 milhões são notícias, isto em Outubro de 2018 (GOOGLE, 2018). No Brasil, este problema é tão evidente, que estudos já relatam que os problemas de transporte afetam diretamente a saúde, educação e cultura (BRASIL, 2016). Tais problemas levam a questionamentos sobre a efetividade dos métodos atuais de Planejamento de Sistemas de Transporte.

Os problemas no Transporte Público acarretam a falta de confiança para o usuário, o que faz com que muitos deixem de usar o transporte coletivo para permanecerem usando seus veículos particulares. Quanto mais desenvolvimento têm os países *emergentes*, mais incentivo dado à indústria; quanto maior poder econômico, mais as pessoas optam por

adquirirem novos veículos para o transporte. As consequências são o caos no trânsito, considerando a incapacidade das vias de comportarem tantos veículos. Na maioria das vezes, os serviços de ônibus são tidos como pouco convenientes, inseguros e pouco confiáveis (ARIAS et al., 2008). Sob esta perspectiva, é necessário o investimento em planejamento de transporte, visando alternativas que possam garantir conforto, confiança e segurança aos usuários.

(INGVARDSON; JENSEN, 2012) descrevem que um sistema de transporte público eficiente e atraente deve fornecer velocidade alta, alta frequência de operação, conforto ao usuário e um serviço previsível. Nos congestionamentos vistos nas grandes cidades, velocidades mais elevadas só poderão ser alcançadas em vias segregadas. O conforto ao usuário só é possível com veículos de qualidade e estações bem estruturadas, enquanto a previsibilidade dos serviços depende do controle e da não interferência de fatores externos no sistema.

Ainda segundo (INGVARDSON; JENSEN, 2012) os atributos descritos podem ser encontrados em sistemas modernos de metrô e sistemas ferroviários rápidos, que precisam de infraestrutura especializada, como veículos especiais, um alto nível de controle e, consequentemente, alto custo. Em contraste, os serviços de ônibus convencionais exigem grande quantidade de veículos, ainda que básicos, e estão sujeitos a congestionamentos, falta de conforto, além de um alto grau de aleatoriedade, ou seja, baixa previsibilidade dos serviços, no entanto, apresentam um alto grau de flexibilidade que permite adequação dos serviços.

Para uma avaliação de STUMP será considerado o que (VUCHIC, 2007) descreve como a categoria B de Prioridade de via *Right-of-Way* (ROW), onde as rotas são fisicamente separadas por calçadas, barreiras, separações de nível ou similares, de outros tipos de tráfego, mas com passagens, nesta rota, para pedestres e veículos, incluindo os cruzamentos de ruas. Destacam-se os seguintes tipos de stump: Veículo Leve sobre Trilho (VLT), *Bus Rapid Transit* (BRT) e Veículo guiado (*Guided Bus*).

O Sistema BRT se apresenta como um conceito capaz de combinar os elementos positivos do serviço ferroviário com os baixos custos e flexibilidade dos sistemas convencionais de ônibus. O Sistema VLT se aproveita da tecnologia ferroviária, no entanto, pode atuar no tráfego misto, além de apresentar alta capacidade, sistema de serviço equivalente aos de trens, oferece conforto aos usuários e uma boa imagem. O Veículo Guiado pode ser operado em via normal e via segregada, com alta velocidade e maior confiança de alcance de destino, com conforto e boa capacidade. A Figura 1, apresenta a relação capacidade de atendimento a usuários numa relação aos custos necessários para implantação do sistema.

Quando se busca a eficácia para o transporte público é preciso aliar ao planejamento a relação custoXbenefício, ou seja, atender a demanda existente, porém, com menos dispêndio de recursos. Como pode ser visto na Figura 1 o Sistema BRT surge como uma alternativa viável, dada a boa capacidade de atendimento de demanda e um relativo, baixo investimento. Os sistemas VLTs, embora necessitem de um investimento maior, possuem uma boa capacidade de atendimento de demanda, o que mostra também sua boa

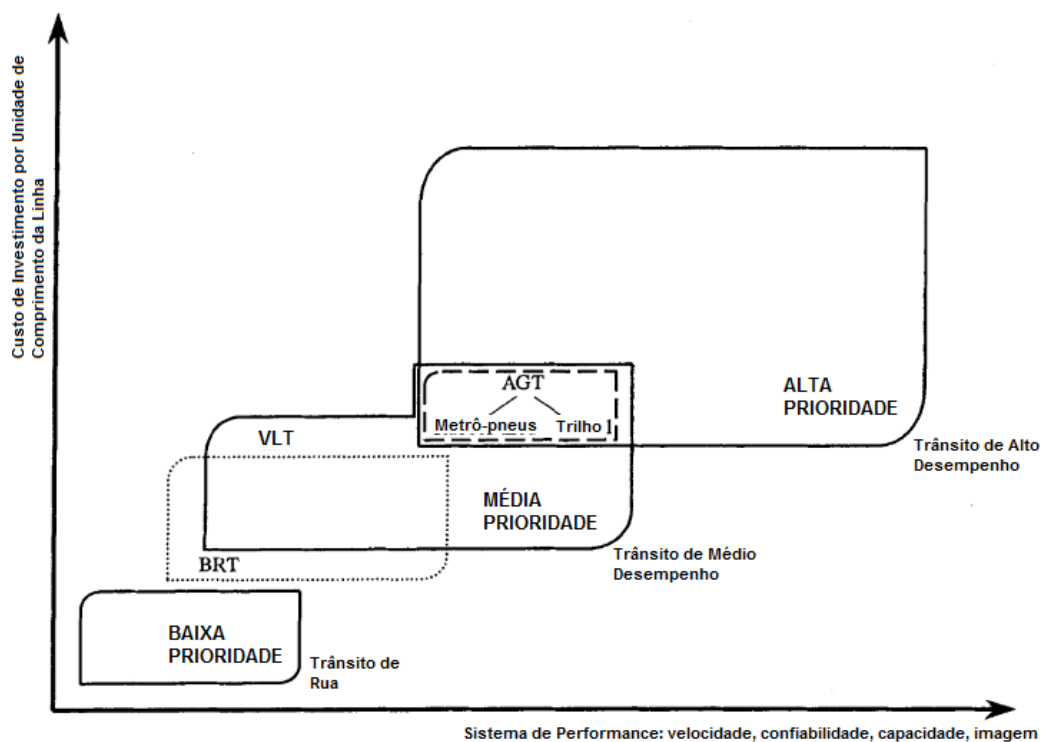


Figura 1 – Relação performance do sistema *versus* custo de investimento. Adaptado de (VUCHIC, 2007)

viabilidade.

O Brasil conta com 80 corredores BRTs distribuídos em 21 cidades, que transportam diariamente 10.752.477 de passageiros (BRTDATA, 2017) como fruto dos investimentos que foram planejados, principalmente, em virtude da realização da Copa do Mundo de 2014. Embora existisse planejamento para a implantação do sistema VLT em muitas cidades do Brasil, este só encontra-se em funcionamento em duas delas, Rio de Janeiro e Fortaleza (BRASIL, 2017). Estes sistemas foram implementados, justamente, por esta perspectiva de proporcionar melhoria na mobilidade das cidades e ter uma boa relação de custo X benefício.

Sob uma perspectiva macro e inicial, o que se percebe é que os STUMP é capaz de gerar benefício aos usuários (pela confiança, segurança e conforto), aos governos (pelo ganho possibilitado por menores investimentos) e, de modo geral, à sociedade no entorno (por menores níveis de emissão de gases, desenvolvimento local e a possibilidade de menores fluxos de veículos).

Acreditando poder dar significativa contribuição à sociedade, é que se pensou como objeto empírico deste trabalho uma análise do Sistema de Transporte Público, com foco nos STUMP. Então, tornou-se emergente a necessidade de identificar quais fatores podem ser diferenciais e podem ajudar a efetividade deste Sistema.

Assim, surgiu a propositura desta tese, que visa, através de conceitos de Avaliação de Desempenho de Sistemas, Confiabilidade, Disponibilidade, Performabilidade e Modelagem

Analítica, propor um *framework* para entender, avaliar e desenvolver melhorias para os STUMP existentes, ou mesmo auxiliar na implantação e desenvolvimento de Sistemas de Transporte Urbano.

O objeto teórico deste trabalho tratará do desenvolvimento dos conceitos de: Avaliação de Desempenho, Confiabilidade, Disponibilidade (confiabilidade e disponibilidade) e performabilidade, que apontarão a novos indicadores como os relacionados a filas, tempo de espera, tempo de viagem, entre outros.

Este trabalho ganha relevância para a Academia pela inovação nos instrumentos de análise de Sistemas, mostrando que os conceitos computacionais são perfeitamente aplicáveis às mais diversas áreas do conhecimento, assim como podem fomentar o desenvolvimento nas mais diversas esferas de estudo.

### 1.3 Objetivos

Este trabalho tem como objetivo o desenvolvimento de alternativas de solução integrada composta por modelos baseados em SPN, CTMC e RBD, para avaliação de desempenho, confiabilidade, disponibilidade e performabilidade para a avaliação e o planejamento de STUMP. A solução que se busca permitirá que os gestores, com base nos modelos descritos, possam avaliar melhorias nos fatores que envolvem: otimização do tempo de viagem, confiança ao usuário sobre o tempo de chegada e o caminho do veículo, o impacto que a falha provoca no desempenho do sistema, diminuição do tempo de espera dos passageiros, melhor relação entre intervalos de partidas e veículos na via, entre outros possíveis fatores.

Neste íterim, este trabalho busca promover possibilidades para o aprimoramento de STUMP, sob a perspectiva de melhores resultados de tempo, custo e equipamento para os operadores.

Assim, são apresentados os objetivos específicos trabalhados:

- Definir uma estratégia de modelagem para avaliar STUMP considerando tempo de chegada (desempenho), confiabilidade, disponibilidade, performabilidade e custo operacional;
- Construir os modelos de desempenho, confiabilidade, disponibilidade e performabilidade;
- Desenvolver cenários de avaliação, visando melhorias para os STUMPs.

### 1.4 Contribuições

As principais contribuições que se buscam com esta tese são:

- Modelos de desempenho que permitam estimar a probabilidade de alcance de destino e o tempo de chegada de veículos em STUMP, além de permitir estimar análises sobre a relação usuários - veículos - intervalos de partida e custo;
- Modelos de confiabilidade e disponibilidade, para avaliar o tempo de falha e a probabilidade do Sistema não entrar em defeito em dado intervalo de tempo;
- Modelo de Performabilidade que permita avaliar o impacto da falha no desempenho de STUMP, ou seja, a possibilidade do Sistema parar de operar;
- Possibilitar ao gestor subsídios, a partir da avaliação das métricas dos modelos, para a tomada de decisão sobre alternativas para planejamento em STUMP.

Tais resultados permitirão o planejamento adequado de infraestruturas de transporte, além de possibilitar modificações nos Sistemas já em funcionamento. Os produtos desta pesquisa são supostos para ajudar o cumprimento das expectativas de usuários e administradores públicos, principalmente, para promover melhores serviços de transporte.

## 1.5 Organização do Trabalho

O Capítulo 2, apresenta a fundamentação teórica do trabalho, destacando conceitos de Avaliação de Desempenho, Dependabilidade (Confiabilidade e Disponibilidade) e Performabilidade, Técnicas de modelagem, assim como são apresentados os STUMP, com destaques para a apresentação de custo para estes sistemas. O Capítulo 3, apresenta os trabalhos atuais relevantes à pesquisa, encontrados na literatura, que demonstram a diferenciação desta tese em relação aos demais estudos realizados. No Capítulo 4, é apresentada a metodologia e os métodos da solução integrada para o planejamento de STUMP. O Capítulo 5, aborda a descrição dos modelos, apontando as métricas a serem avaliadas e como estes podem ser utilizados para representar e avaliar sistemas de transporte. A partir dos modelos utilizados são elaborados estudos de caso, apresentados no Capítulo 6, que foram utilizados para verificar a aplicabilidade da abordagem descrita, foram construídos visando obter instrumentos para auxiliar o planejamento de sistemas de transporte. As conclusões, limitações e trabalhos futuros são descritos no Capítulo 7.

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

Este capítulo descreve os principais conceitos que norteiam este trabalho. Numa busca por elucidar e concatenar os conceitos, estes serão apresentados da seguinte forma: primeiramente, serão vistos os conceitos que envolvem Avaliação de Desempenho; posteriormente Avaliação de Dependabilidade com foco em disponibilidade e confiabilidade, finalizando, a parte de avaliação com Performabilidade. Posto isto, serão apresentadas as Técnicas de Modelagem, destacando a modelagem em Diagrama de bloco de confiabilidade (RBD), Cadeia de Markov de tempo contínuo (CTMC) e Rede de Petri Estocásticas (SPN). Concluindo, serão apresentados os conceitos que envolvem os Sistemas de Transporte destacando como a dependabilidade pode ser vista sob esta ótica.

### 2.1 Avaliação de Desempenho

Os usuários de sistemas computacionais, administradores, entre tantos outros profissionais se interessam pela avaliação de desempenho como forma de se obter o mais alto desempenho com o menor custo. A avaliação de desempenho é necessária em todas as fases do ciclo de vida de um sistema, incluindo a sua concepção, fabricação, venda / compra, uso, atualização e assim por diante. A avaliação de desempenho é necessária quando um designer de sistema de computador quer comparar uma série de projetos alternativos e encontrar o melhor design. Exige-se, portanto, quando um administrador de sistema quer comparar um número de sistemas e quer decidir qual é o melhor para um dado conjunto de aplicações (JAIN, 1991).

A avaliação de desempenho ajuda a determinar o desempenho dos sistemas e as melhorias necessárias a estes, no entanto, dado a numerosidade dos sistemas existentes, não há um padrão de desempenho estabelecido, nem mesmo um ambiente ou técnica padrão para avaliar desempenho.

Assim, o primeiro passo na avaliação de desempenho é selecionar as medidas, os ambientes e as técnicas mais adequadas. Assim, os objetivos serão determinados buscando o melhor desempenho para um dado custo, o que deverá ser feito pelo analista que indicará os requisitos necessários e a comparará às alternativas de desempenho que melhor atenderá à sua necessidade (JAIN, 1991).

Toda a avaliação de desempenho requer um conhecimento profundo do sistema que está sendo modelado e uma cuidadosa seleção da metodologia, carga de trabalho e ferramentas. Quando apresentado pela primeira vez, a maioria dos problemas de desempenho são expressos com um sentido abstrato, como um esboço para, posteriormente, ser definido o problema real e convertê-lo na forma em que as ferramentas e técnicas estabelecidas



possam ser usadas minimizando as limitações existente e percebidas pelo usuário. Assim, é papel do analista escolher as diferentes métricas de desempenho e metodologias de avaliação.

As três técnicas de avaliação de desempenho são modelagem analítica, simulação e medição. A consideração fundamental para decidir a técnica de avaliação é a fase do ciclo de vida em que o sistema está (JAIN, 1991). As medições são possíveis apenas se algo semelhante ao sistema proposto já existe, tal como na concepção de uma versão melhorada de um produto. Se é um novo conceito, modelagem analítica e simulação são as únicas técnicas para se escolher. Modelagem analítica e de simulação pode ser usada em situações em que a medição não é possível, porém, em geral, ele seria mais convincente para os outros se a modelagem analítica ou simulação fosse baseada na medição anterior.

Técnicas baseadas em medição requerem a construção de um ambiente real e envolve a monitoração do sistema, enquanto está sob a ação de uma carga de trabalho. Antes da aplicação da carga de trabalho no sistema, deve-se ter um estudo primário sobre a carga que deverá ser aplicada. A escolha da carga de trabalho é tão importante quanto à definição de qual estratégia de medição deve ser seguida, pois, é a partir dela que se deverá escolher ferramentas e estratégias de medição (LILJA, 2005).

Ferramentas que auxiliam a avaliação de desempenho de sistemas modificam o comportamento do que está sendo medido. Quanto maior a quantidade de informações e resolução que a ferramenta de medição pode fornecer, maior será a perturbação introduzida por essa ferramenta. Essa perturbação introduzida pela ferramenta de medição torna os dados coletados por ela menos confiáveis (LILJA, 2005). Desta forma, ferramentas de medição dirigida a evento são, de certa forma, mais confiáveis, pois oferecem uma menor perturbação aos dados medidos, ocasionadas apenas quando há ocorrência de eventos. Por outro lado, a frequência dos eventos é que vai determinar a perturbação ocasionada pelos eventos gerados. Outro tipo de ferramenta de medição é por amostragem, a qual ocasiona perturbações, independente do número de vezes que o evento ocorre (LILJA, 2005) (MENASCE et al., 2004).

Técnicas baseadas em modelagem podem ser resolvidas tanto analiticamente, quanto por simulação. Os modelos analíticos utilizam fórmulas fechadas ou um conjunto de sistema de equações para descrever o comportamento de um sistema. As métricas de interesse podem ser fornecidas por meio da solução de fórmulas fechadas ou da solução, exata ou aproximada, de um conjunto de sistema de equações providas por algoritmos da matemática numérica (BOLCH et al., 2006).

Já os modelos de simulação podem ser utilizados tanto na avaliação de desempenho de sistemas, quanto na validação dos modelos analíticos. Ao contrário das medições, as simulações baseiam-se em modelos abstratos do sistema, logo não exigem que o sistema esteja totalmente implantado para que sejam aplicadas. Assim, os modelos utilizados durante a simulação são elaborados através da abstração de características essenciais do sistema, no entanto, a complexidade e o grau de abstração deles podem variar de um

sistema para outro. Durante a simulação, controlam-se, com maior eficiência, os valores assumidos por parâmetros do sistema (LILJA, 2005) (MENASCE et al., 2004).

Nesta tese, a proposta é utilizar a modelagem analítica, com dados bibliográficos, para que em trabalhos futuros possa ser utilizada a medição como forma de prover melhores resultados para comparação e validação do modelo, já que a modelagem requer menores custos que podem tornar-se mais efetivos num processo de planejamento.

Outro aspecto importante no processo de avaliação de desempenho é a seleção das métricas e parâmetros de desempenho. A seleção de Métricas representa os critérios para comparar o desempenho e, em geral, estão relacionados com a velocidade, a precisão e a disponibilidade de serviços. A seleção de parâmetros consiste em fazer uma lista de todos os parâmetros que afetam o desempenho (JAIN, 1991).

## 2.2 Dependabilidade

A dependabilidade de um sistema é a sua capacidade de fornecer um conjunto de serviços confiáveis que podem ser observados por agentes externos. Um serviço é confiável quando implementa as funcionalidades especificadas para o sistema, podendo ocorrer o defeito se este não conseguir prover o que foi especificado. (MACIEL et al., 2011)

(LAPRIE, 1992) definiu conceitos de dependabilidade no livro *Dependability Basic Concepts and Terminology*, que são os mais utilizados quando se busca referenciar a dependabilidade. (AVIZIENIS et al., 2001), descrevem como atributos da dependabilidade: a confiabilidade, a disponibilidade, a segurança, a capacidade de sobrevivência e a manutenibilidade.

Ainda segundo (AVIZIENIS et al., 2001) os conceitos de dependabilidade consistem em três partes: as ameaças, os atributos e os meios pelos quais a dependabilidade é atingida, expostos em forma de árvore para facilitar a visualização, como pode ser visto na Figura 2.

De acordo com a árvore de Dependabilidade (AVIZIENIS et al., 2001), as ameaças à dependabilidade podem ser descritas como:

- Falhas: Uma falha (fault) é definida como a falha de um componente, subsistema ou sistema que interage com o sistema em questão (Maciel et al.2012).
- Erro (Erros): é definido como um estado que pode levar à ocorrência de uma falha.
- Defeito (Failure): representa o desvio do funcionamento correto de um sistema.

Os atributos de dependabilidade (AVIZIENIS et al., 2001), são:

- Confiabilidade: que corresponde à probabilidade de o sistema prover o serviço ininterruptamente, sem defeitos, até determinado instante de tempo (t);

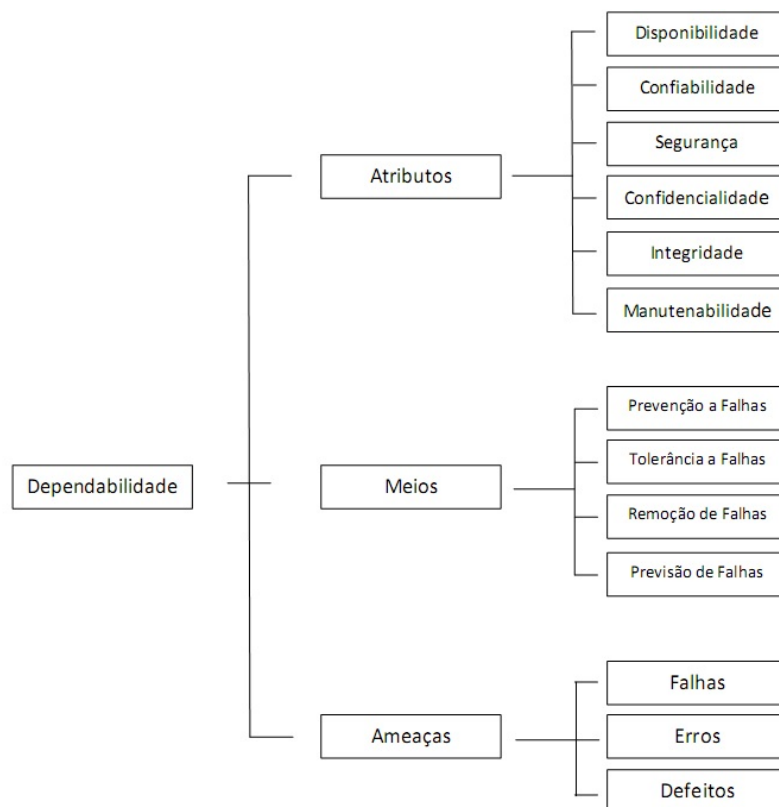


Figura 2 – Dependabilidade para sistemas. Extraído de (AVIZIENIS et al., 2001).

- Disponibilidade: é a possibilidade de o sistema prover, continuamente, o serviço de maneira correta;
- Segurança: ausência de consequências catastróficas para o(s) usuário(s) e o ambiente;
- Confidencialidade: ausência da divulgação de qualquer informação não autorizada pelo usuário;
- Integridade: pode ser entendida como a ausência de alterações impróprias no estado do sistema;
- Manutenibilidade: corresponde à capacidade do sistema de sofrer reparos e modificações.

Visando o foco do estudo, serão tratados, no tópico seguinte, mais especificamente, os atributos de dependabilidade: confiabilidade, disponibilidade e manutenibilidade, que foram utilizados no recorte da pesquisa sob a perspectiva de aplicabilidade em sistemas de transportes.

Sob a perspectiva da Árvore de dependabilidade (Figura 2), são debatidos os meios para o alcance da dependabilidade, desenvolvidos através de técnicas específicas (AVIZIENIS et al., 2001):

- prevenção de falhas (fault prevention): corresponde à forma como prevenir a ocorrência ou a introdução de falhas no sistema;
- tolerância a falhas (fault tolerance): diz respeito a como entregar serviço correto ainda que ocorram falhas;
- remoção de falhas (fault removal): refere-se a como reduzir o número ou a gravidade das falhas;
- previsão de falha (fault forecasting): possibilita estimar o número atual, a incidência futura e a provável consequência da ocorrência de falhas no sistema.

Sob esta perspectiva, busca-se estudar e referendar a capacidade de um sistema de transporte de manter dependável, considerando os aspectos referidos, apontando possibilidades de atuação para o alcance efetivo da dependabilidade.

Neste trabalho, a priori, busca-se vislumbrar a dependabilidade sob três atributos específicos: confiabilidade, disponibilidade e manutenibilidade, que serão apresentados a seguir.

### 2.2.1 Confiabilidade

A confiabilidade é definida como a probabilidade de que um dispositivo executará as suas funções pretendidas, satisfatoriamente, durante um determinado período de tempo sob condições definidas (KUROKI; ZUO, 2003). Assim sendo, a confiabilidade não considera o reparo e diz ser a probabilidade do sistema está funcionando de forma ininterrupta em um determinado período do tempo. Ela está representada pela Equação 2.1.

$$R(t) = P \{T \geq t\}, t \geq 0, \quad (2.1)$$

Onde  $T$  é uma variável aleatória, que representa o tempo para ocorrência da falha no sistema em certo intervalo de tempo  $t$ . A inconfiabilidade pode ser representada pela Equação 2.2.

$$F(t) = 1 - R(t), P \{T < t\}, \quad (2.2)$$

Onde,  $R(t)$  é a confiabilidade. Desta forma, pode-se avaliar a probabilidade do sistema entrar em defeito.

### 2.2.2 Disponibilidade

A disponibilidade de um sistema pode ser entendida como a probabilidade do sistema estar funcionando em um determinado tempo desejado ou durante um período de tempo esperado, considerando falhas e/ou reparos ocorridos nesse intervalo. Desta forma, pode-se

considerar um indicador de uma variável aleatória  $X(t)$  que representa o estado do sistema no momento  $t$ , onde  $X(t) = 1$  representa o estado operacional do sistema e  $X(t) = 0$  o estado de falha. Mais formalmente, considerado-se uma variável aleatória  $T$  que indica o tempo necessário para atingir o estado  $X(t) = 0$ , uma vez que o sistema começou no estado  $X(0) = 1$ .  $T$  é o tempo de sistema  $S$  à falha,  $F_T(t)$  a sua função de distribuição acumulada e  $f_T(t)$  da respectiva função de densidade, em que:

$$\begin{aligned} F_T &= 0 \text{ and } \lim_{t \rightarrow \infty} F_T = 1, \\ f_T(t) &= \frac{dF_T(t)}{dt}, \\ f_T(t) &\geq 0 \text{ and } \int_0^{\infty} f_T(t) dt. \end{aligned} \quad (2.3)$$

A Equação 2.4 representa a disponibilidade de um sistema expresso através da relação entre tempo médio de falha (MTTF) (Equação 2.6) e tempo médio de reparo (MTTR) (Equação 2.7). A disponibilidade calculada desta forma será um número entre zero e um. Esse valor também pode ser expresso em termos de números de noes. Por exemplo, se a disponibilidade do sistema é igual a 0,999876, isso indica que o sistema se encontra funcionando durante 99,9876% do tempo e inativo em 0,0124% do tempo observado. O número de noes da disponibilidade pode ser calculada conforme a Equação 2.5, em que 100 representa o nível de disponibilidade máxima que o sistema pode atingir e  $A$  representa a disponibilidade real do sistema.

$$A = \frac{uptime}{uptime + downtime} \quad (2.4)$$

$$N = 2 - \log(100 - A) \quad (2.5)$$

onde,

$$MTTF = \int_0^{\infty} R(t) dt, \quad (2.6)$$

$$MTTR = MTTF \times \frac{UA}{A} \quad (2.7)$$

$UA$  representa a indisponibilidade do sistema (Equação 2.8) e  $A$  a disponibilidade do sistema *Availability* (Equação 2.4).

$$UA = 1 - A \quad (2.8)$$

Assim, o *downtime* anual (tempo de inatividade do sistema no período de um ano) pode ser calculada seguindo a Equação 2.9.

$$D = UA \times h \quad (2.9)$$

Onde  $h$  representa o tempo em horas.

### 2.2.3 Manutenibilidade

Refere-se a manutenções realizadas no sistema em determinado período de tempo mediante ocorrência de falhas, a manutenibilidade é expressa pela Equação 2.10, onde  $T$  representa o tempo de inatividade do sistema (downtime) sendo representado por uma função de densidade  $g(t)$ .

$$V(t) = P \{T \leq t\} = \int_0^t g(t) dt \quad (2.10)$$

Dado que um Sistema está em falha a manutenibilidade é a probabilidade do que o sistema seja reparado em até  $T$  unidades de tempo.

## 2.3 Performabilidade

A performabilidade consiste no estudo do desempenho aliado à dependabilidade, o que proporciona resultados mais consistentes no que tange à avaliação do sistema. Independentemente do sistema que se busque avaliar, o estudo de performabilidade permite descrever o efeito da ocorrência de falhas e reparos na degradação do desempenho do sistema.

Com relação ao desempenho, é preciso definir, inicialmente, os padrões considerados adequados ao funcionamento do sistema para, assim, medir o seu desempenho. Quanto à confiabilidade, considera-se a continuidade do serviço, considerando a probabilidade da não ocorrência de falhas em determinado tempo ( $t$ ) (MEYER, 1992).

A modelagem de performabilidade consiste em modelos que contemplem aspectos de desempenho e dependabilidade de sistemas. Permite a avaliação do desempenho de sistemas considerando os níveis de degradação de serviços, que são ocasionadas por falhas no sistema em determinado período de tempo (HAVERKORT, 2001).

A modelagem de desempenho e dependabilidade, geralmente, ocorre de maneira separada, já que se considera que componentes individuais ou subsistemas podem não afetar, necessariamente, o desempenho do sistema. Em sistemas tolerantes a falhas, que objetivam o fornecimento contínuo do serviço, mesmo com perdas no desempenho, não se deve utilizar a modelagem independente para que não se tenha uma avaliação incompleta ou inexata. Um modelo de performabilidade pode ser representado através de um modelo de dependabilidade, um modelo de desempenho e um método para combinar os resultados desses modelos (REIBMAN, 1990).

Nesta tese, para o estudo de performabilidade foi feita a composição de uma pesquisa sobre desempenho, considerando a probabilidade do veículo finalizar a viagem e o tempo para este fato acontecer, assim como um estudo sobre a confiabilidade, considerado a probabilidade de defeito do sistema, ou seja, que este esteja inoperante. Destes estudos foi

feita a composição verificando como a falha afeta o desempenho, que é o que representa a performabilidade.

## 2.4 Técnicas para Modelagem de Desempenho, Dependabilidade e Performabilidade

Para a modelagem da dependabilidade existem duas categorias de modelos que podem ser utilizadas: os que são classificados como Modelos Combinatórios, que representam as condições sob as quais um sistema pode se encontrar em falha, ou estar operacional, em termos de relações estruturais entre seus componentes; e os Modelos Baseados em Espaço de Estados, que representam o comportamento do sistema através de estados e eventos que provocam transições entre os estados. (MACIEL et al., 2011)

Sob a perspectiva da classificação de Modelos Combinatórios, encontram-se as técnicas de modelagem: Diagramas de Blocos de Confiabilidade (RBD), árvore de falhas (Fault Tree) e Grafos para a Confiabilidade (RG), como os mais importantes tipos de modelos. Por outro lado, sob a perspectiva dos Modelos baseados em Espaço de Estados, os principais modelos são: Cadeias de Markov, Redes de Petri Estocásticas (SPN) e Álgebras de Processos Estocásticos (MACIEL et al., 2011).

Para sistemas complexos, pode ser utilizada a Modelagem Hierárquica, que consiste na combinação dos modelos existentes, para a composição do sistema.

### 2.4.1 Diagrama de Blocos de Confiabilidade - RBD

Técnica bastante usada para análise da confiabilidade de sistemas, RBDs são frequentemente utilizados para descrever a relação entre o funcionamento de um sistema e dos seus componentes (KUO; ZUO, 2003). Um modelo em RBD fornece estrutura lógica de componentes interligados, verificando as combinações de blocos conectados capazes de deixar o sistema funcionando.

RBDs têm sido usados para representar estruturas em série, em paralelo, estrutura de pontes, de redes em geral e de sistemas k-out-of-n. Esse último não pode ser representado sem que se tenha um componente duplicado (KUO; ZUO, 2003).

Para o exemplo da Figura 3, tem-se um modelo RBD em série (Figura 3(a)) e paralelo (Figura 3(b)). A interpretação de um modelo em RBD é feita pela observância dos componentes da esquerda para a direita. Assim, em uma estrutura em série, se um único componente falhar, o sistema todo estará down. Em um sistema com n elementos, a confiabilidade é obtida pela Equação 2.11:

$$R_s(t) = \prod_{i=1}^n R_i(t) \quad (2.11)$$

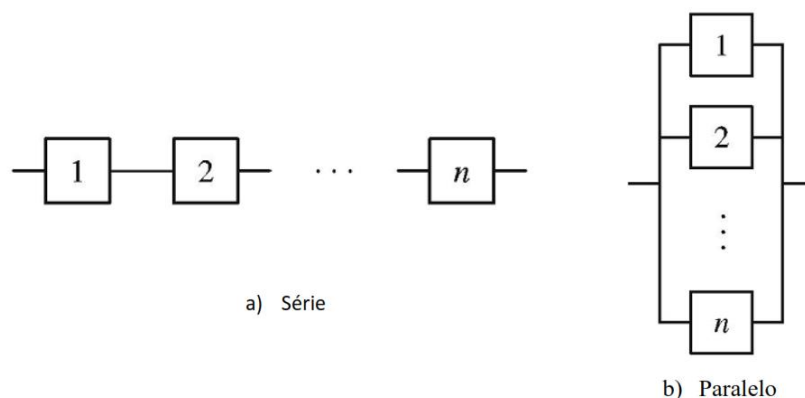


Figura 3 – Exemplo RBD

Onde  $R_i(t)$  é a confiabilidade do bloco  $b_i$ .

Em uma estrutura em paralelo (ver Figura 3(b)), pelo menos um dos componentes deve estar up para que todo o sistema esteja em funcionamento. Assumindo  $n$  componentes, a confiabilidade para esse tipo de estrutura é dada pela Equação 2.12:

$$R_p(t) = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - R_i(t)) \quad (2.12)$$

Onde  $R_i(t)$  é a confiabilidade do bloco  $b_i$ .

Outra representação dos RBDs são os blocos  $k-out-of-n$  que representam estruturas em que o subsistema pode funcionar se  $k$  componentes estão em funcionamento (XIE; DAI; POH, 2004). Vamos tomar como exemplo uma infraestrutura com dez componentes, dos quais componentes necessita-se que ao menos quatro estejam em funcionamento para prover o serviço esperado. Temos, então, uma estrutura de  $4-out-of-10$  (ou 4 de 10). As estruturas em série-paralelo são casos especiais de estruturas  $k-out-of-n$ . Uma estrutura em série é uma  $n-out-of-n$  e uma estrutura em paralelo é uma estrutura  $1-out-of-n$  (SAHNER; TRIVEDI, 1987). Para a definição matemática da confiabilidade deste arranjo lógico, é necessária a definição da variável aleatória discreta  $X$ , que define o número de blocos que não apresenta falhas, em um determinado intervalo de tempo (ver Equação 2.13). Os eventos probabilísticos de dependabilidade são independentes para cada bloco da configuração  $k-out-of-n$  e todos os  $n$  blocos possuem a mesma taxa de falha (SAHNER; TRIVEDI, 1987) (MACIEL et al., 2011).

$$R_{k-out-of-n}(t) = \sum_{i=k}^n P(X = i) \quad (2.13)$$

Modelos RBD's são utilizados em sistemas que contêm módulos independentes, nos quais cada um pode ser facilmente representado por um bloco de confiabilidade. Assim, havendo a necessidade de modelar sistemas complexos, onde se exige a adição de redundância em módulos do sistema, o usuário tem que recorrer a técnicas de modelagem hierárquica



fazendo uso, em conjunto, de modelos como SPN, CTMC e RBD, na tentativa de obter resultados mais expressivos.

### 2.4.2 Cadeias de Markov

Uma Cadeia de Markov é um modelo baseado em estado no qual se diz que o estado atual não depende dos estados anteriores para que se conheçam os estados seguintes, tendo sido criado para a modelagem de sistemas. Assim, com esse formalismo, é possível descrever o funcionamento de um sistema por meio de um conjunto de estados e transições.

As cadeias de Markov são modelos matemáticos úteis para a descrição de análises estatísticas que possuem valores de tempo em seus parâmetros, conhecidos como processo estocástico.

Um processo estocástico  $X(t)$ ,  $t \in T$  é um conjunto de variáveis aleatórias definidas sobre o mesmo espaço de probabilidades, indexadas pelo parâmetro de tempo ( $t \in T$ ) e assumindo valores no espaço de estados ( $s_i \in S$ ) (CASSANDRAS; LAFORTUNE, 2009). Assim, se o conjunto  $T$  for discreto, ou seja, enumerável  $X(t)$ ,  $t = 1, 2, 3, \dots$ , o processo é dito processo de parâmetro discreto ou tempo discreto. Se  $T$  for um conjunto contínuo, tem-se um processo de parâmetro contínuo ou tempo contínuo.

O processo estocástico é classificado como um processo de Markov se, para todo  $t_0 < t_1 < \dots < t_n < t_{n+1}$  e para todo  $X(t_0), X(t_1), X(t_2), \dots, X(t_n), X(t_{n+1})$ , a distribuição condicional de  $X(t_{n+1})$  depender somente do último valor anterior  $X(t_n)$  e não dos valores anteriores  $X(t_0), X(t_1), \dots, X(t_{n-1})$ , isto é, para qualquer número real  $X_0, X_1, X_2, \dots, X_n, X_{n+1}$ ,  $P(X_{n+1} = s_{n+1} | X_n = s_n, X_{n-1} = s_{n-1}, \dots, X_0 = s_0) = P(X_{n+1} = s_{n+1} | X_n = s_n)$  (BOLCH et al., 2006).

Uma cadeia de Markov é descrita por uma sequência de variáveis aleatórias discretas,  $X(t_n)$ , em que  $t_n$  pode assumir um valor discreto ou contínuo, isto é, uma cadeia de Markov é um processo de Markov com um espaço de estados discretos.

As Cadeias de Markov representam o comportamento do sistema (falhas e atividades de reparo) pelos seus estados e a ocorrência de evento é expressa pela transição do estado denominado (MACIEL et al., 2011). As etiquetas podem ser probabilidades, taxas ou funções de distribuição. A cadeia de Markov constitui um tipo particular de processo estocástico com estados discretos e com o parâmetro de tempo, podendo assumir valores contínuos ou discretos (STEWART, 2009). Portanto, cadeias de Markov de tempo contínuo, as CTMC, possuem transições que podem ocorrer em qualquer instante do tempo, enquanto as cadeia de Markov de tempo discreto (DTMC) (*discrete-time Markov chains*) possuem transições que ocorrem em tempos discretos de tempos (STEWART, 2009) (STEWART, 1994).

Sendo assim, a representação de um modelo através do formalismo de cadeia de Markov pode ser interpretada como uma máquina de estados, onde os nós (vértice de um grafo) desta representam os estados, enquanto os arcos representam as transições entre os estados do modelo em cadeia de Markov (STEWART, 2009).

Se o modelo é discreto, a escala de tempo para a transição entre os estados do modelo pode ser de forma contínua (CTMC) ou discreta (DTMC). A transição entre os estados do modelo depende exclusivamente do estado atual deste, sem importar quais foram os estados prévios ou futuros de tal modelo. A taxa (CTMC) ou probabilidade (DTMC) de transição de estados do modelo dá-se obedecendo a uma lei exponencial ou geométrica, respectivamente (STEWART, 1994) (STEWART, 2009).

Para representar graficamente um modelo em Cadeia de Markov é feita uma associação entre os estados e, em cada transição entre os estados, é inserida uma taxa ao modelo de tempo contínuo (CTMC) ou probabilidade para modelos discretos (DTMC). Desta forma, um modelo em cadeia de Markov (CTMC) pode ser representado matematicamente por uma matriz de transição de estados. A probabilidade de cada estado em regime estacionário (solução de um modelo em cadeia de Markov) é a solução do sistema da Equação linear 2.15.

$$Q = \begin{pmatrix} q_{ii} & q_{ij} \\ q_{ji} & q_{jj} \end{pmatrix}, \quad (2.14)$$

$$\pi Q = 0 \quad (2.15)$$

Onde  $Q$  é a matriz de taxas e  $\pi$  (vetor de probabilidade) é o autovetor correspondente ao autovalor unitário da matriz de transição, resultando em um vetor 0. É importante ressaltar que a soma dos elementos do vetor de probabilidade  $\pi$  deve ser igual a 1, ou seja,  $\|\pi\| = 1$  (STEWART, 2009). A representação gráfica de uma cadeia de Markov é representada por um diagrama de transições. Assim, podem ser visualizados os estados, sendo representados por círculos, enquanto as transições são representadas por arcos, além das taxas e/ou probabilidades das transições.

Para as cadeias de Markov de tempo contínuo, a matriz de taxas é cada elemento não diagonal da linha  $i$  e coluna  $j$ , em que as mesmas representam a taxa de transição do estado  $i$  para o estado  $j$  do modelo. Os elementos diagonais representam o ajuste necessário para que a soma dos elementos de cada linha seja zero. As probabilidades de transição dos estados podem ser calculadas através da Equação 2.16.

$$p_{i,j}(s, t) = P(X(t) = j | X(s) = i) \quad (2.16)$$

A solução transiente, ou dependente do tempo, é importante quando o sistema a avaliar é dependente do tempo (SOUSA, 2009). Para modelos ergódicos, considerando tempos de execução longos, pode-se mostrar que a probabilidade dos estados converge para valores constantes (HERZOG, 2001). O comportamento transiente da cadeia de Markov nos fornece informações de desempenho e dependabilidade sobre os instantes iniciais do sistema. Assumindo-se que a probabilidade  $\pi(t)$  é independente do tempo, isto é,

$\pi_i = \lim_{t \rightarrow \infty} \pi_i(t)$  (homogeneidade), conseqüentemente,  $\pi'(t) = 0$ , o resultado manifesta-se nas Equações 2.15 e 2.17.

$$\sum_{i=1}^N \pi_i = 1 \quad (2.17)$$

A Equação 2.17 é a condição de normalização, adicionada para assegurar que a solução obtida é um único vetor de probabilidade. A Equação 2.15 tem um conjunto de soluções infinitas. Normalizando as soluções, chega-se a um único vetor de probabilidades.

Desta forma, as cadeias de Markov têm importância fundamental no processo de modelagem de sistemas redundantes e avaliação de dependabilidade nos mais variados sistemas.

Para Sistemas de Transporte, as cadeias de Markov corroboram com a avaliação de métricas de desempenho e em avaliação de sistemas com poucos fatores de análise, os quais gerarão poucos estados. Modelos que capturam mais detalhes do sistema, devem ser trabalhados através de SPN, que tem um maior poder de representação e avaliação, como será visto a seguir.

### 2.4.3 Redes de Petri

Carl Adam, em 1962, trouxe o conceito de Redes de Petri (PN) em sua tese de doutoramento intitulada de *Kommunikation mit Automaten* (Comunicação com Autômatos), na Universidade de Damstadt, Alemanha (PETRI, 1962). A partir do formalismo proposto, tem-se utilizado de maneira abrangente em diversas PN, como a Ciência da Computação, Administração, Engenharias, entre tantas outras importantes áreas.

As PN se apresentam como uma ferramenta de modelagem gráfica e matemática que podem ser aplicadas para a resolução de problemas de diversas características e abordagens (MURATA, 1989). Permitem observar o estado atual do sistema, bem como outros possíveis em que o sistema poderá se encontrar.

De acordo com (GIRAULT; VALK, 2003), as PN são um conjunto de formalismos que tem uma representação gráfica, capaz de fornecer mecanismos de refinamento e abstração sendo de grande importância para o projeto de sistemas complexos; além do que, estão disponíveis diversas ferramentas que facilitam a sua modelagem, análise e verificação, resultando na alta aplicabilidade às ciências exatas.

Graficamente, as PNs são representadas por lugares (Figura 4(a)), transições (Figura 4(b)), arcos (Figura 4(c)) e tokens (Figura 4(d)). Uma PN é um grafo dirigido, onde os lugares e transições são seus vértices, interligados através de arcos dirigidos. Se a origem de um arco for um lugar, seu destino precisa, necessariamente, ser uma transição e vice-versa. A distribuição de tokens nos lugares da PN determinam o estado do sistema.

Ao longo dos anos, o estudo das PN trouxe novas possibilidades com variações do modelo original, tais como redes temporizadas, estocásticas, alto-nível e orientadas a

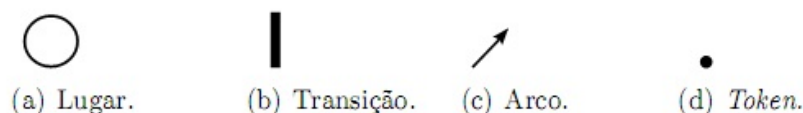


Figura 4 – Elementos da Rede de Petri.

objetos (MACIEL; LINS; CUNHA, 1996) que ocorreu devido à necessidade de adaptabilidade e às diferentes características e demandas dos problemas.

Neste estudo, optou-se pelo uso das Redes de Petri Estocásticas (SPN) que adicionam tempo ao formalismo das PN e podem ser utilizadas para a modelagem de desempenho e dependabilidade. O tempo associado às SPNs está associado às transições que são distribuídas exponencialmente, quando das transições temporizadas, e zero, quando da transição imediata (MURATA, 1989).

Segundo (MARSAN et al., 1998) a execução de atividades pode ser modelada através deste tipo de modelo, em que as transições temporizadas associam tempos de modo que o seu período de habilitação corresponderá ao período de execução da atividade e o disparo da transição corresponde ao término. Podem ser estabelecidas prioridades a cada transição para disparo, sendo que transições imediatas têm prioridade maior que transições temporizadas. As prioridades serão fundamentais quando ocorrerem situações de conflito e confusão.

As SPNs são definidas por (LINDEMANN, 1998) da seguinte forma:

$SPN = (P, T, I, O, H, W, M_0)$ , onde:

- $P$  é o conjunto de lugares,
- $T$  é o conjunto de transições;
- $I: P \times T \rightarrow \mathbb{N}$  é a função de mapeamento que representam as pré-condições;
- $O: P \times T \rightarrow \mathbb{N}$  é a função de mapeamento que representam as pós-condições;
- $H: P \times T \rightarrow \mathbb{N}$  é a função de mapeamento que representam os arcos inibidores;
- $W: T \rightarrow \mathbb{R}^+$  ( $W: T \times M \rightarrow \mathbb{R}^+$ ) é a função que associa taxas de distribuição exponenciais às transições;
- $M_0$ : Marcação Inicial -  $M_0: P \rightarrow \mathbb{N}$

A Figura 5, mostra um exemplo de SPN, correspondendo às características definidas acima:

Segundo (MARSAN et al., 1998), os modelos SPNs possuem dois tipos de estados, conhecidos como tangible ou vanish. Os vanish são criados em decorrência da marcação dos lugares que são pré-condições de habilitação de uma transição imediata, onde a chegada do token leva ao seu imediato consumo, ou seja, tempo de marcação zero. Para transições

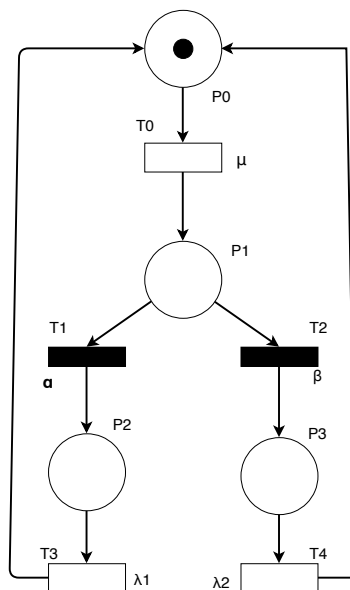


Figura 5 – Modelo de SPN

temporizadas utiliza-se a marcação tangible como condição de habilitação, podendo ser caracterizada por diferentes políticas de memória, tais como o Resampling (a cada disparo de transição todos os temporizadores são reiniciados - Restart), Enabling Memory (a cada disparo de uma transição temporizada as transições desabilitadas reiniciam a contagem e as habilitadas permanecem com o valor atualizado –continue) e Age Memory (após cada disparo, os temporizadores são mantidos nos seus valores atuais, acompanhando o tempo do sistema- Continue ).

Como forma de elucidar as regras de disparo das transições, destaca-se as diferentes semânticas existentes (MARSAN et al., 1998): Semântica Single-Server: a transição dispara apenas um token por habilitação, ou seja, independentemente do grau da transição, esta dispara exatamente um token, pois somente após o disparo é que há uma nova habilitação, onde esse processo se repete sequencialmente por N vezes, consumindo, assim um maior tempo na rede, como pode ser visto abaixo no exemplo de (MACIEL; LINS; CUNHA, 1996):

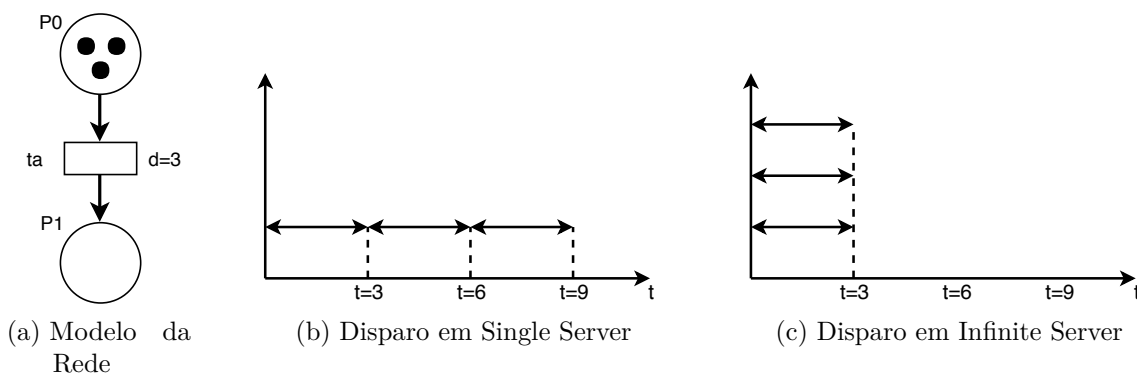


Figura 6 – Exemplo de uma Rede de Petri com Disparo de Transição em Single e Infinite Server.

Um lugar possui três tokens para a entrada da transição, com tempo de 3 u.t., numa semântica single server. Ao disparar a transição ela irá consumir um token por vez, contando para a finalização desta rede 9 u.t., como pode ser visto na Figura 6b.

Semântica Infinite-Server: uma única habilitação em uma transição suporta a transferência de  $N$  tokens, simultaneamente, a partir do momento que a transição for disparada esta consumirá todos os tokens possíveis, enquanto a transição permanecer habilitada, como pode ser visto no exemplo (Figura 6a, citado por (MACIEL; LINS; CUNHA, 1996)).

Um lugar possui três tokens para a entrada da transição, com tempo de 3 u.t., numa semântica infinite-server, ao disparar a transição, ela irá consumir todos os tokens, contando para a finalização desta rede 3 u.t., tempo necessário para a habilitação da transição, como pode ser visto na Figura 6c.

Assim, numa SPN, a alteração da semântica de disparo interfere diretamente no tempo no qual o processo que a SPN representa levará para ser finalizado, podendo interferir nas prioridades de disparo e alterar todo o contexto de uma rede. Desta forma, ao se modelar a SPN deve-se atentar para a definição correta, dada a possibilidade de se obter resultados extremamente distintos, somente pela adoção de uma semântica de disparo de transições inadequada ao caso.

As PNs fornecem mecanismos para a especificação, análise e verificação de propriedades e a correteza dos sistemas modelados. A inclusão do tempo aumenta seu poder de análise, possibilitando a obtenção de métricas de avaliação de desempenho, o que torna sua aplicação viável em sistemas de apoio à decisão.(ALVES, 2013)

## 2.5 Técnica de Aproximação de Fases - *Moment Matching*

O *Moment Matching* é a aplicação da técnica de aproximação de fases, que é utilizada para modelar ações, atividades e eventos não-exponenciais. Este método calcula o primeiro momento em torno da origem (média) e o segundo momento central (variância) assim como estima os momentos respectivos da  $s$ -transition (DESROCHERS, 1995).

Através da técnica de aproximação de fases é possível aproximar o comportamento estocástico dos modelos quando se tem dados de desempenho e dependabilidade medidos ou obtidos de um sistema, numa distribuição empírica, com média  $mD$  e desvio-padrão  $sD$ .

Uma variedade de atividades podem ser modeladas através do uso dos construtores *throughput subnets* e *s-transitions*. Esses construtores são utilizados para representar distribuições expolinomiais, tais quais as distribuições Erlang, Hipoexponencial e Hiperexponencial (SOUSA, 2015).

O inverso do coeficiente de variação dos dados medidos ou obtidos de um sistema, Equação 2.18, permite a seleção da distribuição expolinomial que melhor se adapta à distribuição empírica. Esta distribuição empírica pode ser contínua ou discreta. Entre as distribuições contínuas, temos a Normal, Lognormal, Weibull, Gama, Uniforme Contínua,

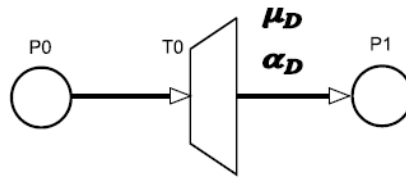


Figura 7 – Distribuição Empírica.

Pareto, Beta e Triangular; entre as distribuições discretas, temos a Geométrica, Poisson e Uniforme Discreta (JAIN, 1991).

$$\frac{1}{CV} = \frac{\mu_D}{\alpha_D} \tag{2.18}$$

Na Figura 7 é descrita uma Rede de Petri que representa uma atividade temporizada com distribuição de probabilidade genérica.

O valor do inverso do coeficiente de variação dos dados medidos apresenta que a atividade tem uma dessas distribuições atribuídas: Erlang, Hipoexponencial ou Hiperexponencial.

Quando o inverso do coeficiente de variação é um número inteiro e diferente de um, os dados devem ser caracterizados através da distribuição Erlang, que é representada por uma sequência de transições exponenciais, cujo tamanho é calculado através da Equação 2.19. A taxa de cada transição exponencial é calculada através da Equação 2.20. Os modelos de Redes de Petri descritos na Figura 8 representam uma atividade temporizada com comportamento definido por uma distribuição de probabilidade Erlang.

$$\gamma = \left(\frac{\mu}{\sigma}\right)^2 \tag{2.19}$$

$$\lambda = \frac{\gamma}{\mu} \tag{2.20}$$

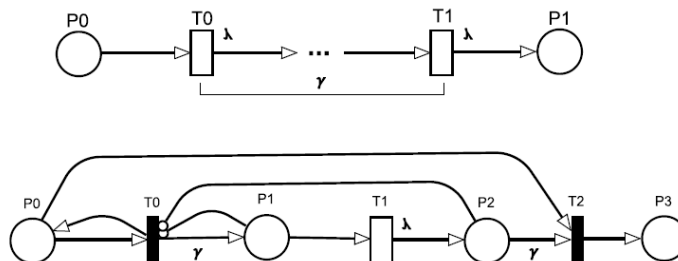


Figura 8 – Distribuição Erlang.

Quando o inverso do coeficiente de variação é um número menor que um, os dados devem ser caracterizados através de uma distribuição hiperexponencial. A taxa da transição exponencial deve ser calculada através da Equação 2.21 e os pesos das transições

imediatas são calculados através das Equações 2.22 e 2.23. O modelo de Redes de Petri que representa uma atividade temporizada com comportamento definido por uma distribuição de probabilidade hiperexponencial é descrito na Figura 9.

$$\lambda_h = \frac{2\mu}{\mu^2 + \sigma^2} \quad (2.21)$$

$$r_1 = \frac{2\mu^2}{\mu^2 + \sigma^2} \quad (2.22)$$

$$r_2 = 1 - r_1 \quad (2.23)$$

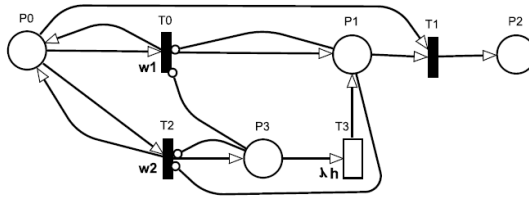


Figura 9 – Distribuição Hiper-exponencial.

Quando o inverso do coeficiente de variação é um número maior que um, porém não é um número inteiro, os dados são representados através da distribuição hipo-exponencial, a qual é representada por uma sequência de transições exponenciais, cujo tamanho é calculado através da Equação 2.24. As taxas das transições exponenciais são calculadas através das Equações 2.25 e 2.26, e os tempos médios atribuídos às transições exponenciais são calculados através das Equações 2.27 e 2.28. Os modelos de Redes de Petri apresentados na Figura 10 descrevem uma atividade temporizada com comportamento definido por uma distribuição de probabilidade hipo-exponencial.

$$\left[ \left( \frac{\mu}{\sigma} \right)^2 - 1 \right] \leq \gamma < \left( \frac{\mu}{\sigma} \right)^2 \quad (2.24)$$

$$\lambda_1 = \frac{1}{\mu_1} \quad (2.25)$$

$$\lambda_2 = \frac{1}{\mu_2} \quad (2.26)$$

$$\mu_1 = \mu \mp \frac{\sqrt{\gamma(\gamma+1)\sigma^2 - \gamma\mu^2}}{\gamma+1} \quad (2.27)$$

$$\mu_1 = \gamma\mu \pm \frac{\sqrt{\gamma(\gamma+1)\sigma^2 - \gamma\mu^2}}{\gamma+1} \quad (2.28)$$



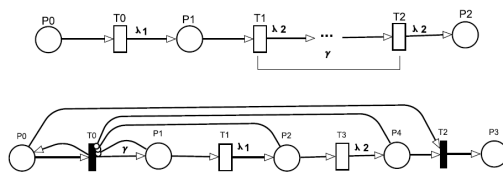


Figura 10 – Distribuição Hipo-exponencial.

## 2.6 Análise de Sensibilidade

A análise de sensibilidade se mostra como uma ferramenta que pode ajudar os tomadores de decisão nas mais diversas áreas, dado que se apresenta como um instrumento o qual corrobora com o impacto que cada componente de um sistema pode acarretar ao resultado final.

Segundo (MELO, 2017), a análise de sensibilidade é considerada uma estratégia para avaliar a variação dos parâmetros de entrada do sistema e identificar o quanto estas variações podem interferir nas saídas deste, visando identificar os pontos de criticidade, assim como promover melhorias ao sistema.

A análise de sensibilidade é uma importante fase no planejamento e, também, no processo de tomada de decisão, visto que, tem como propósito: a) tomar melhores decisões; b) definir que dados estimados devem ser aprofundados antes da tomada de decisão; e, c) focar nos elementos críticos durante o processo de implementação das decisões. (OU; DUGAN, 2003)

Segundo (SALTELLI et al., 2004), a análise de sensibilidade pode ser utilizada em diversas configurações de sistemas e aplicada por diferentes comunidades científicas, tendo sido concebida e, por vezes definida, como uma medida do efeito local de um determinado dado de entrada em relação ao dado de saída. Assim, a análise de sensibilidade busca mapear o fator mais vulnerável do sistema, visando melhorias que acarretem em resultados superiores aos iniciais do sistema.

Em sistemas com diversos componentes, é comum que nem todos possuam a mesma relevância quando se busca avaliar o impacto do componente no desempenho dos sistemas. Conhecer bem a infraestrutura e identificar os elementos relevantes, pode direcionar ações específicas para cada componente, minimizando perdas de tempo e recursos (JÚNIOR et al., 2011).

Nesta tese, a análise de sensibilidade visa corroborar com a possibilidade de vislumbrar que fatores denotam mais impactos em sistemas de transporte, através de um modelo SPN de avaliação de desempenho. A partir da análise de sensibilidade, será possível definir melhores combinações de fatores, tais como tempo de partidas de veículos e quantidade de veículos em rotas, para que se possa obter melhores resultados de desempenho do sistema.

A análise de sensibilidade será efetivada pela avaliação do modelo através de linguagem de script do software @Mercury, que possibilita tanto a criação do modelo, quanto a sua

análise.

## 2.7 Sistemas de Transporte Urbano

Grandes cidades e regiões metropolitanas necessitam de transporte efetivo e conveniente, tanto de bens quanto de pessoas, dado a gama de atividades desenvolvidas nestas regiões. A alta densidade populacional e de atividades tornam possível, viabilizando modos de transporte de alta capacidade, tais como: ônibus, BRT, VLT, Metrô, trens, entre outros, que podem ser utilizados por serem mais econômicos, mais eficientes no uso do combustível e precisam de menos espaço do que os automóveis particulares. Além disso, os modelos de transporte público prestam serviço a toda população, enquanto os veículos particulares apenas aos que os possuem. Assim, o desenvolvimento de um sistema de transporte público de qualidade beneficia toda a população, oferecendo uma maior mobilidade (VUCHIC, 2007).

Segundo (VUCHIC, 2007), os sistemas de trânsito podem ser classificados de diversas formas, como:

- Tipo de uso: De acordo com a perspectiva de uso do passageiro, sendo: Transporte privado, aluguel para trânsito urbano e Transporte Público ou de massa;
- Modos de Trânsito: que se referem às formas de avaliação do trânsito, que podem ser definidas de acordo com: prioridade da via, a tecnologia envolvida no transporte e o tipo de serviço prestado;
- Componentes e operação do Sistema de Trânsito.

Esta tese considera a classificação que se refere ao modo de trânsito considerando a prioridade da via, dado que se acredita oferecer informações substanciais para referendar uma perspectiva de análise que seja válida quando se busca analisar Sistemas de Transporte e que pouco foi tratado por outros autores, que é a Prioridade da via.

Para definição de prioridade da via, (VUCHIC, 2007) determina que pode ser feita de três formas, conforme Tabela 1, que mostra a relação de prioridade e tecnologia envolvida no modo de transporte.

Tabela 1 – Classificação dos modos de transporte público urbanos por categoria de prioridade e tecnologia. Adaptado de (VUCHIC, 2007)

<b>Tecnologia/ Prioridade</b>	<b>Conduzido por motorista em Rodovia</b>	<b>Parcialmente Segregado/ Segregado com uso de Pneus</b>	<b>Trilho</b>	<b>Especializado</b>
<b>Baixa Prioridade</b>	Transporte Alternativo/ Serviço de Ônibus/ Ônibus Regular	Trolleybus (Ônibus elétrico)	Bonde/ Tramway/ Bondinho	Ferryboat/ Aerobarco
<b>Média Prioridade</b>	Bus Rapid Transit (BRT)	Ônibus Guiado	Veículo Leve sobre Trilho (VLT)	(Trenzinho)
<b>Alta Prioridade</b>	Via de Ônibus Única*	Metrô com pneus de borracha/ Monotrilho com Pneus de borracha/ Trânsito Guiado Automatizado (AGT)	Veículo Leve sobre Trilho de Trânsito Rápido/ Trânsito Rápido sobre. Trilho (Metrô) / Trens Urbanos Regionais / Monotrilho suspenso (Monorail Schwebbahn)	Trenzinho / Teleférico/ Funicular

\*Modo ainda não operante.

Os níveis de prioridade descritos na Tabela 1 podem ser entendidos da seguinte maneira (VUCHIC, 2007):

**Baixa Prioridade** - representa as rotas que estão em ruas com tráfego misto. O trânsito pode ter um tratamento preferencial com corredores reservados separados por linhas ou sinais espaciais, ou mesmo misturado com outros tipos de tráfego;

**Média Prioridade** - inclui tipos de linha que são fisicamente separadas das vias comuns por guias, barreiras, separações de nível ou similares. No entanto, neste tipo de via, existem passagens de nível para veículos e pedestre, incluindo os cruzamentos e semáforos das ruas;

**Alta Prioridade** - é uma linha totalmente controlada, sem passagens de nível ou qualquer acesso legal, por outros veículos ou pessoas. Geralmente é construída em túneis ou em estruturas aéreas.

Esta tese busca analisar Sistemas de Transporte Urbano de Média Prioridade (STUMP) dado ser um modelo que tem se expandido de maneira substancial ao redor do mundo, principalmente pela implantação de Sistemas BRT e VLT. Assim, o trabalho aqui desenvolvido, busca analisar sistemas que possuem cobrança de taxa diferenciada, rotas exclusivas e que, ainda assim, sofrem alguma interferência de fatores como sinalização de cruzamentos e travessia de pedestres.

Nesta perspectiva, o Sistema BRT é apresentado, ressaltando que o Sistema VLT funciona sob perspectiva equivalente, considerando, tão somente, o nível de investimento, que neste caso, é mais elevado, como visto na Figura 1.

Os Sistemas BRTs, como também os STUMP, podem ser apresentados através do seus elementos centrais, sistema de performance e sistemas de benefício, como expostos na Figura 11.

O sistema BRT é composto pelos seus elementos centrais, que podem ser descritos como os caminhos utilizados, a forma como estão apresentadas as estações e os veículos, o sistema de cobrança de taxas, os Sistemas de Transporte Inteligente, que têm em sua base a criação de semáforos inteligentes, além do próprio planejamento e operação do Serviço do BRT (DIAZ, 2004).

Os elementos descritos apontam para a possibilidade da análise da Performance do Sistema BRT e de modo geral um STUMP, que traz consigo a necessidade da criação de atributos e métricas de performance. Os atributos são descritos como elementos centrais, que apontam a importância de determinados fatores para se avaliar o desempenho do sistema, que são: o tempo de viagem, a confiabilidade, a imagem, a proteção e segurança dos passageiros, além da própria capacidade do sistema. Cada atributo leva a determinadas métricas, que serão utilizadas para a mensuração do desempenho (DIAZ, 2004).

A partir do Sistema de Performance, procede-se ao Sistema de Benefícios que, como num ciclo, pode ser também o gerador de toda a necessidade da criação e implantação

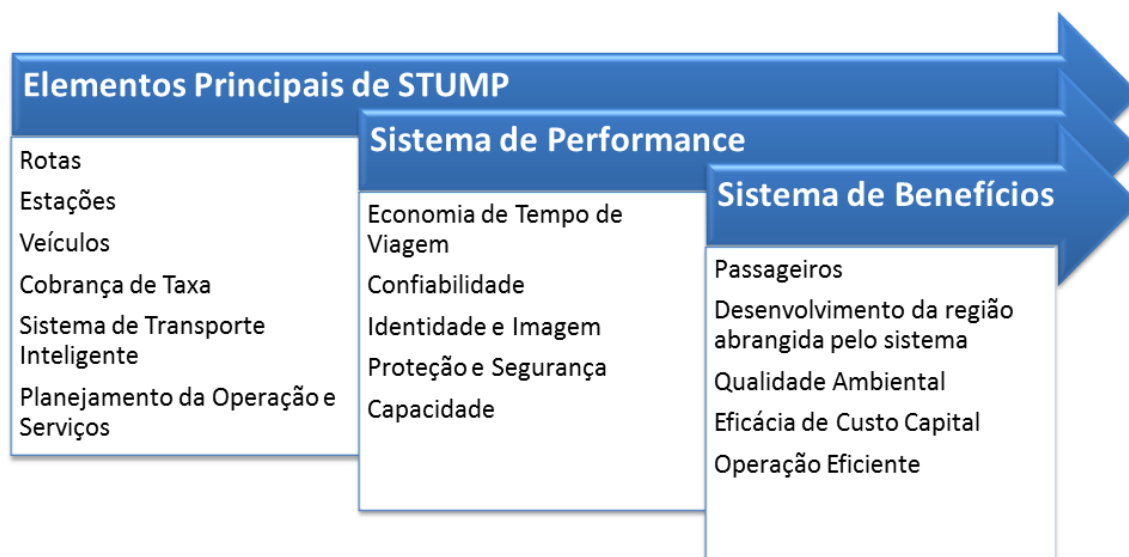


Figura 11 – Elementos de um STUMP. Adaptado de (DIAZ, 2004).

de um sistema como o BRT. Esse último é composto pela Satisfação dos Passageiros, a possibilidade de promoção de Qualidade Ambiental, tanto no aspecto humano em si, como no aspecto ecológico, a relação custo benefício, a possibilidade de melhoria na comunidade do entorno do empreendimento, a efetividade do Sistema com a possibilidade de oferecer um serviço de alta qualidade, além de tantos outros benefícios que podem ser descritos (DIAZ, 2004).

O STUMP é um Sistema de Trânsito rápido de ônibus que não depende do tráfego para alcance do destino, visto que se dá em via exclusiva. Este sistema de transporte considera quatro métricas de performance específicas: Mobilidade (refere-se à capacidade do sistema de transporte para facilitar a circulação eficiente de pessoas e bens); Confiabilidade (refere-se à capacidade que os usuários do sistema tem para prever a quantidade de tempo que leva para fazer determinada viagem); Acessibilidade (refere-se à capacidade do sistema de transporte para conectar as pessoas aos destinos desejados através da análise espacial da população residencial, centros de emprego e outras oportunidades de serviço ou de lazer); e Segurança (refere-se à capacidade dos usuários do sistema para chegar ao seu destino com segurança em qualquer viagem) ((US); SYSTEMATICS; GROUP, 2009).

Em (WRIGHT, 2002) as principais características de sistemas como o BRT são descritas: 1. Vias de ônibus segregadas; 2. Embarque e desembarque rápido; 3. Limpeza, segurança, e conforto nas estações e terminais; 4. Cobrança de tarifas eficientes (antes do embarque); 5. Regimes de licenciamento e regulação eficazes para operadores de ônibus; 6. Sinalização clara e visível, assim como apresentação de informações em tempo real; 7. Prioridade nos cruzamentos de trânsito; 8. A integração modal nas estações e terminais; 9. Tecnologias de limpeza nos veículos; 10. Identidade de marketing sofisticadas; 11. A excelência no atendimento ao cliente.

Estas características diferenciam o STUMP dos demais sistemas de Transporte de pas-

sageiros urbanos, pois, podem garantir a confiança, segurança, mobilidade e disponibilidade desejadas pelos clientes, atingindo, de fato, a dependabilidade

Esta tese traz uma abordagem diferenciada, dado que busca avaliar e auxiliar no planejamento dos Sistemas de transporte público considerando fatores como a capacidade do sistema, frequência do serviço, dimensionamento do sistema, desempenho quanto ao término da viagem, entre outros fatores.

### 2.7.1 Custos para STUMP

Um dos fatores que mais atraem a possibilidade de investimentos para Sistemas de Transporte de Média Prioridade, principalmente sistemas do tipo BRT, é o custo mais baixo em comparação a outros sistemas de transporte. A Tabela 2 mostra a comparação entre o custo, em dólar, de investimento feito por quilômetro em cada tipo de modo de transporte, sendo importante ressaltar a diferença de custos entre países desenvolvidos e "em desenvolvimento", no qual é possível perceber que no Sistema BRT encontram-se os menores custos para implantação, conforme ressalta (HOOK; WRIGHT et al., 2016).

<b>Tipo</b>	<b>Países em Desenvolvimento (2013 US \$/km)</b>	<b>Países Desenvolvidos (2013 US \$/Km)</b>
<b>Sistema BRT Veículo Leve Sobre Trilho (VLT) Metrôs, Veículos Elétricos Sobre Trilhos, outros.</b>	\$11.504.575	\$10.054.824
	\$25.373.992	\$37.496.032
	\$87.429.209	\$433.660.969

Tabela 2 – Comparação de Custos de Implantação de Sistemas de Transporte. Extraído de (HOOK; WRIGHT et al., 2016).

Além do custo de implantação, outro fator que impacta na decisão sobre sistemas de transporte, são os custos operacionais que, segundo (VASUDEVAN et al., 2014), vêm como custos fixos (infraestrutura) e variáveis (operacionais), dependendo de uma variedade de condições relacionadas à geografia, infraestrutura, barreiras administrativas, energia e como os passageiros são transportados. Destacamos que os custos apresentados são custos médios disponíveis na literatura.

(VASUDEVAN et al., 2014) definem ainda que, sob a perspectiva de custos, as operações de transporte público distinguem os custos em duas categorias:

- Custo de capital e Custo de operação e manutenção - onde o custo de capital refere-se ao financiamento de capital de transporte público, como: aquisição do veículo, tipo de veículo, obtenção de financiamentos, infraestrutura, entre outros; custo de

operação e manutenção, referem-se aos gastos (anuais) de manutenção e operação da infraestrutura ou ativos;

- Custos variáveis e fixos - onde os custos variáveis são custos relacionados ao uso do veículo, como combustível ou peças de reposição e os custos fixos, por outro lado, não dependem do uso do veículo; em vez disso, incluem depreciação, seguro e registro.

<b>DESCRIÇÃO</b>	
<b>CUSTOS VARIÁVEIS</b>	<b>CUSTOS FIXOS</b>
Combustível (CMB)	<b>Pessoal</b>
Lubrificantes (CLB)	Operação
ARLA 32 (CAR)	Manutenção, administrativo e diretoria (DMA)
Material de rodagem (CRD)	<b>Administrativas</b>
Peças e acessórios (CPA)	Despesas gerais (CDG)
Custos ambientais (CAB)	DPVAT e licenciamento (CDS)
<b>TRIBUTAÇÃO</b>	IPVA
Lei Federal nº 12.715 (INSS)	Seguros (CRD)
ISSQN	Outras despesas operacionais (CCM)
ICMS	<b>Depreciação</b>
Taxa de gerenciamento	Veículos da frota (DVE)
PIS	Edificações e equipamentos de garagem (DED)
COFINS	Equipamentos de bilhetagem e ITS (DEQ)
Outros	Veículos de apoio (DVA)
	Infraestrutura (DIN)
	<b>Remuneração</b>
	Veículos da frota (RVE)
	Terrenos, edificações e equipamentos de garagem (RTE)
	Almoxarifado (RAL)
	Equipamentos de bilhetagem e ITS (REQ)
	Veículos de apoio (RVA)
	Infraestrutura (RIN)
	<b>Outras despesas</b>
	Locação dos equipamentos e sistemas de bilhetagem e ITS (CLQ)
	Locação de garagem (CLG)
	Locação de Veículos de Apoio (CLA)

Tabela 3 – Custos do transporte público por ônibus, definido por (ANTP, 2017)

A Agência Nacional de Transportes Públicos definiu os Custos de Transportes por ônibus no Brasil, Tabela 3, ressaltando que os custos do transporte público derivam também do modo como ele é concebido e organizado nas cidades pelo Poder Público, da sua coerência com a Lei 12.587 - Lei de Mobilidade Urbana - e com o Plano de Mobilidade Urbana, que se tornou obrigatório para cidades com mais de 20 mil habitantes (ANTP, 2017). Com a apreciação da Tabela 3, é possível perceber que são muitos os custos atrelados à operacionalidade dos Sistemas de Transporte Público de Passageiros, independente do nível de prioridade da via. No caso desta tese, que foca os STUMP, estes custos se aplicam principalmente ao Sistema BRT, que ainda agrega a bilhetagem eletrônica. Assim, pode-se inferir a melhoria do sistema, com a atração de mais passageiros, gera melhores resultados em custos, já que o maior custo do sistema é fixo, ou seja, com mais passageiros melhoraria o rateio dos custos.

Custos de Transportes, envolvem muitas complexidades, por isso, como o objetivo desta tese não está em detalhar a avaliação dos custos diretamente, tomou-se como base o custo de operação do veículo, que foi detalhado por (AHMAD et al., 2018), numa comparação entre custos de transporte para os anos entre 2015 e 2020, apresentados na Tabela 4.

<b>Tipo</b>	<b>Total Custo de Operação do Veículo (2015 - 2020)</b>
Carro (\$)	15.613.909
Ônibus (\$)	509.443
BRT (\$)	455.491

Tabela 4 – Valor Operacional para os tipos de veículos. Extraído de (AHMAD et al., 2018).

O Custo de operação do veículo será utilizado sempre que for requerido, nesta tese, a comparação de custos entre cenários. Assim, como o custo apresentado é para o período de 5 anos, será apresentado na Tabela 5 os valores proporcionais que serão adotados.

<b>PERÍODO</b>	<b>CUSTO</b>
5 anos	\$ 455.491
1 ano	\$ 91.098,2
1 mês	\$ 7.591,52
1 dia	\$ 249,58
1 hora (17 p/dia)	\$ 14,68

Tabela 5 – Custo de operação do veículo proporcional ao período de tempo desejado.

Para avaliação dos STUMP serão considerados os custos do BRT, visando referendar as análises trabalhadas, para entender como a composição dos custos se mostra essencial, por permitir o entendimento geral dos custos e compreender a escolha para análise da tese, que



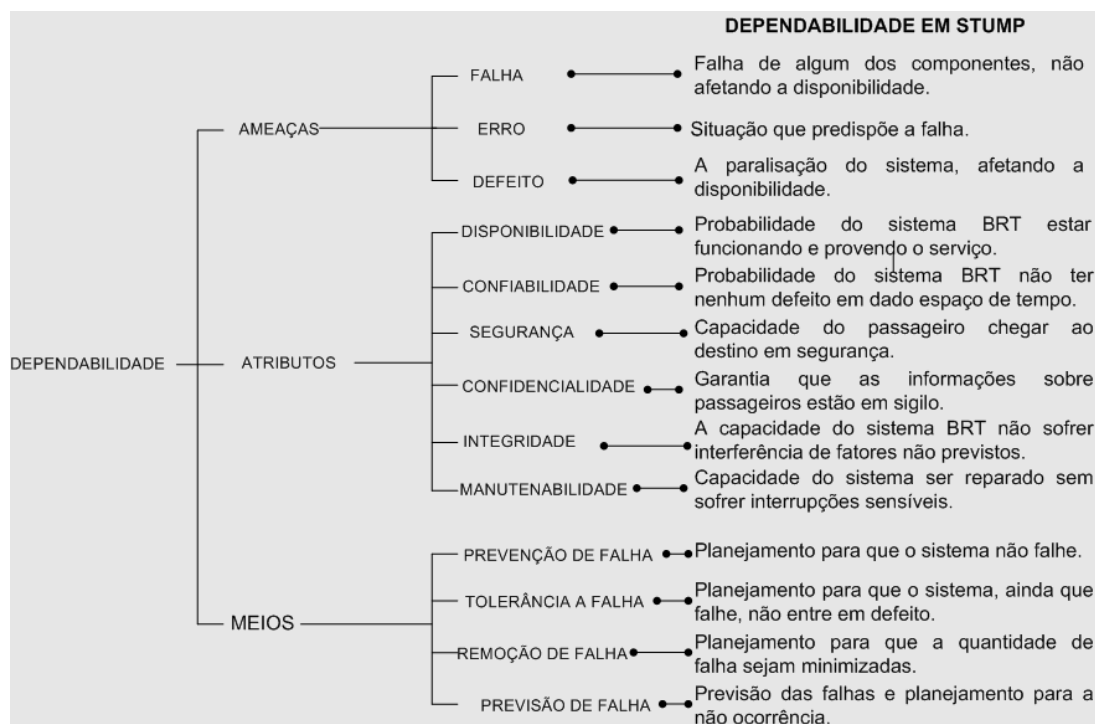


Figura 12 – Dependabilidade para sistemas de transporte. Adaptado de (AVIZIENIS et al., 2001).

em trabalhos futuros poderá contemplar uma análise mais aprofundada da complexidade que envolve os custos de transporte.

### 2.7.2 A Dependabilidade em STUMP

Tomando por base os conceitos de Dependabilidade apresentados na Seção 2.2 e a descrição do Sistema de Transporte Urbano apresentada na Seção 2.7, construiu-se uma árvore de dependabilidade, adaptada de (AVIZIENIS et al., 2001), para fundamentar a Dependabilidade para Sistemas Públicos de Transporte, como pode ser visto na Figura 12.

Na Figura 12, são apresentados os conceitos de dependabilidade associados ao Transportes de Passageiros. As ameaças devem ser tratadas como a falha que pode acontecer no sistema de transporte (o sistema ter algum tipo de problema, mas continuar operando), caso este ainda esteja disponível aliado ao defeito, que ocasiona a parada total do sistema. Para exemplificar a falha, pode-se retratar um pneu de um veículo que fure, mas outro virá pra assumir a atividade, ou seja, ocorre a falha, mas a recuperação do sistema. O defeito pode ser tratado como a paralisação por uma greve de motoristas, ou seja, não há como haver o reparo, o sistema irá parar por bastante tempo, não estando disponível.

Outro fator são os atributos da dependabilidade. Neste trabalho, é tratada como a disponibilidade, que é a probabilidade do sistema estar provendo o serviço, independente de que maneira for, deve estar em funcionamento; e a confiabilidade, que é a probabilidade do sistema não ter nenhum defeito, ou seja, paralisação total, em um determinado espaço

de tempo. Destaca-se que na literatura de sistemas de transporte, confiabilidade significa alcançar o destino num determinado tempo, porém, no presente trabalho, este aspecto será tratado como confiança. O termo confiabilidade será utilizado, tão somente, para definir o provimento do serviço.

## 2.8 Considerações Finais

Este capítulo forneceu fundamentos teóricos que, embora possam ser muito mais aprofundados do que os aqui apresentados, foram descritos em sua essência visando situar o leitor quanto aos fatores que irão compor esta tese. Os conceitos básicos sobre avaliação de desempenho, dependabilidade, modelagem analítica, bem como a composição dos Sistemas de Transporte, permitem entender a aplicação de tais conceitos e possibilitar ao leitor uma visão global sobre o fundamento deste trabalho.

## 3 TRABALHOS RELACIONADOS

Neste capítulo, serão apresentados os principais trabalhos que se relacionam ao Planejamento de Sistemas de Transporte. Para uma melhor contextualização dos trabalhos, estes foram agrupados de acordo com a temática central que os compunha. Dessa maneira, tem-se o direcionamento ao desempenho e à dependabilidade em Sistemas de Transporte, sendo finalizado com a avaliação de trabalhos que desenvolvem a temática da performabilidade associada a áreas distintas de computação pura. A criação deste capítulo se justifica no sentido de fornecer uma visão geral dos trabalhos relacionados, situando o pesquisador e os leitores sobre os avanços já alcançados por outros autores, assim como pontuando os diferenciais que são apresentados nesta tese. Para isto, é apresentado ao fim do capítulo uma comparação entre os trabalhos correlatos e o trabalho proposto.

### 3.1 Avaliação em Sistemas de Transporte

Na década de 80, (PERRY; BABITSKY, 1986) já mostravam a preocupação em garantir um bom desempenho no transporte público. No artigo intitulado "*Comparative Performance in Urban Bus Transit: Assessing Privatization Strategies*", os autores, embora discutam a privatização do Transporte público, o fazem numa maneira de mostrar a importância do desempenho para os sistemas de transporte público. Para o estudo, foram considerados fatores como o número de veículos, taxa de serviço e velocidade média nos períodos de pico. Como resultado, pode ser ressaltada a relação entre sistemas que possuem maior velocidade média e maior quantidade de veículos os quais tendem a ter maiores receitas. Outro fator é a variação do fator segurança, que de um ano a outro variou cerca de 34% , mostrando que fatores externos não controláveis podem influenciar este resultado. O resultado mais significativo referenda que Serviços de Transporte Público são mais eficazes, principalmente enquanto geradores de receitas.

(POLUS, 1978), em um dos trabalhos mais antigos que aborda a confiabilidade em sistemas de transportes, afirma que a confiabilidade está atrelada à consistência de medidas de desempenho obtidas diariamente. Nesta perspectiva, o tempo de viagem se apresenta como uma medida de desempenho precisa e facilmente replicável, sendo coletada em períodos estacionários. Os autores desenvolvem um modelo para ampliar a avaliação do tempo de viagem, considerando que a baixa variabilidade pode melhorar o planejamento dos tempos de viagem e conseqüentemente reduzir custos.

(HEILIG; VOSS, 2015) compilaram as principais pesquisas na área de Transporte público realizadas entre 2009-2013, mostrando a grande evolução de estudos atrelados a esta área. Em números absolutos, foram publicados só na base Scopus 7.868 trabalhos, o que é uma grande contribuição à academia, sendo os maiores pesquisadores, os Estados Unidos, China

e Reino Unido, respectivamente. É ressaltado que a evolução da pesquisa tem contribuído fortemente para o avanço das políticas públicas de transporte nas quais encontram-se atreladas melhorias que tangem ao planejamento como fruto de pesquisas, estudos de otimização e simulação que consideram economia, eficiência do sistema e fatores ambientais. Outro fator que se destaca é o potencial de inovação em TIC que se tem produzido nas pesquisas, sendo também o foco desta tese o caráter inter e transdisciplinar que envolve a problemática dos transportes públicos. Portanto, a relevância desta tese destaca-se por atrelar conhecimentos de computação ao planejamento de Sistemas de Transporte, com foco primordial em STUMP.

Para modelar os Sistemas de Transporte Urbano, (THORLACIUS; LAHRMANN; PITTELKOW, 1998) adotaram a metodologia *Geographic information systems* (GIS) - Sistema de Informação Geográfica, que considera aspectos topográficos e geográficos, para analisar aspectos de espaço e tempo no transporte público. Visando calcular os tempos de viagem de maneira mais precisa, foi construído o que se chama de *Three Dimensional Vehicle Run Representation*. Neste método, a ideia é montar um modelo de transporte como uma projeção de ruas, veículos e linhas de trem, cujo tempo seria a terceira dimensão. Desta forma, é possível avaliar o aspecto físico do sistema e fazer inferências ao planejamento.

Sob a perspectiva de análise do desempenho dos sistemas de transporte público, (ZHANG et al., 2016) desenvolveram um método de avaliação combinada *combined evaluation method* (CEM) que propõe uma visão sobre várias perspectivas, desde a do operador do trânsito ao passageiro. O artigo traz, como principais contribuições, a construção de um sistema de indicadores, baseado na satisfação e eficiência para medir o desempenho dos transportes públicos, além da aplicação do CEM de entropia da informação e o modelo de Análise Envoltória de Dados Super Eficiente *Super-Efficiency Data Envelopment Analysis* (SE-DEA) para medir o transporte público. São usados como parâmetros de entrada o número de veículos, de trabalhadores e o subsídio dado pelo governo; como dados de saída, a satisfação do passageiro e a receita operacional gerada. Para mostrar o impacto destas variáveis, foi feita análise de sensibilidade, que mostrou um modelo robusto, sem um parâmetro diferencial. Desta forma, este artigo traz um resultado relevante quando se busca a avaliação de desempenho do Sistema de Transporte, no entanto, traz uma visão limitada do sistema, o que o difere desta tese, a qual traz uma visão ampliada, mais focada no resultado operacional, tratando a satisfação do usuário como um fim do bom desenvolvimento do modelo.

(LAO; LIU, 2009) realizaram um estudo com análise envoltória de dados *Data Envelopment Analysis* (DEA) considerando também o Sistema de Informação Geográfica (GIS), visando identificar alternativas de bom desempenho, eficiência e eficácia para a criação de linhas de ônibus. O trabalho projeta modelos de DEA, incorporando elementos operacionais e geográficos, ou seja, atrela o GIS e a DEA buscando avaliar o desempenho da linha e, finaliza analisando as relações entre eficiência e eficácia operacional e espacial do sistema.

Desta forma, os autores indicam recomendações sobre o planejamento de estratégias para linhas de ônibus. Neste trabalho, os autores analisaram as linhas de ônibus de maneira isolada e perceberam que não existem associações positivas ou negativas claras entre eficiência, assim como eficácia operacional e espacial para linhas de ônibus. No entanto, é destacado que a utilização da DEA pode revelar as linhas de maiores desempenhos, eficiência e eficácia; o GIS pode ajudar a visualizar a distribuição de rotas de ônibus, cobertura de serviços e a analisar a variação espacial das configurações demográficas. Este artigo, embora trate de avaliação de desempenho, restringe a sua abordagem a poucos fatores que podem influenciar o planejamento dos Sistemas de Transporte, diferentemente desta tese, que busca agregar diversas formas de análise para subsidiar os tomadores de decisão.

Já (SHETH; TRIANTIS; TEODOROVIC, 2007) fazem uma avaliação sobre o desempenho de rotas de ônibus considerando a perspectiva do provedor de serviços e também dos passageiros. Os autores desenvolvem uma abordagem visando que o tomador de decisão possa otimizar a alocação de recursos na rede de trânsito, mas também atingir metas para o ambiente onde são prestados os serviços. Baseia-se em Análise Envoltória de Dados (DEA) para mostrar a relação entre o provedor e o consumidor do serviço de Transporte, considerando fatores externos, como poluição sonora e emissões de gases, além de considerar os investimentos necessários para o funcionamento do sistema. Através da DEA, os autores conseguem mostrar a relação de minimização de gastos com os custos de transporte e a maximização da área de abrangência do serviço, o que ajudaria os tomadores de decisão a escolher melhores alternativas para o Sistema.

Numa análise de confiabilidade para Sistemas de Transporte, (GITTEENS; SHALABY, 2015) reiteram que a confiabilidade para transporte consiste em prover serviços sem variação, ou seja, constantemente o mesmo padrão do serviço. Desta forma, desenvolvem um índice de confiabilidade sob a perspectiva do passageiro, o *journey time buffer index* (JTBI). Este índice utiliza estimativas de tempo de espera nas estações para identificar como a variação do tempo de espera e de viagem tendem a crescer com o maior tempo do veículo parado, impactando no tempo da jornada. A partir deste índice, foi possível identificar os fatores que podem impactar na variação dos tempos de viagem, sendo destacado o tamanho da rota, o tempo parado, o período do dia, a proximidade da rota do centro da cidade e a quantidade de passageiros.

Visando desenvolver uma relação entre a análise de custo-benefício e a confiabilidade do serviço, (OORT, 2016) apresenta um método para calcular este efeito. O autor consegue demonstrar que a confiabilidade do serviço pode ser substancial na construção de projetos de transporte público, mostrando que, se o custo da confiabilidade for incorporado ao projeto, poderá ser efetiva a análise de alternativas de planejamento. São calculadas as perdas monetárias para os passageiros advindas dos tempos de espera e viagem no transporte público, cujos valores foram incorporados à *Análise de Custo Benefício* (ACB). Através de

um estudo de caso na Holanda, os autores mostram que o impacto da confiabilidade pode levar a investimentos financeiros maiores pela escolha de um Sistema de Transporte mais caro. No entanto, numa análise de custo-benefício, trará resultados mais efetivos para a população e, conseqüentemente, maior atratividade ao uso, o que leva a uma lucratividade maior.

Nas pesquisas de (ZHENG; JIAQING, 2007), são destacados os principais resultados da implantação do Sistema BRT no Corredor Centro-Sul em Pequim na China. Neste trabalho, é ressaltado que o papel da gestão emerge da condição de prover melhorias no serviço do BRT e, conseqüentemente, melhora os benefícios para a sociedade. (ZHENG; JIAQING, 2007) retratam o corredor Centro-Sul de Pequim como a "terceira via", diferentemente das rotas regulares e das rotas adjacentes, com uma oferta de serviço que tem reduzido o tempo de viagem para os usuários. Como consequência, eleva-se o aumento do nível de satisfação, melhora na velocidade média do veículo, reduz-se os atrasos, aumenta-se a pontualidade, melhora-se eficiência de trânsito e potencializa-se ganhos em relação ao retorno do investimento.

Em (DENG; NELSON, 2013), os autores fazem uma análise dos impactos da implantação do primeiro sistema BRT na China, apontando os fatores diferenciais ao sistema que são a diminuição do tempo de viagem, oriunda do desenvolvimento de sistemas de transportes inteligentes (semáforos sincronizados), aumento do número de passageiros e o diferencial para esta tese, que é o aumento da velocidade e a maior frequência do serviço, o que proporciona maior confiança aos usuários de que estarão no seu destino em dado tempo, que, no caso do artigo, é de 90%.

Muitos trabalhos propõem técnicas de avaliação para sistemas BRT. (LOPEZ; TRIANA; CHAMORRO, 2011) empregam as Redes de Petri (PN) para demonstrar as estações de um Sistema BRT, realizando rearranjos a fim de melhorar o sistema. Este trabalho é baseado no tempo de deslocamento de passageiros do Sistema BRT Transmilênio de Bogotá, Colômbia. Foi construída uma Rede de Petri de acordo com as estações em uma rota específica, cujas mudanças foram feitas visando à proposição de melhorias. No entanto, não foi possível identificar a análise de métricas que possam promover o planejamento do sistema.

(INGVARDSON; JENSEN, 2012) desenvolvem um modelo de simulação mesoscópica, nas quais as operações de ônibus são modeladas em um nível microscópico, enquanto que as interações com outros tipos de tráfego são modeladas macroscopicamente. Este estudo é realizado considerando a implementação do sistema BRT em Copenhague-Dinamarca, que faz uma combinação de componentes do BRT, ou seja, os autores consideram que as melhorias no sistema podem proporcionar uma maior confiabilidade, o que afeta o funcionamento e o planejamento do sistema. Embora seja uma proposta muito válida, os autores tratam da perspectiva de simulação, enquanto o que é proposto neste trabalho é a modelagem matemática (através de cadeias de Markov, Modelos RBD e SPN) para

o planejamento do sistema BRT. Apresenta-se, nesta tese, uma perspectiva diferenciada de confiabilidade da revelada pelos autores, pois considera a vida útil do equipamento e amplia a perspectiva de análise, levando em conta o desempenho e a ocorrência de falhas para analisar a performabilidade do sistema.

(HUO et al., 2014) realizam uma análise de confiabilidade sobre uma rota do Sistema BRT de Changzhou - China. Nesta avaliação, consideram fatores como irregularidade dos intervalos, tempo de espera e tempo de viagem. No estudo são consideradas séries históricas sobre o tempo de alcance do destino, além de fatores temporais e espaciais. Na perspectiva de confiabilidade, os autores descrevem que os usuários precisam de um intervalo de 3 a 5 minutos extras de tempo para alcançarem o destino com a confiança de 95%.

(AVILA-TORRES et al., 2018) apresentam o processo de transporte urbano descrevendo quatro atividades principais: design de rede, horário, programação de veículos e programação dos funcionários que atuam no sistema. Descrevem o problema do artigo como sendo sobre a integração da frequência e horário de partida, onde ambos são subatividades da construção do cronograma. Além de incluir múltiplos períodos de planejamento e sincronização multiperíódica, os autores também consideram incertezas na demanda e no tempo de viagem. Os autores criaram um modelo matemático que inclui essas características, objetivando minimizar o custo total da operação, maximizar o número de sincronizações multiperíodo entre as rotas e minimizar o tempo total de espera dos passageiros. O método SAugmecon é usado para resolver o problema de agendamento de partidas, além disso, é apresentada a comparação desse problema com a incerteza sobre a demanda e a incerteza sobre a demanda e o tempo de viagem. Este modelo permite um planejamento multiperíódico e a implementação de sincronização multiperíódica.

(HAO; JIN; YANG, 2014) trabalham a otimização de *headways* e o agendamento combinado de veículos em linhas exclusivas de ônibus. Neste trabalho, é estabelecido um modelo para minimizar o custo de espera dos passageiros e o custo de operação dos veículos. Para isto, é utilizado um algoritmo genético que visa tentar estabelecer a melhor forma do veículo alcançar o destino, com o melhor agendamento de saídas em dado período. Através do algoritmo, tornou-se possível melhorar em cerca de 14% os custos de espera e operação dos passageiros.

(ZUO et al., 2015) apresentam o artigo "Vehicle Scheduling of an Urban Bus Line via an Improved Multiobjective Genetic Algorithm" no qual propõem um algoritmo genético multiobjetivo combinado com um procedimento de ajuste de tempo de partida, visando a solução do problema de programação de veículos em linhas de ônibus urbanos. Inicialmente, os veículos são agrupados em blocos; posteriormente, os blocos são ajustados em subconjuntos e reformulados como um problema inteiro e, finalmente, o problema é resolvido por um algoritmo genético multiobjetivo visando reduzir o conjunto de soluções. Para referendar o estudo, são realizados experimentos reais em uma linha de ônibus em

Nanjing, China. Como resultado, pode-se inferir que a abordagem proporciona um menor número de veículos nas vias o que promove redução de tempo e custo.

Já (PEñA; MATEOS, 2013) fazem uma análise na literatura sobre as propostas de otimização para o Sistema BRT e propõem um novo modelo matemático, adaptando as propostas encontradas e incorporando novos elementos que representem as características dos Sistemas Transmilênio, objeto de estudo dos autores. É destacado que as propostas na literatura para otimizar sistemas de BRT são baseadas em programação de ônibus e estão focadas na variação dos tempos entre saídas dos veículos nas diferentes rotas. No entanto, o ponto comum a muitos trabalhos consiste em: (1) Minimizar o tempo de espera do usuário; (2) Minimizar a função custo; (3) Otimizar as rotas para que os passageiros esperem menos dentro do ônibus; (4) Priorização em sinais de trânsito; (5) Otimizar o número de paradas em cada rota, entre outros modelos. Os autores, no entanto, agregam as informações sobre o BRT Transmilênio, estabelecendo assim as variáveis de decisão, a função custo e as restrições do modelo. A partir do modelo matemático, foram construídas soluções para o Transmilênio, visando otimizar o sistema.

Sobre a perspectiva de desenho de rota, (SCHMID, 2014) formula um modelo para o problema de projeto de rota no BRT, considerando a decomposição de fatores como frequência e fluxo de passageiros para o estudo das rotas. Para isso, propõe uma metaheurística híbrida baseada em uma combinação de busca em vizinhança grande *Large Neighborhood Search* (LNS) e Programação Linear *Linear Programming* (LP), onde, para a concepção de rotas, é utilizado no LNS e, para os fluxos e frequências de passageiros, utiliza-se LP. O algoritmo proposto é iterativo e permitirá a orientação à fase de projeto de rota para direções promissoras e proporcionar boas escolhas para o desenho da rota. A formulação do problema e a abordagem da solução proposta podem ser estendidas para incluir restrições mais realistas como limites para o número de passageiros dentro de determinada estação, um limite para a frequência de ônibus ao longo da rota, o comprimento das vias, ou um limite para o número máximo de ônibus dentro de determinados segmentos. Desta forma, busca-se minimizar o tempo total de viagem, considerando o tamanho da frota, ou seja, o investimento feito, o que proporcionará benefícios aos passageiros e ao gestor do sistema.

## 3.2 Performabilidade Aplicada

Esta seção tem o objetivo de apresentar trabalhos que tratem de performabilidade, mas que não sejam, absolutamente, ligados à computação. Então, passa a ser denominada performabilidade aplicada, dado que performabilidade foi um termo cunhado especificamente na análise de sistemas. Destaca-se a baixa quantidade de publicações que tratam de performabilidade, assim como, ainda mais escasso, é o estudo da performabilidade atrelado a áreas distintas da computação.

O primeiro trabalho que pode ser apresentado trata de um estudo de performabilidade



na área de logística da indústria de café. (NASCIMENTO et al., 2014) apresentam uma abordagem baseada em Redes de Petri Estocástica (SPN) para avaliar diferentes modos de transporte logístico de entrada para a indústria de café, considerando a performabilidade e sustentabilidade. Os autores fazem análises experimentais que revelam cenários para a melhoria na cadeia de fornecimento da indústria estudada.

Outro trabalho que foge da perspectiva computacional é apresentado por (BEAMON, 1998), que faz uma revisão sobre desempenho, confiabilidade e medidas de performabilidade utilizadas na análise e projeto de sistemas de manuseio de materiais em um ambiente de produção. O autor descreve que o uso de várias medidas de desempenho é capaz de resultar em projetos de sistemas de operação mais eficientes e eficazes, assim, é estabelecido um método que considera simultaneamente várias medidas de desempenho e confiabilidade para o design do sistema de manuseio e análise de material. Dessa maneira, a performabilidade surge como uma medida adequada para a avaliação de sistemas de manufatura.

Em (VISWANADHAM; RAM, 1994) é realizada a avaliação de um sistema de produção industrial, considerando a falha e reparo dos componentes do sistema. Neste trabalho, os autores fazem uma avaliação de desempenho e dependabilidade do sistema, através de formulação matemática e fazem a composição para avaliação da performabilidade, utilizando Cadeias de Markov. O estudo é realizado em células de produção flexíveis e em um sistema de produção com duas células e uma unidade de reparo centralizada. Através deste estudo, é possível avaliar a melhor composição das células de produção, de modo que mantenha uma melhor performabilidade.

(BAUSE et al., 2004) trazem uma avaliação de performabilidade em redes logísticas. Neste trabalho é feita uma abordagem através de CTMC para avaliação da performabilidade, no entanto, são criados, também, modelos de desempenho e de disponibilidade para avaliar as estações de trabalho, que são avaliados por simulação. Desta forma, os autores conseguem distribuir a carga de trabalho e possibilitar o melhor aproveitamento da rede logística.

Já (LIMA et al., 2014) fazem uma avaliação de performabilidade em centros de atendimento de emergência. Os autores utilizam a modelagem RBD e SPN para fazer a avaliação, considerando a dependabilidade e o desempenho. São feitas avaliações na estrutura de atendimento do call center e após a avaliação de performabilidade são propostas melhorias na arquitetura do atendimento, que corroboram com resultados melhores. Sendo este, portanto, um trabalho que se aproxima do que se busca nesta tese, com modelagens aproximadas, no entanto, com objetivos bastante distintos.

### 3.3 Comparação Entre Trabalhos Relacionados

A Tabela 3.3 resume os trabalhos relacionados mais relevantes mencionados neste capítulo, estabelecendo uma comparação destes com esta tese, relacionados aos seguintes temas: Avaliação de Desempenho (Probabilidade de Alcance do Destino, Tempo para Alcance do

Destino, Vazão, Probabilidade de não embarcar no primeiro veículo, Filas, Tamanho do Sistema e Utilização), Dependabilidade, Performabilidade, Custo, Modelagem e Sistema Avaliado.

Muitos trabalhos avaliam o desempenho de sistemas de transporte, no entanto, cada abordagem traz uma perspectiva diferente do problema e se torna relevante por propor novos métodos de análise, buscando, desta maneira, sempre melhorar o sistema. Esta tese atrelada-se a esta questão, porém, busca desenvolver novas perspectivas de análise de Sistemas de Transportes, em particular o caso do Sistema BRT.

Tabela 6 – Trabalhos Relacionados mais relevantes.

Trabalho Relacionado	Desempenho	Confiabilidade Disponibilidade	Performabilidade	Custo	Avaliação	Sistema Avaliado
(LOPEZ; TRIANA; CHAMORRO, 2011)	Sim	Não	Não	Não	PN	BRT
(HUO et al., 2014)	Sim	Confiabilidade	Não	Não	Séries Históricas	BRT
(PEÑA; MATEOS, 2013)	Sim	Não	Não	Não	Alébrica	BRT
(INGVARDSON; JENSEN, 2012)	Sim	Confiabilidade	Não	Não	Simulação	BRT
(SCHMID, 2014)	Sim	Não	Não	Não	Algoritmo Híbrido	BRT
(ZHANG et al., 2016)	Sim	Não	Não	Não	SE-DEA	Sistema Ônibus
(LAO; LIU, 2009)	Sim	Não	Não	Não	GIS	Sistema Ônibus
(AVILA-TORRES et al., 2018)	Sim	Não	Não	Sim	Alébrica	Sistema Ônibus
(GITTEMS; SHALABY, 2015)	Sim	Conf.	Não	Não	JTBI	Sistema Ônibus
(OORT, 2016)	Sim	Conf.	Não	Sim	ACB	Sistema Ônibus
(HAO; JIN; YANG, 2014)	Sim	Não	Não	Sim	Algoritmo Genético	Sistema Ônibus
(NASCIMENTO et al., 2014)	Sim	Sim	Sim	Não	SPN	Indústria Café
<b>Esta Tese</b>	<b>Sim</b>	<b>Sim</b>	<b>Sim</b>	<b>Sim</b>	<b>CTMC RBD SPN</b>	<b>STUMP</b>

(LOPEZ; TRIANA; CHAMORRO, 2011) realizam uma avaliação de desempenho do Sistema BRT e utilizam PN para modelar o sistema e propor alterações. Este trabalho, embora utilize modelagem, o faz de uma maneira muito mais representativa do que avaliativa, considerando somente melhora no tempo de alcance de destino, não computando qualquer outra métrica. Assim, esta tese busca a utilização da modelagem RBD, CTMC e SPN para avaliações de desempenho, dependabilidade e performabilidade do Sistema BRT.

(HUO et al., 2014) apresentam um dos trabalhos utilizados para composição de dados de entrada dos modelos desta tese. Este trabalho faz uma avaliação sobre a confiabilidade de uma rota do Sistema BRT na China, entretanto, destaca que a confiabilidade relatada é a confiança de alcance do destino. Esta tese se diferencia deste trabalho em virtude da completude de análise que vai além de desempenho, à dependabilidade e performabilidade de Sistemas de Transporte de Média Prioridade, em especial, Sistemas BRT.

(PEÑA; MATEOS, 2013) constroem uma proposta de otimização para o sistema BRT visando integrar a minimização de tempo de espera, otimização de rotas, otimização de custo, entre outros fatores atrelados ao Sistema BRT Transmilênio. Esta tese se diferencia deste trabalho por ampliar a análise, considerando fatores como dependabilidade e performabilidade, além da utilização de modelagem para avaliação do sistema.

(INGVARDSON; JENSEN, 2012) trabalham melhorias no Sistema BRT através de uma simulação, buscando melhor interação de veículos na rota. Embora trabalhe a perspectiva de confiabilidade, não trata a capacidade de sobrevivência do veículo, mas sim, a confiança. Assim, esta tese se mostra diferente por propor alternativas embasadas em confiabilidade, desempenho, disponibilidade, através de modelos RBD, SPN e Cadeias de Markov.

(SCHMID, 2014) utiliza algoritmos híbridos para desenho e redesenho de rotas do BRT, visando a satisfação do usuário. Esta tese se diferencia por agregar a análise de custo, modelagem e avaliação de dependabilidade e performabilidade para oferecer diversas perspectivas de soluções ao sistema.

(ZHANG et al., 2016) e (LAO; LIU, 2009) fazem avaliação de desempenho de Sistemas de Transporte, no qual o primeiro foca o aspecto de satisfação do usuário prioritariamente, enquanto o segundo busca uma avaliação de eficiência e eficácia operacional, restrita a poucos fatores de análise. Esta tese amplia o campo de avaliação, como destacada anteriormente.

(AVILA-TORRES et al., 2018) trabalham problemas no planejamento visando melhorar o desempenho. Embora considerem fatores como demanda, veículos e frequências de partida, não consideram a possibilidade de falha no sistema, nem mesmo impacto desta no desempenho. Apresentando-se esta tese mais completa e abrangente.

(GITTENS; SHALABY, 2015) desenvolvem um índice de confiabilidade sob a perspectiva do passageiro (JTBI), avaliando que fatores como tamanho da rota, o tempo parado, o período do dia, a proximidade da rota do centro da cidade e a quantidade de passageiros podem impactar no desempenho do sistema, o que impacta na confiança do usuário a

utilizar o sistema. No entanto, não utiliza nenhuma técnica para avaliar as métricas de desempenho que são avaliadas nesta tese através do Modelo para avaliação de métricas estacionárias de desempenho - SPN.

(OORT, 2016) traz uma análise de custo-benefício e a confiabilidade do serviço, mostrando a importância da verificação de custo para a tomada de decisão quanto a investimentos nos sistemas de transportes. Por outro lado, difere desta tese por não considerar a dependabilidade e performabilidade do sistema.

(HAO; JIN; YANG, 2014) utilizam um algoritmo genético para otimizar os custos de espera e operação do sistema sob a perspectiva dos passageiros. Porém, diferencia-se desta tese não trabalhar fatores como confiabilidade e disponibilidade do sistema, que podem enriquecer o processo de melhoria do sistema.

(NASCIMENTO et al., 2014) trabalham com avaliação de desempenho, dependabilidade e performabilidade, utilizando a modelagem em SPN. Esta tese tem um foco semelhante, no entanto, o objeto de análise é o sistema de transporte de Média Prioridade.

### 3.4 Considerações Finais

Neste capítulo, foram apresentados os principais trabalhos correlatos ao estudo proposto. Embora existam diversos trabalhos que tratam sobre a avaliação de desempenho para sistemas de transportes e o Sistema BRT em si, não foi encontrado nada que trabalhe a performabilidade ou dependabilidade deste sistema, que se mostra bastante relevante, já que faz avaliação da falha e do defeito no sistema, fatores esses que podem afetar no desempenho. Ainda é possível encontrar trabalhos que utilizem modelagem para avaliação de sistemas de transporte, no entanto, nesta tese, é utilizada a modelagem analítica, com RBD, CTMC e SPN, uma perspectiva diferente de análise que pode referendar outros estudos existentes, e, também, oferecer novas perspectivas para análise. Desta forma, esta tese se distancia de outros trabalhos da literatura por propor um framework para a análise de Sistemas de Transporte, em especial, Sistema BRT, que proporcionará aos tomadores de decisão, novas possibilidades na escolha de alternativas ao Planejamento do Sistema.

## 4 METODOLOGIA

Este capítulo apresenta a metodologia proposta para, através de estudos de desempenho, confiabilidade, disponibilidade, performabilidade e custo, promover subsídios para auxiliar o planejamento de STUMP. A partir de métricas de avaliação, serão construídos modelos para subsidiar a tomada de decisão pelos planejadores do sistema.

### 4.1 Visão Geral

A metodologia proposta visa avaliar STUMP, sob a perspectiva do planejamento de alternativas, considerando os seguintes benefícios: otimização do tempo de viagem, confiança ao usuário sobre o tempo de chegada e o caminho do veículo, impacto das filas no sistema, níveis de utilização e vazão. Sob os aspectos descritos, foram realizados estudos de desempenho, confiabilidade, disponibilidade, performabilidade e custo, visando a construção de métodos para avaliação de STUMPs, consistindo na geração de modelos analíticos, avaliação dos cenários configurados e apresentação de alternativas para melhoria no processo de decisão em Gestão de Transportes.

Assim, o que se propõe é o estudo da metodologia para avaliação de desempenho, confiabilidade, disponibilidade e performabilidade. Considerando que, para perspectiva de avaliação poderá ser feito estudos diagnóstico e de planejamento. Desta forma, temos seis formulações metodológicas que compõem o estudo desta tese.

Destacamos que as formulações metodológicas foram construídas para serem avaliadas isoladamente, ou seja, descrevemos o passo a passo de como é possível realizar cada estudo, bastando ao gestor escolher qual o seu objeto de interesse. Assim, é possível observar aspectos textuais semelhantes no contexto geral do texto; o nosso foco, porém, é a perspectiva individual de construção metodológica.

O fluxograma da Figura 13 representa de maneira visual a metodologia de apoio adotada no planejamento de STUMP, no qual temos o gestor, que controla os processos metodológicos a depender da perspectiva de análise que busca. Destaca-se que as metodologias podem ser trabalhadas isoladamente, ou em conjunto, de maneira macro, para avaliar os STUMP.

A partir desta metodologia, acredita-se que administradores, analistas e/ou técnicos que detenham determinado conhecimento em modelagem analítica para o planejamento e tomada de decisão em STUMP possam fazer inferências sobre alternativas para melhoria do Serviço provido pelos operadores do sistema. O desenvolvimento dessa metodologia deve proporcionar meios para analisar alternativas que satisfaçam critérios de melhor desempenho, avaliação de confiabilidade e disponibilidade e melhor performabilidade para o funcionamento do sistema.

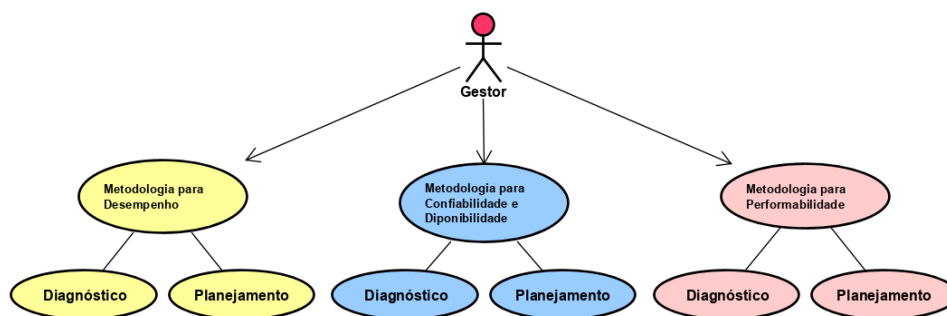


Figura 13 – Metodologia.

## 4.2 Modelagem para Desempenho

A modelagem de desempenho busca identificar e definir parâmetros que possam cumprir com padrões estabelecidos pelos gestores e que, também, sejam aceitáveis pelos usuários, tais como a probabilidade de alcance do destino, o tempo médio para chegar ao destino, o tamanho das filas nas estações, tempo de espera do passageiros, entre outros fatores importantes.

Nesta perspectiva, trabalha-se sob duas perspectivas para analisar o desempenho. A primeira corresponde ao estudo diagnóstico, para que se possa estabelecer padrões de desempenho. E a segunda, trabalha com estudo de planejamento, buscando propor cenários para melhorar os fatores que impactam nas métricas estudadas.

Dessa maneira, apresentamos o método diagnóstico para desempenho.

### 4.2.1 Método Diagnóstico para o Desempenho de STUMPs

O método diagnóstico para avaliação de desempenho pode ser representado pelo Diagrama de Atividades apresentado na Figura 14.

**Estudar o Sistema** consiste em identificar as principais características atreladas ao sistema estudado. Nesta perspectiva, a pré-condição básica da atividade é a necessidade de se avaliar o STUMP e terá como entradas referências bibliográficas e históricas a cerca destes sistemas. A partir dessas informações, o estudo é de fato executado, o que proporciona o entendimento dos Sistemas e fornece subsídios para que se possa definir os parâmetros que deverão ser estudados. Assim, o principal produto desta atividade é um documento textual com as principais características do sistema.

**Definir os parâmetros e métricas** emerge do estudo do sistema e tem como principal *input* as informações sobre os fatores de desempenho que podem ser melhorados. As métricas escolhidas correspondem ao que se compreende como fatores diferenciais para análise: Probabilidade de alcance do destino, tempo médio de alcance do destino, tamanho médio do sistema, tamanho médio da fila, tempo médio de fila, probabilidade do usuário perder o veículo, utilização e vazão do sistema. Com esta definição, será produzido um documento

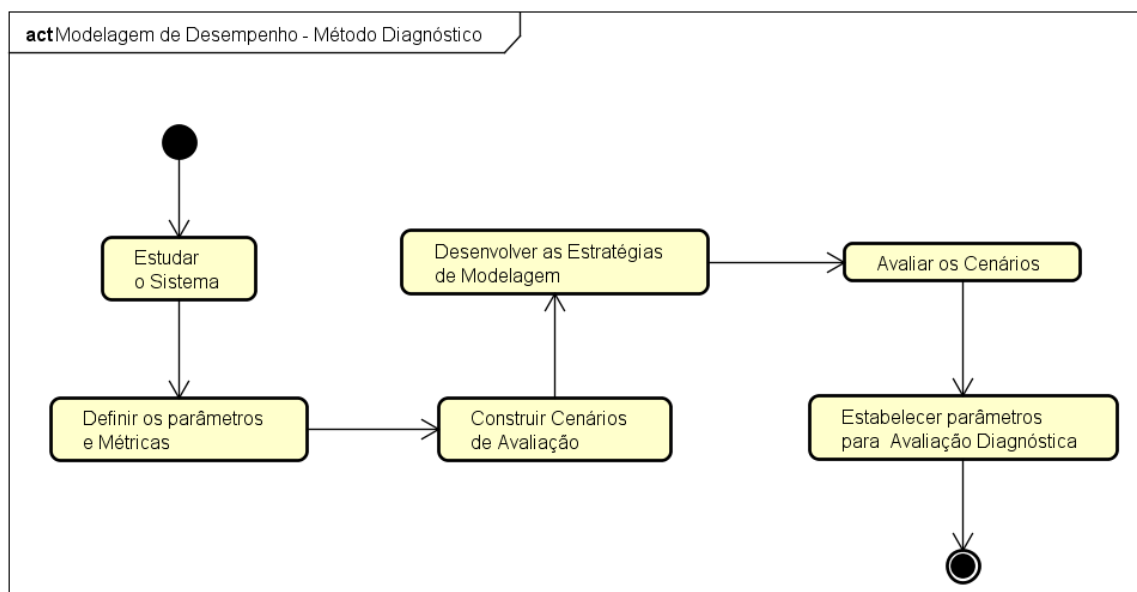


Figura 14 – Metodologia para diagnóstico de desempenho em STUMPs.

textual, que norteará o restante do estudo. Assim, são estabelecidas as métricas e os parâmetros que servirão como base para a fase de modelagem.

**Construir cenários de avaliação** tem como pré-condição, num cenário de diagnóstico, que se conheça o sistema e que se tenham estabelecidos parâmetros e métricas, que fornecerão as entradas para o sistema com as informações sobre os sistemas necessários para que cenários sejam criados. Para avaliação de desempenho, são considerados duas possibilidades: a primeira sobre a perspectiva do veículo para alcance do destino e a segunda numa relação entre passageiros, veículos e rota. Nesta atividade, deverá ser produzido um documento textual e elementos gráficos que servirão para elaboração do modelo. Assim, são definidos os cenários para avaliação, que resultarão na definição do que se buscará com a construção dos modelos, que representará estes cenários.

**Desenvolver as estratégias de modelagem** representa a fase de efetiva construção dos modelos. Que tem como pré-condição que se tenha definido o cenário de avaliação. Considerando as duas possibilidades definidas na atividade anterior, são construídos os modelos. Para o modelo de Probabilidade de Alcance do destino, são verificados a probabilidade de alcance do destino e o tempo médio para que se chegue ao destino, definida a estratégia de modelagem, onde foi construída uma Cadeia de *Markov* de nascimento puro, que foi transformado em um modelo matemático de Hipoexponencial. Esse modelo será apresentado em detalhes no Capítulo 5. Para a avaliação da relação entre passageiros, veículos e rota, que busca métricas relacionadas à fila, tempo de espera, entre outras, exigindo um nível de complexidade maior de análise, a estratégia mais adequada foi a de Modelagem em SPN. Estas atividades geram como resultados os modelos que compõem a base de estudo desta tese.

**Avaliar os Cenários** emerge dos cenários e modelos construídos, apresentando como



ação a verificação dos resultados obtidos, com a avaliação das métricas e parâmetros definidos sob as perspectivas buscadas. Assim, o produto desta atividade é um documento textual que retrata o resultado das métricas avaliadas.

**Estabelecer parâmetros para avaliação diagnóstica** consiste em, a partir dos resultados obtidos, estabelecer parâmetros para que se possa definir quais cenários apresentem melhores resultados para os STUMPS. Dessa maneira, são produzidos tabelas e gráficos que elucidam os principais resultados e os transformam em parâmetros para avaliação de outros cenários. Assim, a partir desta atividade, pode-se refletir sobre a situação atual de sistemas de transporte.

Com esta metodologia, é possível proceder a diagnósticos de desempenhos de Sistemas de Média prioridade.

#### 4.2.2 Método de Planejamento para o Desempenho de STUMPs

O método de planejamento para desempenho pode ser apresentado através do Diagrama de Atividades visto na Figura 15.

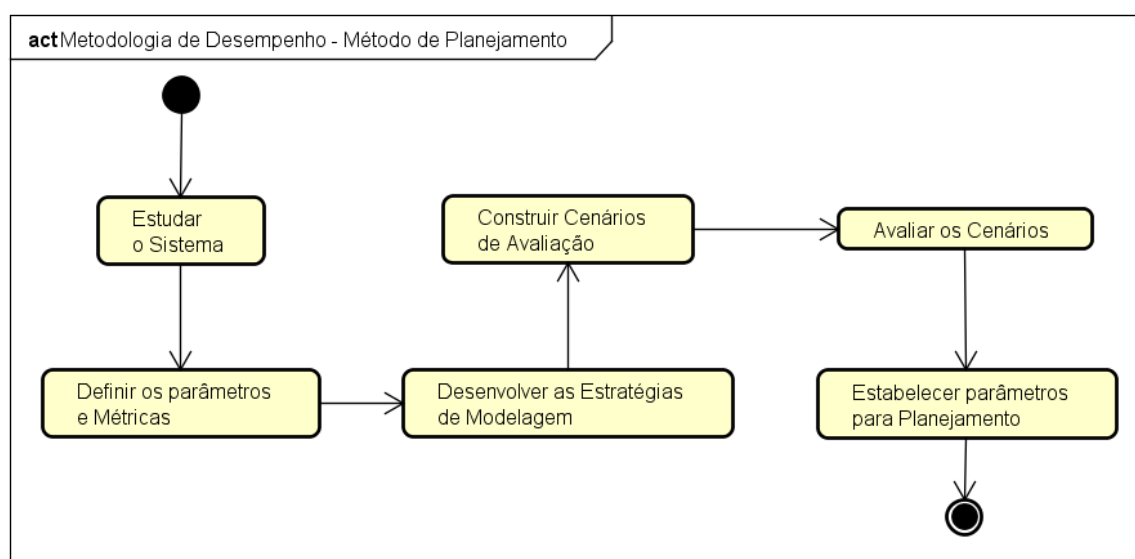


Figura 15 – Metodologia para planejamento de STUMPs - Perspectiva de Desempenho.

**Estudar o Sistema** visa conhecer as principais características atreladas ao sistema. Assim, a pré-condição básica da atividade é a necessidade de se avaliar o STUMP e terá como entradas referências bibliográficas, assim como históricas a cerca destes sistemas, além de resultados de estudos diagnósticos, se tiver sido pré-concebido. A partir dessas informações, o estudo é de fato executado, o que proporciona o entendimento dos Sistemas e fornece subsídios para que se possa definir os parâmetros que deverão ser estudados. O produto desta atividade é um documento textual com as principais características do sistema.

**Definir os parâmetros e métricas** deve ser construído após o estudo do sistema apresentando como entradas as informações sobre os fatores de desempenho que podem ser melhorados através do planejamento. As métricas escolhidas são: Probabilidade de alcance do destino, tempo médio de alcance do destino, tamanho médio do sistema, tamanho médio da fila, tempo médio de fila, probabilidade do usuário perder o veículo, utilização e vazão do sistema. Nesta perspectiva, será produzido um documento textual, que norteará o restante do estudo. Assim, são estabelecidas as métricas e o parâmetros que servirão como base para a fase de modelagem.

**Desenvolver as estratégias de modelagem** representa a fase de efetiva construção dos modelos, que apresenta como pré-condição para o planejamento a definição dos parâmetros e métricas de desempenho que se quer analisar. Na modelagem da Probabilidade de Alcance do destino, são verificados a probabilidade de alcance do destino e o tempo médio para que se chegue ao destino, definida a estratégia de modelagem, onde foi construída uma Cadeia de *Markov* de nascimento puro, a qual foi transformada em um modelo matemático de Hipoexponencial, que será apresentado em detalhes no Capítulo 5. Como se trata de um modelo estocástico, este pode ser feito em SPN de maneira equivalente. Para a avaliação da relação entre passageiros, veículos e rota, que busca métricas relacionadas à fila, tempo de espera, entre outras, a estratégia mais adequada foi a de Modelagem em SPN, já que existem muitos detalhes atrelados ao modelo e se tornaria extremamente complexo construir uma Cadeia de *Markov* equivalente. Estas atividades geram como resultados os modelos que compõem a base de estudo desta tese.

**Construir cenários de avaliação** tem como pré-condição para o planejamento, que se tenha o modelo de planejamento determinado, além de que se conheça o sistema e que se tenham estabelecidos parâmetros e métricas. Para o planejamento da avaliação de desempenho, serão consideradas as informações que se tem sobre o sistema e construídos cenários considerando os *inputs* necessários do modelo. Nesta atividade, deverá ser produzido um documento textual e elementos gráficos que servirão para avaliação e planejamento.

**Avaliar os Cenários** emerge dos modelos e cenários, e estabelece como ação a verificação dos resultados obtidos, avaliando as métricas e parâmetros definidos sob as perspectivas buscadas. Assim, o produto desta atividade é um documento textual que retrata o resultado das métricas avaliadas que servirão como parâmetros para planejamento.

**Estabelecer parâmetros para planejamento** consiste em, a partir dos resultados obtidos, estabelecer parâmetros para que se possa definir quais cenários apresentam melhores resultados para os STUMPS. Sendo produzido, portanto, tabelas e gráficos que elucidam os principais e os transformam em parâmetros para avaliação de outros cenários. Assim, a partir desta atividade, pode-se refletir sobre as melhores alternativas de planejamento para os sistemas de transporte.

A partir deste método, pode-se trabalhar o planejamento de desempenho de Sistemas

de Média prioridade.

### 4.3 Modelagem para Confiabilidade e Disponibilidade

A modelagem para dependabilidade, nesta tese, trabalha com dois atributos, que são a confiabilidade e a disponibilidade. Busca, também, identificar e definir parâmetros que possam auxiliar os gestores sobre as possibilidades de falha em dado período de tempo e de estar provendo o serviço de maneira correta.

Será trabalhada a perspectiva Diagnóstica para avaliação de confiabilidade e disponibilidade e, também, a perspectiva de planejamento, fornecendo informações para que os gestores possam tomar as decisões.

#### 4.3.1 Método Diagnóstico para Confiabilidade e Disponibilidade de STUMPs

O método diagnóstico para avaliação de confiabilidade e disponibilidade pode ser representado pelo Diagrama de Atividades apresentado na Figura 16.

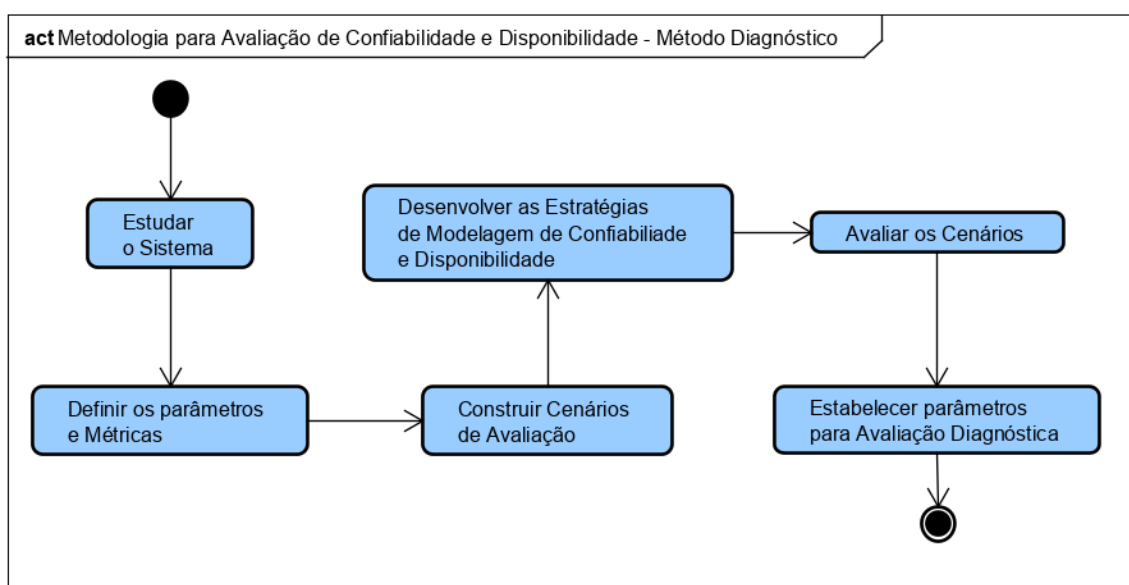


Figura 16 – Metodologia para diagnóstico de confiabilidade e disponibilidade em STUMPs.

A primeira atividade desenvolvida é **Estudar o Sistema**, que identifica as principais características do sistema as quais se deseja analisar. As entradas para esta atividade são referências bibliográficas e históricas sobre os sistemas, além de dados publicados de fabricantes de equipamentos, sobre a vida útil destes. Com estas informações o estudo é executado, subsidiando o entendimento do sistema e fornecendo dados para que se possa definir os parâmetros para confiabilidade e disponibilidade. Esta atividade tem como principal produto um documento textual com as principais características do sistema.

**Definir os parâmetros e métricas**, é uma atividade que tem como pré-condição que se conheça o sistema em análise. Seus *inputs* são as informações sobre os fatores de

dependabilidade que se deseja melhorar, neste caso, confiabilidade e disponibilidade. As métricas escolhidas correspondem ao que se compreende como fatores diferenciais para análise: MTTF, MTTR, *Downtime*, *Uptime*, Confiabilidade e Disponibilidade. Com esta definição, será produzido um documento textual, que norteará o restante do estudo. Assim, são estabelecidas as métricas e os parâmetros que servirão como base para a fase de modelagem.

**Construir cenários de avaliação** como pré-condição, num cenário de diagnóstico, que se conheça o sistema e que se tenham estabelecidos parâmetros e métricas, os quais fornecerão as entradas para o sistema com as informações necessárias para que cenários sejam criados. Para a avaliação de confiabilidade e disponibilidade, consideradas as mesmas, os cenários consideram a variação dos *inputs*, quantidade de estações em funcionamento, tempo de falha de equipamentos, entre outros. A partir desta atividade deverá ser produzido documentos textuais e elementos gráficos que irão auxiliar na elaboração do modelo.

**Desenvolver as estratégias de modelagem de confiabilidade e disponibilidade** corresponde a escolha do tipo de modelagem que será utilizada e a construção dos modelos. Para avaliação diagnóstica de confiabilidade e disponibilidade é necessário que se conheça os cenários de avaliação, sendo esta a pré-condição da atividade. Sob a perspectiva das métricas escolhidas (confiabilidade e disponibilidade) e a complexidade definida para avaliação do sistema ser mais generalista e, portanto, menos complexa, a estratégia de modelagem definidas foram os RBDs, que atendem ao que se deseja avaliar. Desta forma, inicialmente, foi construído o modelo RBD para Avaliar o Sistema, que implica na composição dos fatores que são essenciais para os STUMPS. Desta avaliação, deve ser modelado o subsistema de infraestrutura. Do modelo de infraestrutura, deve-se modelar a estação. Esses fatores serão detalhados no Capítulo 5. Esta atividade gera como resultados os modelos que compõem a base de estudo desta tese.

A atividade **Avaliar os Cenários** tem como pré-condição que se conheça o cenário e que se tenha os modelos construídos. A ação desta atividade é a verificação dos resultados obtidos, avaliando as métricas e parâmetros definidos sob as perspectivas buscadas. Assim, o produto desta atividade é um documento textual que retrata o resultado das métricas avaliadas.

**Estabelecer parâmetros para avaliação diagnóstica** consiste em, a partir dos resultados obtidos, estabelecer parâmetros para que se possa definir quais cenários apresentam melhores resultados para os STUMPS. Dessa maneira, são produzidas, portanto, tabelas e gráficos que elucidam os principais e os transformam em parâmetros para avaliação de outros cenários. A partir desta atividade, pode-se refletir sobre a situação atual de sistemas de transporte.

Assim, a avaliação diagnóstica da confiabilidade e disponibilidade de STUMPS pode ser realizada pelos gestores de transporte.

### 4.3.2 Método de Planejamento para a Confiabilidade e Disponibilidade de STUMPs

Para desenvolver estudos visando o planejamento de métricas de confiabilidade e disponibilidade, foi construído o Diagrama de Atividades apresentado na Figura 17.

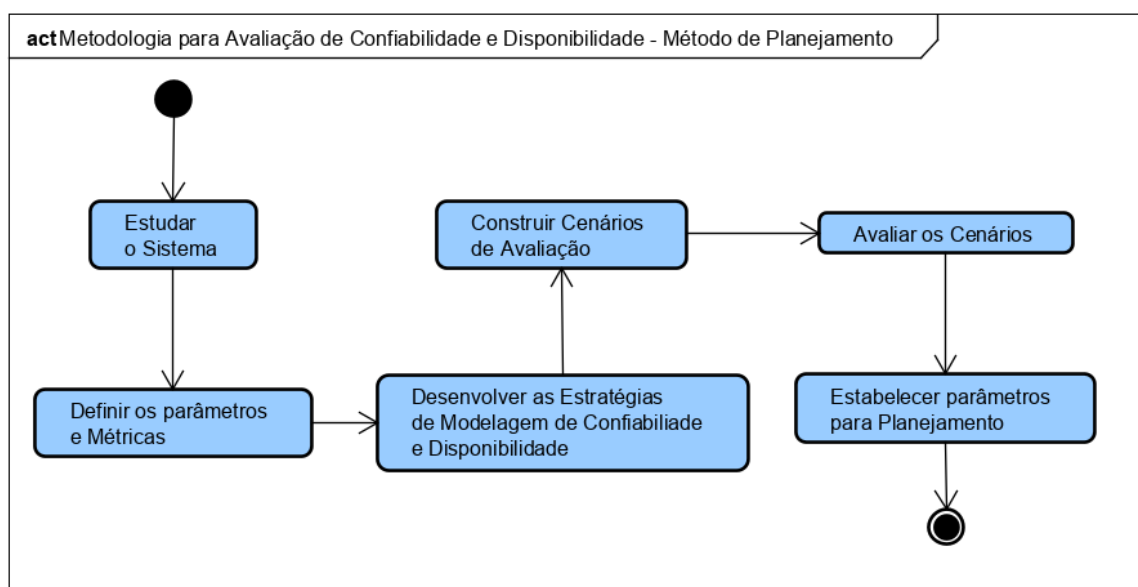


Figura 17 – Metodologia para planejamento de STUMPs - Perspectiva de confiabilidade e disponibilidade.

A primeira atividade desenvolvida é **Estudar o Sistema** que tem o objetivo de conhecer as características do sistema, considerando que esta atividade tem como pré-condição a necessidade dos gestores de avaliar a confiabilidade e disponibilidade. Nesta atividade, os *inputs* serão dados históricos sobre os sistemas de transporte e sobre o próprio sistema estudado, referências bibliográficas, além de manuais e documentos das fabricantes de componentes de infraestrutura dos sistemas. Desta forma, é possível proceder ao estudo do sistema, que terá como produto da atividade um documento textual, com a sintetização das principais características do sistema.

**Definir os parâmetros e métricas** deve ser construído após o estudo do sistema e tem como entradas as informações sobre os fatores de desempenho que podem ser melhorados através do planejamento. As métricas escolhidas são: Probabilidade de alcance do destino, tempo médio de alcance do destino, tamanho médio do sistema, tamanho médio da fila, tempo médio de fila, probabilidade do usuário perder o veículo, utilização e vazão do sistema. Nesta perspectiva, será produzido um documento textual, que norteará o restante do estudo. Assim, são estabelecidas as métricas e o parâmetros que servirão como base para a fase de modelagem.

A atividade **Desenvolver as estratégias de modelagem** representa a escolha da estratégia de modelagem a ser utilizada, considerando as peculiaridades do sistema e suas complexidades. No caso específico da confiabilidade e disponibilidade, o modelo

mais adequado é o RBD, que consegue capturar as informações necessárias para que se consiga avaliar confiabilidade e disponibilidade. É nesta fase que o modelo é efetivamente construído, tornando os modelos RBDs os principais produtos da atividade.

**Construir cenários de avaliação** traz como pré-condição para planejamento, a necessidade do modelo já estar concebido a partir dos dados pré-capturados pela atividade de estudar os sistemas. A ação de construção dos cenários é a criação de possibilidades para avaliação com variação de parâmetros de entrada do modelo. Assim, o produto desta atividade será um documento textual e elementos gráficos que auxiliarão no processo de planejamento da confiabilidade e disponibilidade.

**Avaliar os Cenários** é atividade sequencial às atividades de estratégia de modelagem e construção de cenários. Esta atividade tem como ação a verificação dos resultados obtidos, avaliando as métricas e parâmetros definidos sob as perspectivas de confiabilidade e disponibilidade. Assim, o produto desta atividade é um documento textual que retrata o resultado das métricas avaliadas que servirão como parâmetros para planejamento da confiabilidade e disponibilidade.

A atividade que finaliza o método é **Estabelecer parâmetros para planejamento** que visa estabelecer parâmetros para que se possa definir os cenários com melhores resultados de confiabilidade e disponibilidade para o sistema. Esta atividade tem como produtos gráficos e tabelas que apontam para as melhores possibilidades para o gestor, permitindo assim, que este tome as melhores decisões para o sistema.

Deste modo, é possível realizar o planejamento da confiabilidade e disponibilidade para STUMPs.

## 4.4 Modelagem para Performabilidade

A Modelagem para Performabilidade trabalha a probabilidade do sistema entrar em defeito e como isto afetará o desempenho. Assim, foi necessária a composição dos modelos de Desempenho para o Alcance do Destino e o Modelo de confiabilidade e disponibilidade, de onde foi extraído o MTTF, e transformado em taxa, computado pelo inverso do MTTF.

Para avaliação de Performabilidade foi construído o modelo hierárquico utilizando CTMC, que consegue abstrair as possibilidades de resultados de maneira precisa e consome menos recursos computacionais para análise.

A performabilidade pode ser trabalhada sobre a perspectiva diagnóstica, buscando compreender o sistema e verificar a adequabilidade dos seus resultados com o que se encontra na literatura, e/ou sob a perspectiva de planejamento, trabalhando a partir de dados históricos e dos modelos para criar cenários que podem ajudar os gestores.

Assim, apresentamos o método diagnóstico para avaliação de performabilidade.

#### 4.4.1 Método Diagnóstico para Performabilidade de STUMPs

A Figura 18 apresenta o diagrama de atividades que descreve o método diagnóstico de avaliação de performabilidade.

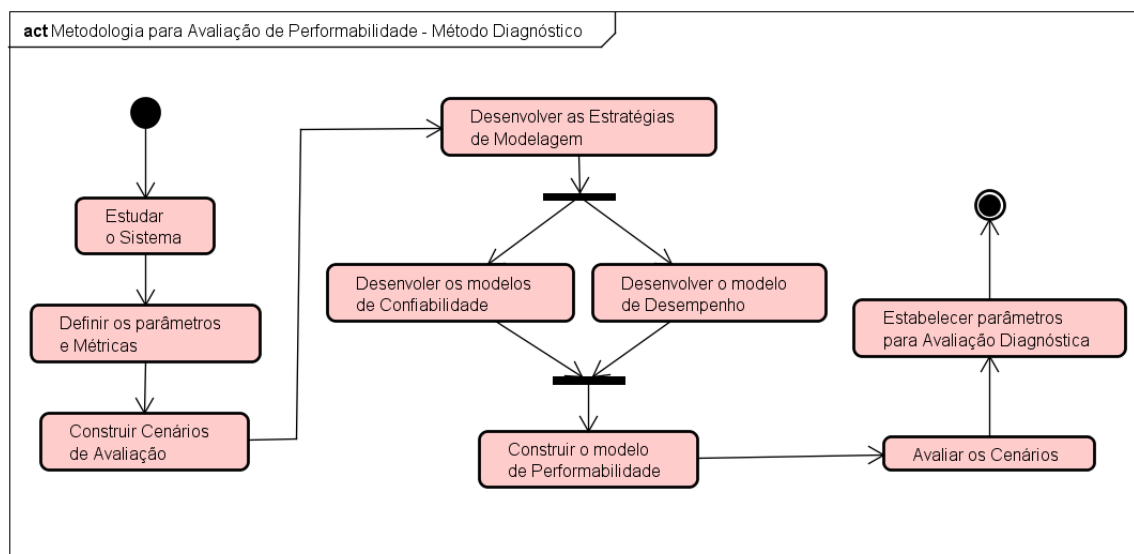


Figura 18 – Metodologia para diagnóstico de performabilidade em STUMPs.

Inicialmente, é importante que seja desenvolvida a atividade **Estudar o Sistema**, dado que nesta atividade serão identificadas as principais características do sistema que será analisado. Como base para esta atividade, devem ser obtidos *inputs* através de dados históricos do próprio sistema, referências bibliográficas e dados dos fabricantes. A partir destes dados, a atividade é executada, ou seja, o estudo é realizado, para que se consiga entender o sistema e obter dados para construir parâmetros de confiabilidade, desempenho e performabilidade. Esta atividade gerará como produto um documento textual que descreverá o sistema estudado.

A atividade **Definir os parâmetros e métricas** precede a construção dos cenários de avaliação e tem como pré-condição que se conheça o sistema que será analisado. Nesta atividade serão definidos os principais parâmetros que irão compor a modelagem de performabilidade. Neste caso, é necessário que se tenha o MTTF, a probabilidade de alcance de destino e a métrica de performabilidade que será trabalhada a partir dessas. Desta forma, deve-se construir como produto um documento textual descrevendo os parâmetros e métricas que serão avaliados nos modelos.

Num cenário diagnóstico, a atividade **Construir cenários de avaliação** tem como pré-condição, que se conheça o sistema e que se tenham estabelecidos parâmetros e métricas, os quais fornecerão as entradas para o sistema com as informações sobre o sistemas necessárias para que cenários sejam criados. Os cenários correspondem aos fatores que deverão compor a análise do sistema, oriundos dos parâmetros e métricas definidos. Para tanto, serão construídos documentos textuais com a descrição, além da representação por interfaces gráficas. Os cenários auxiliarão na construção dos modelos.

A atividade **Desenvolver as estratégias de modelagem** considera que o modelo de performabilidade é um modelo hierárquico, que utiliza na sua construção dados de modelos de confiabilidade, a fim de se conhecer o MTTF, que pelo seu inverso representa a taxa de falha e do modelo de desempenho para a probabilidade de alcance de destino, que representa o deslocamento à estação. Assim, para a composição dos modelos, deverá ser utilizado um modelo estocástico, que pode ser uma Cadeia de *Markov* ou uma SPN. O principal produto desta atividade é uma descrição textual justificando a escolha dos modelos. Definida a estratégia de modelagem, procede-se a construção efetiva dos modelos, apresentada nas atividades seguintes.

Como já ressaltado, um modelo de performabilidade precisa de um modelo de confiabilidade para gerar dados para ser construído. Então, a atividade **Desenvolver os modelos de Confiabilidade** trabalha a construção do modelo RBD que descreve a infraestrutura do sistema utilizando a metodologia descrita na 4.3.

No modelo de performabilidade, também é necessário que se desenvolva o modelo de Desempenho para alcance do destino. Dessa maneira, a atividade **Desenvolver os modelos de desempenho** pode seguir a metodologia construída na Seção 4.2.

Desta forma, a atividade **Construir o modelo de Performabilidade** só pode ser executada se as duas atividades anteriores tiverem sido realizadas. Para o modelo de performabilidade foi construída uma Cadeia de *Markov*, que corresponde ao modelo de desempenho de alcance do destino acrescido da possibilidade de falha. O produto desta atividade é o próprio modelo CTMC.

**Avaliar os Cenários** é a atividade que tem como ação a verificação dos resultados obtidos. Sua pré-condição é que se tenha o modelo de performabilidade e o cenário descrito. O produto da atividade é um documento textual que deverá apresentar a descrição dos resultados das métricas avaliadas através do modelo.

Obtidos os resultados, procede-se a atividade **Estabelecer parâmetros para avaliação diagnóstica** na qual são construídos parâmetros para que se possa definir quais cenários apresentam melhores resultados para os STUMPS. O produto desta atividade são tabelas e gráficos, que apontarão os principais parâmetros para avaliação de outros cenários. Desta atividade, é possível apontar comparativamente a situação do sistema avaliado, com outros vistos na literatura.

Este método auxiliará os gestores de transporte a entender e situar os sistemas ante a perspectiva de performabilidade.

#### 4.4.2 Método de Planejamento para a Performabilidade de STUMPs

A performabilidade para Sistemas de transporte proporciona melhores resultados sobre a perspectiva de como a falha afeta no desempenho. Assim, para auxiliar os gestores no processo de planejamento, foi desenvolvido um método de planejamento para a perfor-



mabilidade em STUMPs, apresentado através do Diagrama de Atividades mostrado na Figura 19.

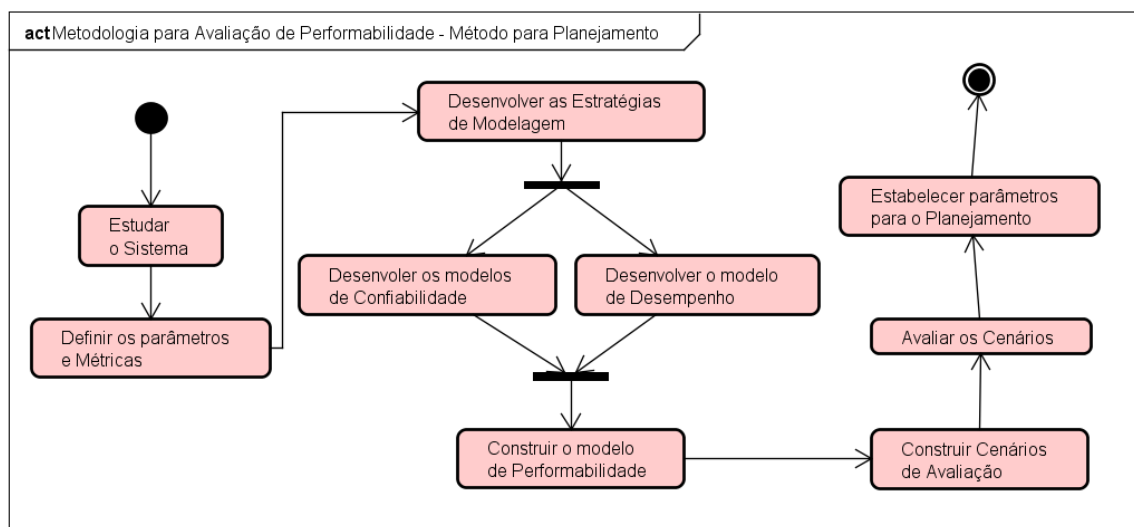


Figura 19 – Metodologia para planejamento de STUMPs - Perspectiva de confiabilidade e disponibilidade.

A atividade **Estudar o Sistema** visa a conhecer as principais características atreladas ao sistema e tem como pré-condição a necessidade de se avaliar a performabilidade do STUMP. Os *inputs* para esta atividade são referências bibliográficas e históricas a cerca destes sistemas, além de resultados de estudos diagnósticos, se tiver sido pré-concebido. A ação é o estudo em si, que irá proporcionar o entendimento do sistema e gerar informações para que se consiga definir os parâmetro e métricas do estudo. O produto desta atividade é um documento textual com as principais características do sistema.

**Definir os parâmetros e métricas** será realizada após o estudo do sistema tendo como entrada as informações sobre performabilidade, que podem ser desenvolvidas através do planejamento. A principal métrica trabalhada é a performabilidade, que vai derivar da confiabilidade (MTTF) e do estudo de desempenho. Nesta perspectiva, será produzido um documento textual, que norteará o restante do estudo. Assim, são estabelecidas as métricas e o parâmetros que servirão como base para a fase de modelagem.

No método de planejamento para a performabilidade, a atividade **Desenvolver as estratégias de modelagem** consiste em planejar todos os aspectos que estão envolvidos com a métrica principal. Dessa maneira, é preciso conceber os modelos de confiabilidade e de desempenho, para que se consiga desenvolver o modelo de performabilidade. Para a performabilidade será trabalhada a modelagem em Cadeia de *Markov*, considerando que as SPNs também podem ser utilizadas, visto que ambos conseguem capturar os detalhes necessários ao modelo hierárquico. O principal produto desta atividade é uma descrição textual justificando a escolha dos modelos.

Como modelo de performabilidade precisa de um modelo confiabilidade para gerar dados para ser construído, a atividade **Desenvolver os modelos de Confiabilidade**

trabalha a construção do modelo RBD que descreve a infraestrutura do sistema utilizando a metodologia descrita na Seção 4.3.

O modelo de performabilidade é necessário que se desenvolva o modelo de Desempenho para alcance do destino. A atividade **Desenvolver os modelos de desempenho** pode seguir a metodologia construída na Seção 4.2.

A atividade **Construir cenários de avaliação** tem como pré-condições para o planejamento, a necessidade de se conhecer o sistema, que o modelo estocástico esteja pré-concebido, assim como, que estejam estabelecidos os parâmetros e métricas. A principal ação da atividade é a geração de cenários a partir da combinação dos *inputs*, como intervalos entre deslocamentos, quantidade de estações em funcionamento, entre outros. Nesta atividade, deverá ser produzido um documento textual e elementos gráficos que servirão para avaliação e planejamento.

A atividade **Avaliar os Cenários** tem como pré-condição que se tenham os modelos e cenários definidos. A ação é a verificação dos resultados obtidos, avaliando as métricas e parâmetros definidos sob as perspectivas buscadas. Esta atividade gerará um documento textual que apresentará o resultado das métricas avaliadas e servirá como parâmetro para planejamento.

Finalizando o método de planejamento para a performabilidade, a atividade **Estabelecer parâmetros para planejamento** visa estabelecer parâmetros para que se possa definir quais cenários apresentam melhores resultados para os STUMPS. O produto final da atividade é a construção de tabelas e gráficos a fim de auxiliar os gestores nas escolhas das melhores combinações de parâmetros para composição do sistema STUMP.

Com esta metodologia, é possível proceder ao planejamento para melhorar a performabilidade em Sistemas de Média Prioridade.

## 4.5 Considerações Finais

Este capítulo apresentou a metodologia utilizada para o diagnóstico e planejamento de STUMP, principalmente do Sistema BRT, com foco na avaliação de Desempenho, Confiabilidade, Disponibilidade e Performabilidade. Podendo ser avaliado em conjunto, ou cada métrica de maneira isolada. Assim, a ideia é que esta metodologia possa ser aplicada pelos gestores de acordo com o objetivo, facilitando a sua execução, e podendo, portanto, ser replicada por outros autores que desejem fazer estudos complementares.

No próximo capítulo, serão apresentados os Modelos que compõem a solução para o atendimento do objetivo desta tese.

## 5 MODELOS

Os modelos para representação e avaliação de desempenho, confiabilidade, disponibilidade e performabilidade foram desenvolvidos considerando os aspectos primordiais no funcionamento de um STUMP. Cada modelo trabalha peculiaridades inerentes às métricas buscadas, entrevendo o resultado que se deseja atingir.

Inicialmente, serão apresentados três modelos de desempenho, sendo eles divididos em modelo de distribuição de probabilidade do tempo de alcance de destino através de CTMC, modelo de distribuição de probabilidade do tempo de alcance de destino através de SPN (os Tempos de Alcance de Destino são equivalentes ao Tempo Total de Viagem) e modelo para avaliação de métricas estacionárias de desempenho utilizando SPN.

Posteriormente serão trabalhados os modelos para dependabilidade, que são apresentados em RBDs para avaliação de confiabilidade e disponibilidade. Nesta avaliação, são construídos três modelos RBDs, onde o primeiro apresenta os aspectos avaliados no STUMP, ou seja, a infraestrutura e o veículo. O segundo modelo vem para a composição da infraestrutura, sendo um submodelo do primeiro RBD apresentado, e representa os componentes definidos para a avaliação que são as estações, as quais ao menos duas devem estar funcionando para que se possa assumir que o sistema está em operação, e o caminho. O terceiro modelo RBD avalia a disponibilidade e confiabilidade para a estação, onde definiu-se que, para estar em operação, os acessos à estação e do veículo à estação devem estar funcionando. Neste caso, ao menos um acesso da estação e um do veículo devem estar operantes. Desta forma, avalia-se a disponibilidade e confiabilidade para o STUMP.

A partir das avaliações de desempenho e dependabilidade, emergiu a possibilidade de avaliar a performabilidade do sistema. A partir daí, foram construídos dois modelos CTMCs que avaliam o impacto da falha no desempenho do sistema. O primeiro modelo avalia o impacto da falha no sistema considerando somente um deslocamento do veículo da estação inicial à estação final. O segundo modelo avalia o deslocamento do veículo considerando a ida à estação final e a volta à estação inicial, considerando um ciclo contínuo, ou seja, avalia a probabilidade do sistema entrar em defeito num ciclo de viagens, sendo possível avaliar uma média de viagens que é possível ser feita sem que o sistema se torne inoperante. É importante destacar que não foi considerado o envelhecimento dos equipamentos ou mesmo o processo de manutenibilidade.

Conforme apresentado na Metodologia (Capítulo 4), para se chegar ao processo de construção do modelo, é necessário antes ter estudado o sistema e definido as métricas de avaliação. Assim, esta etapa de construção do modelo corrobora com o que foi levantado anteriormente. Nesta perspectiva, são construídos os modelos que poderão nortear o planejamento de sistemas de transportes, emergindo, portanto, parte da contribuição desta tese.

## 5.1 Modelos de Desempenho

Esta seção apresenta os modelos concebidos para a avaliação de desempenho de STUMPS. Para a avaliação, os modelos foram divididos em modelos trabalhados sob a perspectiva de infraestrutura, assim como sob a perspectiva de infraestrutura e dos passageiros. Nesta perspectiva, tem-se dois modelos que capturam informações semelhantes. Eles são os modelos de distribuição de probabilidade do tempo de alcance de destino, sendo um com avaliação algébrica (através da CTMC e suas equações) e outro através de SPN, solução numérica, que em casos de distribuição de taxas de falha não exponencial, podem ser resolvidos por simulação. Para a avaliação da perspectiva dos passageiros em conjunto com a infraestrutura, que captura métricas estacionárias, foi construído um modelo SPN que possibilita a avaliação de métricas como, tamanho médio da fila, tamanho médio do sistema, vazão, probabilidade de não embarcar no primeiro veículo, utilização e tempo médio de fila. Os modelos serão apresentados a seguir.

### 5.1.1 Modelo de Distribuição de Probabilidade do Tempo de Alcance de Destino - CTMC

Em observação aos STUMPs, o primeiro aspecto que se buscou analisar fez referência aos Tempos de Alcance de Destino, uma vertente do desempenho do sistema. Os Tempos de Alcance de Destino são equivalentes ao Tempo Total de Viagem. Para esta análise, foi utilizada Cadeia de Markov de Tempo Contínuo (CTMC), dado que proporciona cálculos mais rápidos por meio de fórmulas fechadas (DANTAS et al., 2012), (JUNIOR, 2011).

Para avaliação é possível a utilização da técnica de aproximação de fases (*Moment Matching*). Para o cálculo da probabilidade de alcance de destino, conhecendo a média e o desvio-padrão, o cômputo do *moment matching* direciona para o resultado, considerando que aproxima o comportamento estocástico dos modelos de desempenho, como mostrado na Seção 2.5.

Assim, O inverso do coeficiente de variação dos dados medidos ou obtidos de um sistema (ver Equação 2.18 ou 5.1) permite a seleção da distribuição expolinomial que melhor se adapta à distribuição empírica.

$$\frac{1}{CV} = \frac{\mu_D}{\alpha_D} \quad (5.1)$$

Neste caso, se o inverso do CV for menor que 1, os dados devem ser caracterizados através de uma distribuição hiperexponencial. Se for diferente de 1 e um número inteiro, os dados devem ser caracterizados através da distribuição Erlang. Se for maior que 1, mas não for um número inteiro, os dados são representados através da distribuição hipoexponencial.

Como exemplo, pode-se considerar uma possibilidade em que a Média ( $\mu_D$ ) de deslocamento do veículo é de 20 min e o Desvio-Padrão ( $\alpha_D$ ) é de 3 min. Teremos, então,

como resultado, uma Distribuição Hipo-Exponencial, como apresentado na Figura 20. Com  $\Gamma_n = 44$  (número de fases), e  $\Lambda_1 = 1.29$  e  $\Lambda_2 = 2.28$ , taxas de deslocamento.

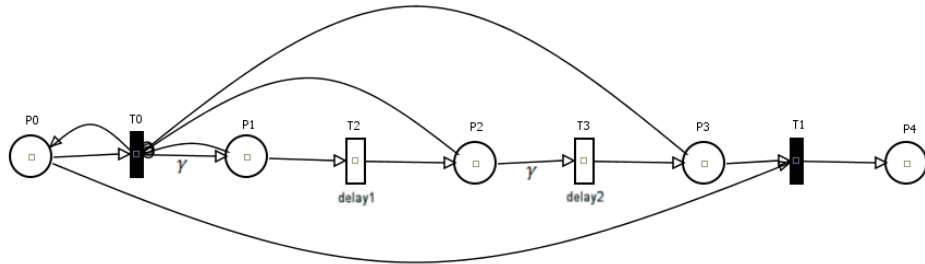


Figura 20 – Distribuição Hipo-Exponencial.

Num segundo exemplo, caso a Média ( $\mu_D$ ) de deslocamento do veículo seja de 30 min e o Desvio-Padrão ( $\alpha_D$ ) de 3 min, teremos como resultado uma Distribuição Erlang, como apresentado na Figura 21. Com  $\Gamma_n = 99$  (número de fases), e  $\Lambda = 3.33$ , taxa de deslocamento.

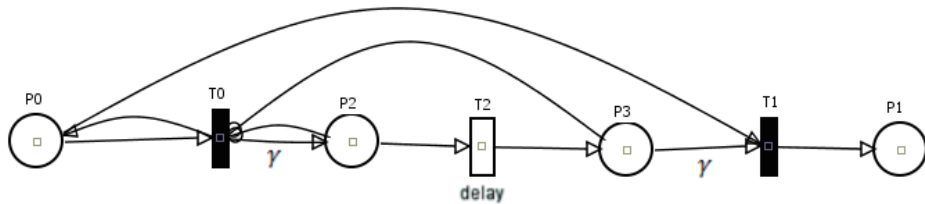


Figura 21 – Distribuição Erlang.

Para o estudo específico, foi construído o modelo CTMC, apresentado na Figura 22. Este modelo representa uma Cadeia de *Markov* de nascimento puro, ou seja, uma cadeia simples, onde só existe uma taxa de deslocamento de fase a fase. Neste caso, é possível perceber que apenas a primeira taxa é diferente das demais, dado que representa a taxa de deslocamento da Estação Central à Estação 1. As demais taxas, consideram a taxa de deslocamento entre as estações, levando em conta o tempo do veículo parado na estação.



Figura 22 – Modelo CTMC - Probabilidade de chegada do Veículo ao Destino.

O modelo CTMC apresentado é descrito como uma Distribuição Hipo-exponencial, que é a generalização da Distribuição Erlang, mas com diferentes taxas para cada transição

(SHAH et al., 2013). Assim, para a representação do modelo CTMC é utilizada a equação 5.2 (BOLCH et al., 2006).

$$PDF = \sum_{i=1}^k \alpha_i \lambda_i e^{-\lambda_i t}, t > 0, \text{ onde, } \alpha_i = \prod_{j=1, j \neq i}^k \frac{\lambda_j}{\lambda_j - \lambda_i}, 1 \leq i \leq k, \quad (5.2)$$

onde, para a *Probability Density Function* (PDF),  $\alpha_i = (\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4, \dots, \alpha_n)$  com  $\sum_{i=1}^n \alpha_i = 1$ ,  $\lambda_i$  é a taxa e  $t$  é o tempo.

O modelo da Figura 22 permite a obtenção de uma equação de forma fechada para o cálculo do Tempo Médio de Absorção *tempo médio de absorção* (MTTA), dado pelo cálculo da Média na Distribuição Hipo-exponencial (ver Equação 5.3), empregando os mesmos parâmetros da equação 5.2.

$$MTTA = \sum_{i=1}^k \frac{1}{\lambda_i} \quad (5.3)$$

O cálculo do MTTA permite encontrar o tempo de alcance do destino, uma vez que é o tempo que se leva do lugar inicial ao lugar final. Desta forma, é possível verificar, na literatura, dados que possibilitarão a comparação do estudo com a realidade apresentada em trabalhos publicados. Será considerado que se o MTTA for coincidente ao tempo de viagem, o modelo não terá argumentos para refutação.

### 5.1.2 Modelo de Distribuição de Probabilidade do Tempo de Alcance de Destino - SPN

A distribuição probabilidade de Alcance do Destino, pode ser concebida, também, através do modelo SPN apresentado na Figura 23. Este modelo apresenta uma Solução Numérica para o cálculo da probabilidade de alcance de destino, ou do tempo médio para alcance do destino. Em casos em que a as taxas de falha não são distribuídas exponencialmente, os resultados podem ser obtidos pela SPN apresentada, através de Simulação.

Assim, o modelo representa o ponto de partida do veículo, representado pelo retângulo verde; a estação central, representada pelo retângulo tracejado verde; as estações intermediárias, que podem ser replicadas, representadas pelo retângulo tracejado vermelho; a estação final, representada pelo retângulo tracejado azul; e o destino final do veículo, representado pelo retângulo azul.

No entanto, o principal aspecto referente à Distribuição de Probabilidade do Tempo de Alcance de destino está nas transições temporizadas apontadas pelas setas na figura. Onde, a transição  $T_{JSCTF}$  é equivalente ao arco  $\alpha_{tt}$  (Figura 22), destacada com a seta rosa. E as transições  $TE3\_1$  e  $TE7$ , são equivalentes aos arcos  $\alpha_{ttw}$  (Figura 22), destacados pelas setas vermelhas.

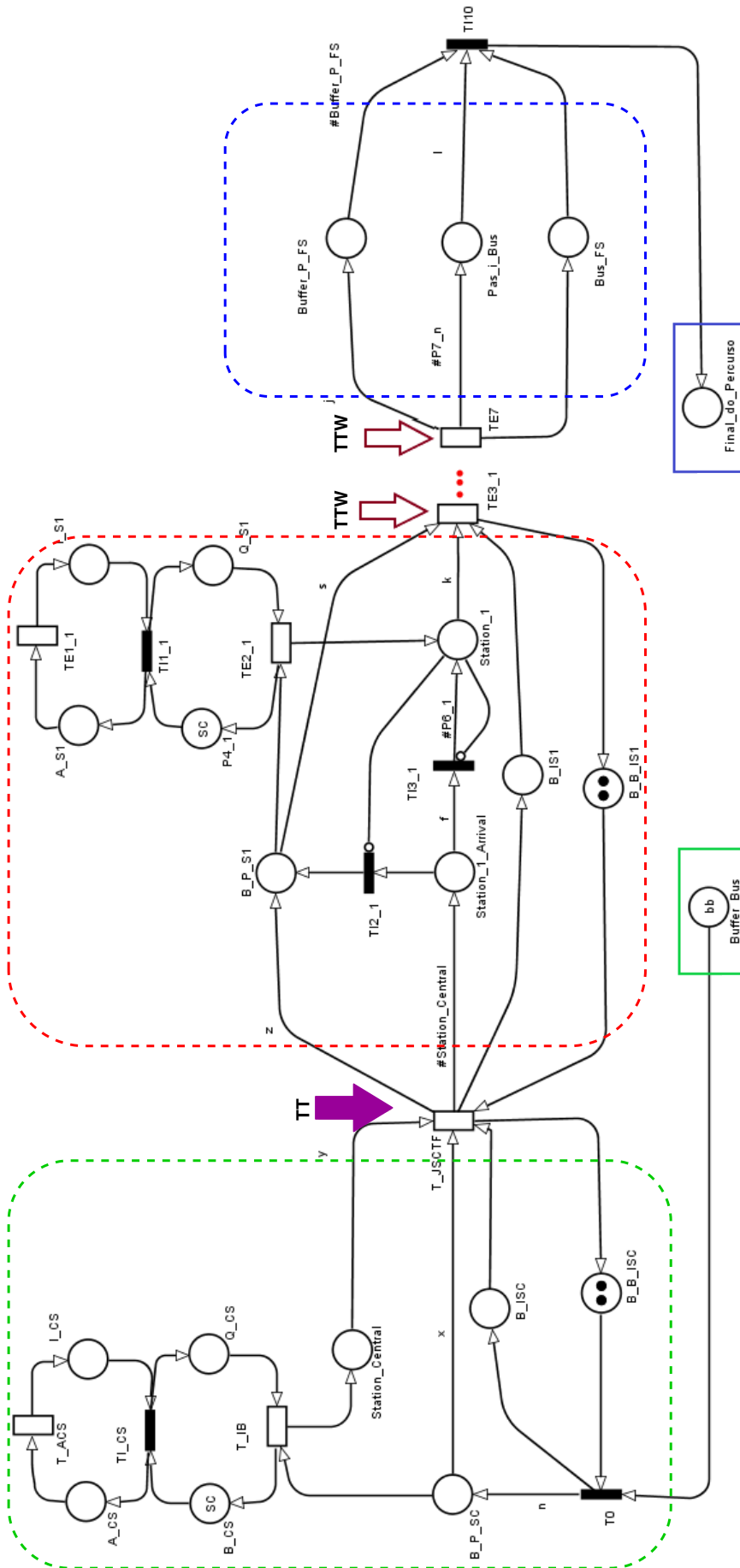


Figura 23 – Modelo SPN - Probabilidade de chegada do Veículo ao Destino.

Nesta perspectiva, é possível avaliar que os modelos se tornam equivalentes, já que os fatores utilizados para avaliação das probabilidades dos estados de alcance de destino e de tempo de alcance do destino são similares, estabelecendo resultados congruentes.

### 5.1.3 Modelo para Avaliação de Métricas Estacionárias de Desempenho - SPN

Visando a avaliação de métricas de desempenho distintas, foi construída a SPN apresentada na Figura 24. Para melhor entendimento, separamos em três blocos, que estão representados como: 1 (verde) apresenta a estação central; 2 (vermelho) que representa estações intermediárias; 3 (azul) que representa a estação final. Ressaltamos que os blocos 1 e 3 serão individuais, enquanto o bloco 2 pode ser replicado conforme o número de estações do Sistema BRT.



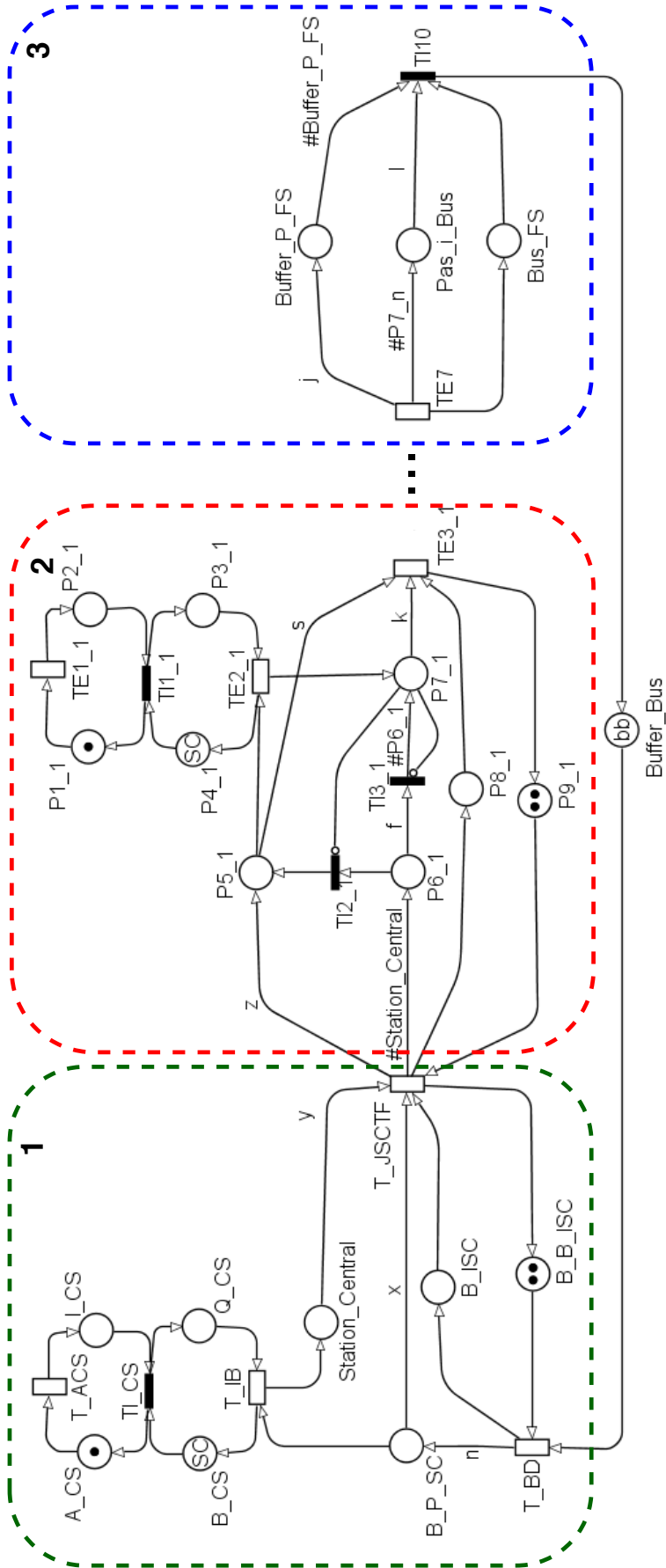


Figura 24 – SPN model of the BRT System.

Transição	Tipo	Tipo de Servidor	Tempo	Peso	Prioridade
<b>T_ACS</b>	Exponencial	Single Server	Intervalo de Chegada do Passageiro à Estação		
<b>TI_CS</b>	Imediata			1	1
<b>T_IB</b>	Exponencial	Single Server	Tempo para cada passageiro acessar o veículo		
<b>T_BD</b>	Exponencial	Single Server	Intervalo de partida do veículo (Headways)		
<b>T_JSCTF</b>	Exponencial	Single Server	Tempo de viagem de uma estação a outra		
<b>TI2_1</b>	Imediata			Probabilidade de descer na estação	1
<b>TI3_1</b>	Imediata			Probabilidade de seguir viagem	1
<b>TE1_1</b>	Exponencial	Single Server	Intervalo de chegada dos passageiros a estação		
<b>TI1_1</b>	Imediata			1	1
<b>TE2_1</b>	Exponencial	Single Server	Tempo para cada passageiro acessar o veículo		
<b>TE3_1</b>	Exponencial	Single Server	Tempo de viagem de uma estação a outra		
<b>TE7</b>	Exponencial	Single Server	Tempo de viagem de uma estação a outra		
<b>TI10</b>	Imediata			1	1

Tabela 7 – Transições para o Modelo SPN.

Arco	Peso
x	IF(#B_ISC>1):((#B_P_SC)-n)ELSE(#B_P_SC)
n	Number of assents on the bus
y	IF(#Station_Central>=1):(#Station_Central)ELSE(0);
z	IF(#B_ISC>1):((#B_P_SC)-50)ELSE(#B_P_SC);
f	IF(#P6_1>=1):(#P6_1)ELSE(1);
s	IF(#P8_1>1):((#P5_1)-50)ELSE(#P5_1);
k	IF(#P7_1>=1):(#P7_1)ELSE(0);
j	IF(#P8_5>1):((#P5_5)-50)ELSE(#P5_5)
l	IF(#Buffer_P_FS>=1):(#Buffer_P_FS)ELSE(1);

Tabela 8 – Pesos dos Arcos para o Modelo SPN.

Para avaliar o modelo, é importante conhecer a descrição de cada transição apresentada na Tabela 7. Ainda, considerando que neste modelo muitos dos arcos assumem valores diferentes de 1, apresentamos as descrições dos pesos dos arcos (Tabela 8).

Assim, o Bloco 1, conforme mostrado na Figura 24, em sua parte superior, representa a Estação Central, o Lugar **#A\_CS** representa a chegada do passageiro tendo um *token* de marcação neste lugar. A Transição **T\_ACS** representa o intervalo entre chegadas de passageiros na estação, que será disparada sempre que estiver habilitada, consumindo um *token* e depositando-o no lugar **#I\_CS**, que representa a entrada do passageiro na estação. A Transição Imediata **TI\_CS** estará habilitada se houver *token* nos lugares **#I\_CS** e **#B\_CS**, que representa a capacidade da estação, ou seja, o limite da fila de passageiros. O disparo da transição **TI\_CS** deposita um *token* ao lugar **#A\_CS**, representando que haverá a chegada de outro passageiro, e coloca um *token* no lugar **#Q\_CS**, onde o passageiro estará na fila, limitada à capacidade definida pela variável **SC** no lugar **#B\_CS**. O passageiro deixará a estação e entrará no ônibus no disparo da Transição **T\_IB**, que contabiliza o tempo de entrada de cada passageiro no veículo, sendo, portanto, *single server*. No entanto, esta transição estará habilitada se houver *token*, também, no Lugar **#B\_P\_SC**. Para que se tenha *token* neste lugar, é necessário que o veículo tenha entrado na rota. Para isto, o Lugar **#Buffer\_Bus** que representa a quantidade de veículos disponíveis para o Sistema deve ter um valor diferente de 0, ou seja, a variável **bb** que representa a quantidade de veículo deve ser maior ou igual a 1 na sua marcação inicial, dado que este valor possibilita o disparo da transição **T\_BD**, que depositará no lugar **#B\_P\_SC** a quantidade de *tokens* determinadas pelo arco de peso **n**. A variável **n** representa à capacidade do veículo, que serão as vagas disponibilizadas para o embarque de passageiros. Desta forma, se houver *tokens* no Lugar **#B\_P\_SC** e no Lugar **#Q\_CS** poderá haver o disparo da transição **#T\_IB**, que depositará no lugar **#Station\_Central** os referidos *tokens*, limitados a capacidade do veículo, **#B\_P\_SC**, e a quantidade de passageiros na fila **#Q\_CS**. O Lugar **#Station Central** representa

a quantidade de passageiros que está dentro do veículo.

O lugar  $\#B\_ISC$  representa que o veículo está na estação; este lugar terá *tokens* depositados pelo disparo da transição  $T\_BO$ , que estará habilitada se houver *tokens* nos lugares  $\#Buffer\_Bus$  e  $\#B\_B\_ISC$ . O Lugar  $\#B\_B\_ISC$  representa o número de veículos capazes de parar na estação. No caso das estações BRTs, este limite está restrito a dois veículos por estação, por isso, a marcação inicial do modelo é de 2 *tokens* no Lugar  $\#B\_B\_ISC$  e a cada disparo  $T\_BO$  um *token* é consumido e depositado no lugar  $\#B\_ISC$ .

A transição  $T\_JSCTF$  representa o tempo de deslocamento da **Central\_Station** à **Station\_1**. O Disparo da transição  $T\_JSCTF$  precede de uma condição necessária para a sua habilitação que é a necessidade de haver ao menos um ônibus na estação, ou seja, que o lugar  $\#B\_ISC$  seja maior ou igual a 1. A transição é ainda alimentada por dois arcos provenientes do Lugar  $\#Station\_Central$ , que tem peso  $y$  e representa a condição de consumo de todos os *tokens* do Lugar  $\#Station\_Central$ , caso existam *tokens* neste lugar, ou terá peso 0 de consumo caso não haja nenhum passageiro na estação deixando o ônibus livre para seguir sem passageiro, ou seja, permitindo a habilitação da transição mesmo sem *tokens* a serem consumidos. O outro arco que habilita a transição  $T\_JSCTF$  precede do lugar  $\#B\_P\_SC$ , que tem peso  $x$ . Esta variável representa que se o lugar  $\#B\_ISC$  tiver mais de um *token*, o peso do arco será  $\#B\_P\_SC$  (a quantidade de vagas restantes no veículo, já que algumas vagas podem ter sido subtraídas com o disparo de  $T\_IB$ ) subtraídas de  $n$ , que é a capacidade de um veículo, visto que o deslocamento se dá de um veículo por vez. Então, essa condição limita a quantidade de vagas que poderão ser ocupadas por veículo. Caso exista apenas um *token* em  $\#B\_ISC$ , o peso do arco será igual à quantidade de *tokens* de  $\#B\_P\_SC$ , ou seja, todas as vagas vão ser subtraídas com o disparo da transição, que representa a passagem do veículo à próxima estação, neste caso, o Bloco 2.

O Bloco 2 (vermelho), representa uma estação intermediária de um Sistema BRT. O disparo da transição  $T\_JSCTF$ , irá consumir os *tokens* descritos e depositar nos seguintes lugares: Em  $\#P5\_1$ , que representa a quantidade de vagas disponíveis no veículo, sendo que o arco que liga a transição ao lugar terá peso  $z$ , o qual descreve que a quantidade de vagas disponíveis na transição estará condicionada ao lugar  $\#B\_ISC$ . Porém, se este lugar for maior que 1, o peso do arco será  $\#B\_P\_CSn$ , pois terá mais de um veículo, em que  $n$  representa as vagas de um veículo. Se for menor ou igual a 1 será a própria quantidade de  $\#B\_P\_SC$ . Outro lugar que receberá *token* será  $\#P8\_1$  que pelo peso do arco receberá 1 *token*, o qual representa a chegada do veículo à estação. É válido ressaltar, que a quantidade de *tokens* de  $\#P8\_1$  está limitado à quantidade de vagas na estação, que é representada por  $\#P9\_1$ . O último lugar que receberá *tokens* da transição  $T\_JSCTF$ , será  $\#P6\_1$ , que representa, de fato, quantos passageiros acessaram a estação pelo veículo, , assim como o peso do arco que liga a transição ao lugar é determinado pela quantidade

de *tokens* do lugar **#Station\_Central**. No entanto, quando o veículo chega à (**#P6\_1**), existe a possibilidade de o passageiro descer do veículo, que neste caso é representada pela transição imediata **TI2\_1** a qual terá um peso associado a depender do percentual de passageiros que desembarcam na estação, ou permanecer no veículo representado pela transição imediata **TI3\_1**. Esta transição também terá um peso associado a depender das taxas de desembarque das estações. Para as transições imediatas **TI2\_1** e **TI3\_1** existem arcos inibidores associados, dado que para a construção do modelo foi considerado que o procedimento deve seguir a ordem de desembarque primeiramente e, posteriormente, o embarque. O disparo da transição **TI2\_1** consome *tokens* do lugar **#P6\_1** e deposita no lugar **#P5\_1**, que representa a quantidade de vagas disponíveis no veículo, ou seja, o desembarque dos passageiros irá gerar novas vagas no veículo. O disparo da transição **TI3\_1** está precedido do consumo de *tokens* do Lugar **#P6\_1**, que será representado pelo arco **f**, o qual considera o consumo de todos os *tokens* do lugar, ou seja, peso igual a **#P6\_1**, , que depositará a mesma quantidade em **#P7\_1**, representando os passageiros dentro do veículo na estação.

A chegada à estação é representada de maneira similar à Estação Central, **#P1\_1** que representa a chegada do passageiro à estação, com um *token* de marcação no lugar; a transição **TE1\_1** representa o intervalo de chegadas de passageiros à estação, que consome o *token* de **#P1\_1** e deposita em **#P2\_1**, o qual representa a entrada do passageiro na estação. A Transição Imediata **TI1\_1** estará habilitada se houver *token* no lugar **#P2\_1** e **#P4\_1** que representa a capacidade da fila da estação, nesse caso, representado pela variável **SC**. Assim, o passageiro chegando à estação e tendo lugar na fila, a transição será disparada consumindo um *tokens* dos respectivos lugares e depositando em **#P3\_1**, que representa o passageiro na estação esperando o veículo. O disparo da transição **TE2** está limitado a quantidade de *tokens* em **#P5\_1**, que representa as vagas no veículo, em **#P3\_1**, a quantidade de passageiros na fila. Estando habilitada, a transição **TE2\_1** irá consumir *tokens* de **#P3\_1** e **#P5\_1** com o tempo associado a ela determinado pelo tempo médio que cada passageiro leva para entrar no veículo. A transição **TE2\_1** irá depositar *tokens* no lugar **#P7\_1**, que mostra a quantidade de passageiros no veículo.

O disparo da transição **TE3\_1**, que representa o tempo de deslocamento entre estações, denota o consumo de *tokens* de três lugares: **P5\_1**, de onde haverá o consumo de *tokens* definido pela variável **f**, que representa a possibilidade de haver mais de um *token* no lugar e, nesse caso, todos serão consumidos. Caso contrário, o arco assumirá peso 1; **#P7\_1**, no qual haverá o consumo de *tokens* definidos pela variável **k**, que representa que se o lugar **#P7\_1** for maior ou igual a 1, o peso do arco será a quantidade de *tokens* do lugar; caso seja 0, o peso do arco será 0; e, por último **#P8\_1**, que tem peso 1, e representa que o veículo se deslocou até a próxima estação.

O bloco, 3, o último no processo, representa a estação final. O Disparo da transição **TE**, consome os *tokens* dos lugares associados à última estação representada, e deposita *token*

nos referidos lugares: **#Buffer\_P\_FS** representa com quantas vagas o ônibus chegou ao final do percurso, condicionado pelo peso do arco **j**, que é definido pela quantidade de veículos na estação anterior (**#P8\_x**); se este for maior que 1, o peso do arco será a quantidades de pessoas no *buffer* da estação anterior menos a capacidade do veículo (**n**), **#P5\_1n**, caso seja menor ou igual a 1, será a quantidade de vagas do *buffer*, **#P5\_1**; **#Pas\_I\_Bus**, refere-se à quantidade de passageiros que chegou no veículo, tendo a quantidade de *tokens* depositadas pelo arco que representa a quantidade de passageiros na estação anterior, **#P7\_n**; **#Bus\_FS**, que representa o ônibus na Estação Final, tendo aí depositado 1 *token*. O disparo da transição imediata **TI10** está condicionado ao consumo de *tokens* dos lugares: **#Buffer\_P\_FS**, de onde serão consumidos todos os *tokens* dado que o veículo retornará à garagem, ou seja, todas as vagas estarão disponíveis; **#Pas\_I\_Bus**, que alimentará a transição com o arco **l**, que em caso do lugar apresentar um ou mais *tokens*, será a quantidade total de *tokens* que será consumida; caso seja 0, terá peso 1 para habilitar a transição. O disparo da transição deposita 1 **token** no lugar **#Buffer\_Bus**, que representa que o veículo estará pronto para novo uso.

A partir desse modelo, é possível avaliar diversas métricas, que serão destacadas na Subseção 5.1.4.

#### 5.1.4 Métricas para Avaliação do Modelo

Nesta tese, as métricas trabalhadas são: Tamanho Médio do Sistema (MSS), Tamanho Médio da Fila (MQS), Tempo Médio da Fila (MQT), Probabilidade de não-embarcar no primeiro veículo (PNE), Vazão e Utilização. Para a análise, essas métricas podem ser avaliadas matematicamente por meio do modelo, como será visto abaixo.

##### 5.1.4.1 Métrica do Tamanho Médio do Sistema - MSS

A primeira métrica apresentada é o MSS, que representa o número de pessoas no Sistema BRT, sendo consideradas as que estão no veículo ou aguardando na estação. Para a avaliação, a Equação 5.4 foi usada.

$$\begin{aligned}
 E[MSS_{BRT}] = & \sum_{i=1}^n (\#Central\_Station_i) p(\#Central\_Station_i) + \\
 & \sum_{i=1}^n (\#Q\_CS_i) p(\#Q\_CS_i) + \sum_{i=1}^n (\#P3\_1_i) p(\#P3\_1_i) + \sum_{i=1}^n (\#P7\_1_i) p(\#P7\_1_i) + \\
 & \sum_{i=1}^n (\#Ppas\_i\_Bus_i) p(\#Ppas\_i\_Bus_i),
 \end{aligned} \tag{5.4}$$

O MSS é descrito como o valor esperado do MSS<sub>BRT</sub>, sendo calculado pela soma do número de assentos no veículo no local **#Central\_Station**, variando de 1 a **n**, dependendo

do número de veículos na estação, multiplicado pela probabilidade de  $\#Central\_Station$ , mais o somatório dos lugares que podem ter fila multiplicada pela probabilidade de cada lugar, sendo assim, representado pela fila na estação ou o passageiro no veículo. Assim,  $\#Q1\_CS$  e  $\#P3\_1$  representam a fila na estação, enquanto  $\#P7\_1$  e  $\#Ppas\_i\_Bus$  representam que o passageiro está no veículo.

#### 5.1.4.2 Métrica do Tamanho Médio da Fila - MQS

O MQS representa o número de passageiros que esperam para acessar o veículo na estação. Nesta tese, para o Modelo SPN, ele é avaliado pela Equação 5.5.

$$E[MQS\_BRT] = \sum_{i=1}^n (\#Q\_CS_i) p(\#Q\_CS_i) + \sum_{i=1}^n (\#P3\_1_i) p(\#P3\_1_i) + \dots, \quad (5.5)$$

O MQS é descrito como o valor esperado de  $MQS\_BRT$ , sendo calculado pelo somatório dos tokens nos Locais na Estação que gerará a fila, multiplicada pela probabilidade deste local, adicionando aos somatórios de todos os lugares que representam a fila da estação. O valor da estação  $i$  varia de 1 a  $n$ , o que representa o máximo de pessoas em cada estação, no caso do modelo descrito, o valor máximo de 300 pessoas.

Assim,  $\sum_{i=1}^n (\#Q\_CS_i) p(\#Q\_CS_i)$  representa a soma do Lugar  $\#Q\_CS$  multiplicada pela probabilidade deste lugar, que será somado a  $\sum_{i=1}^n (\#P3\_1_i) p(\#P3\_1_i)$ , que representa o próximo lugar, ou seja, a próxima estação, onde a fila é formada; e continuará a ser adicionado a cada estação nos lugares que podem gerar uma fila até a Estação Final, onde não há fila para embarque, já que esta estação é apenas para desembarques.

#### 5.1.4.3 Métrica do Tempo Médio de Fila - MQT

O MQT representa o tempo médio que cada passageiro esperará para embarcar no veículo. No modelo SPN, ele pode ser calculado pela equação 5.6.

$$E[MQT\_BRT] = \left[ \sum_{i=1}^n (\#Q\_CS_i) p(\#Q\_CS_i) \right] \times T\_IB + \left[ \sum_{i=1}^n (\#P3\_1_i) p(\#P3\_1_i) \right] \times TE2\_1 + \dots, \quad (5.6)$$

O Tempo Médio de Fila é calculado a partir do Valor Esperado de  $MQT\_BRT$ , dado pelo somatório dos locais onde a formação da fila pode ocorrer, multiplicada pela probabilidade desse local e pelo tempo de acesso ao veículo. Ou seja,  $\sum_{i=1}^n (\#Q\_CS_i)$  representa o local que gera a fila;  $p(\#Q\_CS\_i)$ , a probabilidade do lugar; e  $T\_IB$  o tempo para acessar o veículo. Este fator deve ser adicionado a cada estação onde é possível gerar uma fila.

#### 5.1.4.4 Probabilidade de o Usuário perder o Ônibus (Probabilidade de não-embarcar no primeiro veículo (PNE))

A probabilidade de o usuário perder o ônibus está relacionada à possibilidade de que o passageiro não possa entrar no veículo quando chegar à estação. Assim, a probabilidade do usuário não acessar o veículo será computada para cada estação. Esta probabilidade é calculada, neste modelo, pelas Equações 5.7 e 5.8.

$$\text{Probabilidade de não\_embarcar no primeiro veículo [Central\_Station]} = P\{(\#B\_P\_SC = 0) \wedge (\#Q\_CS \geq 1)\} \quad (5.7)$$

A equação 5.7 representa que na Estação Central o passageiro não pôde acessar o veículo, sendo calculado pela probabilidade de o Local  $\#B\_P\_SC$  ser 0, ou seja, não ter vaga no ônibus ( $\#B\_P\_SC=0$ ) e que há passageiros esperando na fila ( $\#Q\_CS \geq 1$ ).

$$\text{Probabilidade de não\_embarcar no primeiro veículo [Station\_1]} = P\{(\#P5\_1 = 0) \wedge (\#P3\_1 \geq 1)\} \quad (5.8)$$

A equação 5.8 representa a probabilidade de que em uma estação intermediária o passageiro não possa acessar o veículo, sendo calculado pela probabilidade de que um determinado local, neste caso,  $\#P5\_1$ , esteja vazio ( $\#P5\_1=0$ ), ou seja, não tenha vagas disponíveis no veículo, no entanto, existem passageiros esperando na fila ( $\#P3\_1 \geq 1$ ). Se houver outras estações, o procedimento para o cálculo será o mesmo, exceto para a Estação Final, que não haverá probabilidade de não embarque.

#### 5.1.4.5 Métrica de Utilização

A Utilização representa o nível de ocupação do Sistema, ou seja, o valor percentual de uso do sistema em relação ao tamanho deste. Nesta tese, consideramos a Utilização para cada estação do Sistema, assim, para o Modelo SPN, a Utilização pode ser calculada a cada estação, por determinada equação. Neste caso, na Estação Central utilizou-se a Equação 5.9.

$$U_{SC} = \frac{\sum_{i=1}^n (\#Central\_Station_i) p(\#Central\_Station_i)}{(\sum_{i=1}^n (\#Central\_Station_i) p(\#Central\_Station_i)) + \dots \left( \sum_{i=1}^n (\#B\_P\_SC_i) p(\#B\_P\_SC_i) \right)}, \quad (5.9)$$

A Equação 5.9 denota que a utilização na Estação Central é concebida pelo valor esperado do Lugar  $\#Central\_Station$ , que é dado por  $\sum_{i=1}^n (\#Central\_Station_i) p(\#Central\_Station_i)$  dividido pelo valor esperado do mesmo lugar ( $\#Central\_Station$ ), mais o valor esperado do Lugar que representa a quantidade de vagas restantes no veículo



na Estação Central,  $\#B\_P\_SC$  ( $\sum_{i=1}^n (\#B\_P\_SC_i)p(\#B\_P\_SC_i)$ ). Assim, a utilização é dada pela divisão da quantidade de pessoas no veículo pela quantidade de pessoas no veículo mais a quantidade de vagas restantes.

Seguindo este raciocínio, para a Estação 1, a Utilização é dada pela Equação 5.10.

$$U_{S1} = \frac{\sum_{i=1}^n (\#P7\_1_i)p(\#P7\_1_i)}{(\sum_{i=1}^n (\#P7\_1_i)p(\#P7\_1_i)) + (\sum_{i=1}^n (\#P5\_1_i)p(\#P5\_1_i))}, \quad (5.10)$$

Na Equação 5.10, tem-se o Lugar  $\#P7\_1$  como a quantidade de pessoas no veículo, enquanto o Lugar  $\#P5\_1$ , a quantidade de vagas disponíveis; assim, a utilização é dada pelo valor esperado de  $\#P7\_1$  ( $\sum_{i=1}^n (\#P7\_1_i)$ ) dividido pela soma do valor esperado de  $\#P7\_1$  ( $\sum_{i=1}^n (\#P7\_1_i)$ ) mais o valor esperado de  $\#P5\_1$  ( $\sum_{i=1}^n (\#P5\_1_i)p(\#P5\_1_i)$ ).

#### 5.1.4.6 Métrica de Vazão

Para o cálculo da vazão, foi considerada individualmente cada estação, dessa maneira, a vazão representa a quantidade de passageiros que se deslocam de uma estação a outra em dado período de tempo.

Para o modelo proposto, na Estação Central, a vazão é dada pela Equação 5.11.

$$TH\_SC = \sum_{i=1}^n (\#Central\_Station_i)p(\#Central\_Station_i) \times \frac{1}{T\_JSCTF}, \quad (5.11)$$

onde, o valor esperado do Lugar  $\#Central\_Station$  ( $\sum_{i=1}^n (\#Central\_Station_i)p(\#Central\_Station_i)$ ), ou seja, a quantidade de pessoas no veículo, é multiplicada pelo inverso do tempo de deslocamento de uma estação a outra, ou seja, o tempo associado à transição  $T\_JSCTF$ . Assim, é obtida a vazão da Estação Central.

Para a Estação 1, tem-se, também, o processo do cálculo equivalente ao cálculo da vazão apresentado, onde se multiplica o valor esperado no lugar  $\#P7\_1$  pelo inverso do tempo associado à transição que liga a Estação 1 à Estação 2 ( $TE3\_1$ ), apresentado na Equação 5.12. Este raciocínio será utilizado para o cálculo da vazão em cada estação, à exceção da Estação Final, que representa o encerramento da rota e não há cômputo de passageiros para próximos destinos.

$$TH\_SC = \sum_{i=1}^n (\#P7\_1_i)p(\#P7\_1_i) \times \frac{1}{TE3\_1}, \quad (5.12)$$

#### 5.1.4.7 Métricas de Entrada no @Mercury

Para a avaliação do Modelo, foi utilizado o software @Mercury, que utiliza linguagem própria para avaliação das métricas. Assim, a Tabela 9 apresenta as métricas usadas pelo @Mercury para avaliar o Modelo SPN descrito.

Mettrica	Expressão
MSS	$(E\{\#Central\_Station\}) + (E\{\#Q\_CS\}) + (E\{\#P3\_1\}) + (E\{\#P7\_1\}) + (E\{\#Ppas\_i\_Bus\})$
MQS	$(E\{\#Q\_CS\}) + (E\{\#P3\_1\})$
MQT	$(E\{\#Q\_CS\} * T\_IB) + (E\{\#P3\_1\} * TE2\_1)$
Probabilidade de não embarque Estação Central	$P\{(\#B\_P\_SC=0) \text{ AND } (\#Q\_CS >= 1)\}$
Probabilidade de não embarque Estação 1	$P\{(\#P5\_1=0) \text{ AND } (\#P3\_1 >= 1)\}$
Utilização Estação Central	$E\{\#Station\_Central\} / ((E\{\#Station\_Central\}) + (E\{\#B\_P\_SC\}))$
Utilização Estação 1	$E\{\#P7\_1\} / ((E\{\#P7\_1\}) + (E\{\#P5\_1\}))$
Vazão Estação Central	$E\{\#Station\_Central\} * (1/T\_JSCTF)$
Vazão Estação 1	$E\{\#P7\_1\} * (1/TE3\_1)$

Tabela 9 – Métricas para avaliação do Modelo SPN.

## 5.2 Modelos de Confiabilidade e Disponibilidade

A dependabilidade envolve um conjunto de atributos como: a confiabilidade, a disponibilidade, a segurança, a capacidade de sobrevivência e a manutenibilidade (AVIZIENIS et al., 2001), que visam o fornecimento de um conjunto de serviços confiáveis possíveis de serem observados por agentes externos (MACIEL et al., 2011). Nesta tese, serão trabalhados dois atributos de dependabilidade: confiabilidade e disponibilidade.

A confiabilidade permitirá identificar o tempo para a ocorrência do defeito em STUMPs, identificando quais fatores devem ser observados para que o sistema permaneça por mais tempo sem reparos. Já a disponibilidade permitirá identificar a continuidade do provimento do serviço do STUMP, o que impacta diretamente na perspectiva do usuário que perceberá que sempre que precisar terá acesso ao Sistema.

Considerando que uma das técnicas mais utilizadas para estudos de confiabilidade e disponibilidade é a modelagem em RBD e que estes fornecem uma estrutura lógica de blocos conectados que permitem compreender o funcionamento dos componentes e do sistema (KUO; ZUO, 2003), o RBD foi revelado como a melhor escolha para o estudos destes atributos de um STUMP. Sob esta perspectiva, foram construídos três modelos RBD's.

O primeiro modelo representa o STUMP integralmente, vislumbrado na Figura 25, onde são considerados o componente Veículo e Infraestrutura (IE). Para analisar o subsistema IE, foram considerados dois aspectos que, segundo a ótica deste trabalho, podem interferir na confiabilidade e disponibilidade do sistema, o caminho e as estações, sendo o segundo modelo RBD. Ainda sob esta perspectiva, para uma análise da estação, foi criado um modelo mais restrito, o terceiro RBD, que considera que para que haja o funcionamento da estação, os mecanismos de entrada e saída devem estar funcionando. Os modelos RBDs serão detalhados mais adiante. O modo operacional do sistema obedece à seguinte regra:

- O sistema está disponível se o subsistema de IE e o subsistema de veículo estiverem disponíveis.



Figura 25 – Modelo RBD para avaliação de STUMP.

A partir do modelo apresentado na Figura 25, pode-se calcular o MTTF, a Disponibilidade (A) e a Confiabilidade do Sistema (R). Para tanto, são apresentadas as equações que os definem.

A confiabilidade do Sistema é dada pela Equação 5.13,

$$R_{STUMP}(t) = R_{IE}(t) \times R_{veiculo}(t), \quad (5.13)$$

onde  $R_{IE}(t)$  refere-se à confiabilidade do bloco IE num tempo  $t$  e  $R_{veiculo}$  refere-se à confiabilidade do bloco veículo num tempo  $t$ , reiterando que a confiabilidade pode ser calculada pela Equação 2.1.

Assumimos que os tempos de falhas são exponencialmente distribuídos, ou seja, não consideramos o envelhecimento do sistema, embora se saiba que possa de fato impactar no seu funcionamento, mas não foi utilizado como foco deste trabalho, podendo ser utilizado em trabalhos futuros. Ainda que sejam consideradas taxas de falhas crescentes, o modelo desenvolvido pode ser considerado válido, dada a possibilidade de ser resolvido por aproximação de fases por distribuições Hipo-Exponencial ou Erlang.

$R_{IE}(t)$   $R_{veiculo}(t)$  tem taxas  $\lambda_{IE}$  e  $\lambda_V$ , então,

$$R_s(t) = R_{IE}(t) \times R_v(t) = e^{-\lambda_{IE}t} \times e^{-\lambda_v t} = e^{-(\lambda_{IE} + \lambda_v)t},$$

$$F_s(t) = 1 - R_s(t) = 1 - e^{-(\lambda_{IE} + \lambda_v)t},$$

$$f_s(t) = -\frac{\partial R(t)}{\partial t} = -(\lambda_{IE} + \lambda_V)e^{-(\lambda_{IE} + \lambda_v)t},$$

$$\lambda(t) = -\frac{\partial R(t)}{\partial t} \times \frac{1}{R(t)} = -\lambda_{IE} + \lambda_V,$$

$$MTTF = \frac{1}{\lambda_{IE} + \lambda_V}.$$

Para o cálculo da Disponibilidade, tem-se a Equação 5.14,

$$A_{STUMP} = A_{IE} \times A_{veiculo}, \quad (5.14)$$

onde  $A_{IE}$  refere-se à disponibilidade do bloco IE e  $A_{veiculo}$  refere-se à disponibilidade do bloco veículo, reiterando que a disponibilidade pode ser calculada pela Equação 2.3. Assim, tem-se que,

$$A = \frac{\mu}{\mu + \lambda},$$

$$A_{STUMP} = A_{IE} \times A_V,$$

$$A_{STUMP} = \left( \frac{\mu_{IE}}{\mu_{IE} + \lambda_{IE}} \right) + \left( \frac{\mu_V}{\mu_V + \lambda_V} \right).$$

O modelo do subsistema de IE é representado pelo RBD da Figura 26a. Este subsistema é composto por um caminho e as estações ( $Estacao2/n$ ). O modo operacional deste modelo consiste em: o caminho deve estar livre para o trânsito do veículo e pelo menos duas estações devem estar em operação. Justifica-se a escolha de funcionamento de duas estações, não considerando em que ponto geográfico esteja, pois acredita-se que minimamente o

veículo deve sair de um ponto (estação) e ir a outro ponto (estação), o que, na concepção adotada por este trabalho caracteriza o funcionamento do sistema.

Já quando se busca a confiabilidade deste subsistema, tem-se a Equação 5.15,

$$R_{IE}(t) = R_{Caminho}(t) \times R_{Estacao2/n}(t), \quad (5.15)$$

onde,  $R_{Caminho}(t)$  refere-se à confiabilidade do bloco Caminho no tempo  $t$ , que pode ser obtida pela Equação 2.1, e  $R_{Estacao2/n}(t)$  refere-se à confiabilidade do bloco Estação em dado tempo  $t$ , que pode ser obtido pela Equação 5.16.

$$R_{i_{oon}}(t) = \sum_{i \geq 2}^n R_{estacao}(t)^i \times (1 - R_{estacao}(t))^{n-i} \quad (5.16)$$

Para este subsistema, a disponibilidade pode ser dada pela Equação 5.17.

$$A_{IE} = A_{Caminho} \times A_{Estacao2/n}, \quad (5.17)$$

onde  $A_{Caminho}$  refere-se à disponibilidade do bloco Caminho e  $A_{Estacao2/n}$  refere-se à disponibilidade do bloco Estação.

Na composição do modelo IE, percebeu-se a necessidade de representar e analisar o funcionamento das estações, uma vez que não há dados históricos ou literatura publicada que referencie o processo de defeito de estações STUMP. Assim, investigou-se que fatores teria impacto sobre defeitos neste subsistema, sendo identificado que, para STUMP estar operante, seria necessário que as estações fossem capazes de permitir o acesso do usuário à própria estação e ao veículo, ou seja, o mecanismo de entrada e saída do Sistema. Assim, o tempo de falha de portas automáticas foi utilizado como referência para avaliar o funcionamento do sistema, considerando que, pelo menos, um acesso para entrada e saída nos veículos deve estar funcionando; e, pelo menos, um acesso para a entrada e saída das estações, deve estar operacional, sendo representadas, respectivamente, por um bloco  $K_{out-of-N}1/n$  e outro bloco  $K_{out-of-N}1/n$ . Como pode ser visto na Figura 26b.

Para o cálculo da confiabilidade da estação, tem-se a Equação 5.18.

$$R_{Estacao}(t) = R_{Acesso_{veiculo}1/n}(t) \times R_{Acesso_{Estacao}1/n}(t), \quad (5.18)$$

onde para os blocos  $R_{Acesso_{veiculo}1/n}(t)$  e  $R_{Acesso_{Estacao}1/n}(t)$  a confiabilidade é dada pela Equação 5.19,

$$R_{1ooN}(t) = R_{(SP)}(t) = 1 - (1 - e^{-\lambda t})^n, \quad (5.19)$$

dado que ambos os blocos são  $K_{out-of-N}1/n$  e que um  $K_{out-of-N}1/n$  representa um sistema em paralelo aleatório.

O MTTF pode ser dado pela Equação 5.20,

$$MTTF = \int_0^{\infty} R(t) \times dt = \int_0^{\infty} [1 - (1 - e^{-\lambda t})^n] dt = \frac{1}{\lambda} \sum_{i=1}^n \frac{1}{i}. \quad (5.20)$$

Para este subsistema a disponibilidade pode ser dada pela Equação 5.21,

$$A_{Estacao} = A_{Acesso_{veiculo}} \times A_{Acesso_{Estacao}}, \quad (5.21)$$

onde  $A_{Acesso_{veiculo}}$  representa a disponibilidade do acesso ao veículo e  $A_{Acesso_{Estacao}}$  a disponibilidade do acesso à estação.

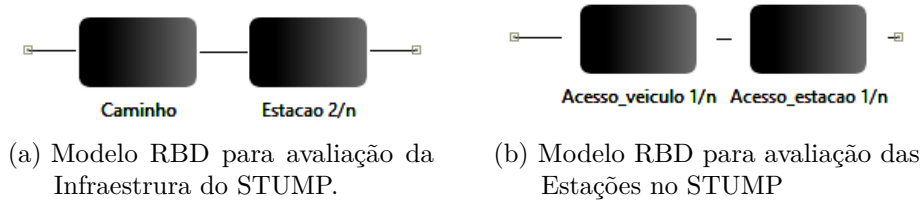


Figura 26 – Modelo RBD para Dependabilidade de STUMPs

A partir dos modelos apresentados, além da obtenção das métricas de disponibilidade e confiabilidade, será extraído o MTTF para composição do modelo de Performabilidade a ser apresentado nesta tese.

### 5.3 Modelos de Performabilidade

Considerando que a Performabilidade parte do pressuposto de um modelo que permita a definição, a formulação, a avaliação de uma medida de desempenho-confiabilidade, refere-se à eficácia do sistema a partir da perspectiva de que este possua desempenho e dependabilidade adequadas (MEYER, 1980). Esta subseção visa mostrar o impacto que as falhas podem acarretar ao desempenho do STUMP.

De acordo com (MEYER, 1980), a modelagem da performabilidade parte de uma estrutura de modelagem hierárquica para formular a função de capacidade, onde a esta é utilizada, por sua vez, para avaliar a performabilidade. Na estrutura desta tese, como apresentada, foram construídos modelos de desempenho e confiabilidade. Destes modelos, foram extraídos os dados para referendar o modelo de dependabilidade.

Assim, do ponto de vista de tempo médio de falha (MTTF) e desempenho, a fim de analisar o impacto da falha no desempenho do sistema, um modelo CTMC foi construído para avaliar a performabilidade. Este modelo representa a composição dos modelos CTMC de probabilidade de alcance do destino e os modelos RBD de confiabilidade e disponibilidade de onde se extraiu o MTTF, sendo representado pela Figura 27.

Neste modelo, os estados  $Estacao\_Central$ ,  $Estacao\_1$ ,  $Estacao\_n$  e  $Estacao\_Final$  representam que o sistema está operacional. A taxa  $\alpha_{tt}$  representa o tempo de deslocamento entre a  $Estacao\_Central$  e  $Estacao\_1$ , assim como a taxa  $\alpha_{ttw}$ , aponta o tempo de deslocamento entre as estações, considerando o tempo de espera entre entrada e saída de passageiros do veículo. A taxa  $\lambda_{Sist}$  representa a possibilidade de falha do sistema,

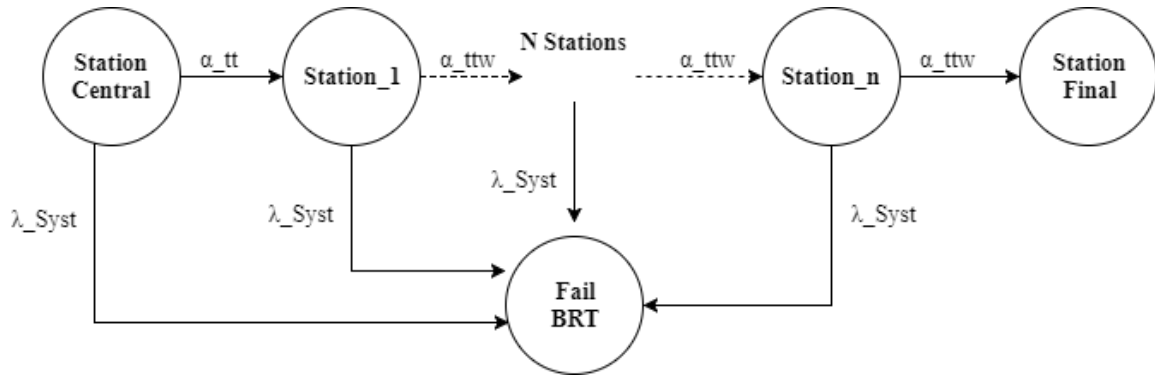


Figura 27 – Modelo CTMC para avaliação de Performabilidade no STUMP

considerando os modelos RBD's apresentados. O acontecimento da falha leva ao estado *Falha\_do\_sistema*, no qual, neste estado, o sistema é considerado inoperante. Este já que tem por objetivo mostrar o impacto da falha no Sistema, considerando a confiabilidade do modelo.

Para avaliação do modelo, foi utilizado o software @Mercury, que indicou a probabilidade do Estado *Falha\_do\_sistema*. Como o modelo possui estados absorventes, foi realizada uma avaliação transiente desse. A probabilidade do sistema se manter operante foi definida pela Equação 5.22, onde a taxa de sobrevivência da falha é 1 menos a probabilidade da falha.

$$Perf_{BRT}(t) = 1 - P \{Fail\_BRT(t)\} \tag{5.22}$$

O Modelo pode ser resolvido por um sistema de Equações 5.23, conforme apresentado abaixo:

$$\left\{ \begin{array}{l} \Pi(t) = (\pi_i(t)), \\ \sum_{i=1}^n \Pi_i(t) = 1, \\ \Pi(0) = \Pi_{Sc}(0) = 1, \\ \frac{\partial \Pi(t)}{\partial t} = \Pi(t)Q, \end{array} \right. \tag{5.23}$$

onde,  $\Pi(0) = \Pi_{Sc}(0) = 1$  representa que no estado inicial a probabilidade do estado Station\_Central é 1. E a obtenção da probabilidade de cada estado ao longo do tempo,  $(\frac{\partial \Pi(t)}{\partial t} = \Pi(t)Q)$ , é dada pelo produto das derivadas da probabilidade sobre o tempo e a matriz Q.

Considerando os estados absorventes **Fail\_BRT** e **Station\_Final**, para entender as probabilidades, pode-se avaliar a Figura 28, a qual representa que no estado estacionário a soma das probabilidades dos estados absorventes será 1.

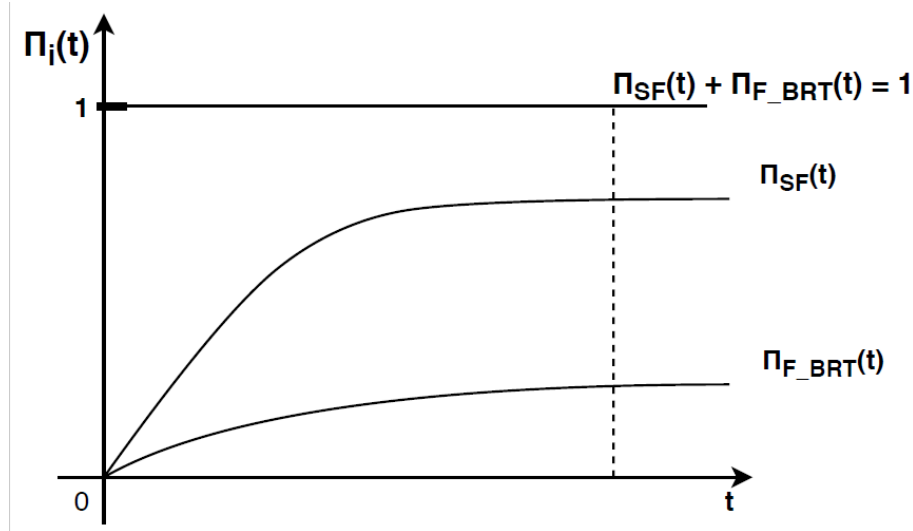


Figura 28 – Probabilidades associadas aos estados absorventes.

Na Figura 27, é possível verificar que o modelo faz a avaliação para uma viagem, ou seja, no momento que alcança a Estação Final, também se encerra o processo de avaliação. Dessa maneira, para analisar a possibilidade de o sistema falhar em um período de tempo maior e de maneira continuada, foi incluído o retorno do veículo à via ao alcançar a estação final, fazendo a viagem de volta para a estação central. Assim, é gerado um ciclo de viagens, que só será interrompido pelo defeito do sistema, como pode ser visto na Figura 29.

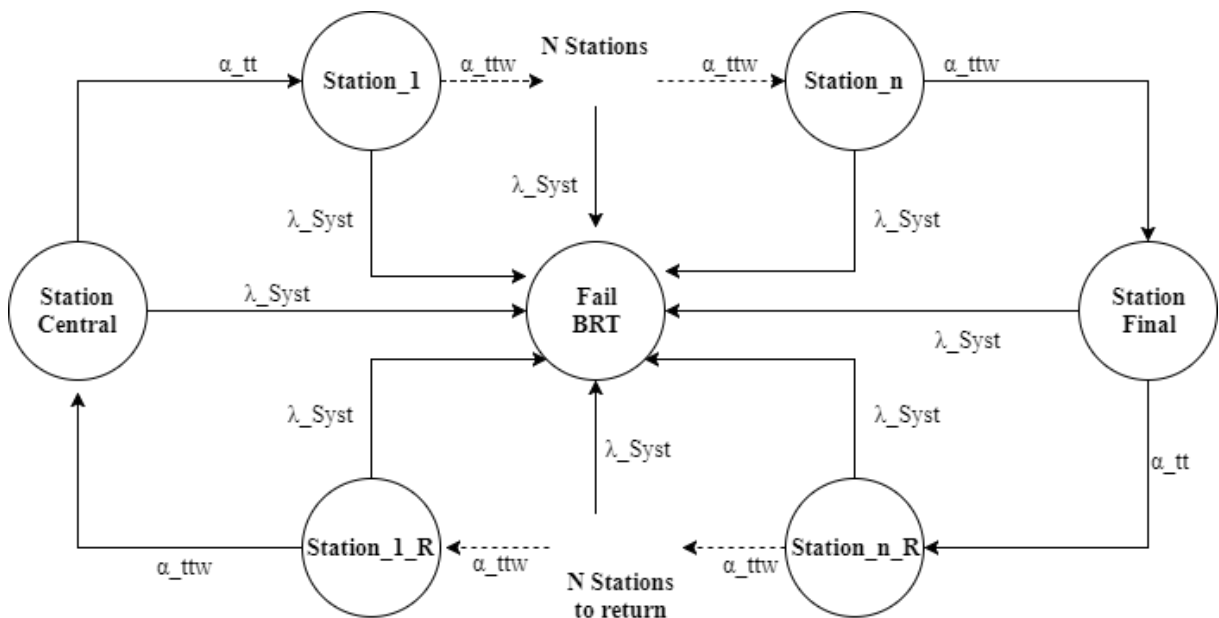


Figura 29 – Modelo CTMT para avaliação de Performabilidade do Sistema de BRT, considerando viagens contínuas.

Este modelo foi avaliado pelo @Mercury, considerando a Equação 5.22, também avaliado pelo Sistema de Equações 5.23.



## 5.4 Considerações Finais

Este capítulo apresentou as principais contribuições desta tese, os modelos para avaliação de Sistemas de Transporte de Alta Prioridade, bem como as principais métricas a serem avaliadas. Descreveu-se, inicialmente, um modelo de alto nível para apresentar o funcionamento de STUMP. A partir desta perspectiva, foram construídos os modelos. O primeiro, um modelo CTMC, visava avaliar a probabilidade de alcance de destino e o tempo médio para esse alcance, sendo base para um estudo de desempenho do Sistema. O segundo modelo hierárquico que utilizou dados de RBDs sobre confiabilidade, disponibilidade e tempo de falha, para compor uma CTMC que avalia a performabilidade dos Sistemas. O Terceiro modelo, uma SPN para avaliar o desempenho do sistema, no entanto, englobando a perspectiva do usuário do sistema às avaliações iniciais. É válido ressaltar, que todo o estudo parte da composição do problema inicial, que vai avançando em direção de resultados mais aprofundados, os quais entendemos serem o objetivo de uma tese. Assim, destacamos a nossa contribuição na perspectiva do planejamento de sistemas, pela concepção de métricas que levam a este propósito. É relevante destacar que os métodos apresentados aqui foram aplicados com sucesso em vários estudos de caso, demonstrados no Capítulo 6.

## 6 ESTUDOS DE CASOS

Este capítulo apresenta os estudos de caso aplicados à metodologia proposta, onde foram realizadas avaliações de desempenho, disponibilidade, confiabilidade e performabilidade em cenários do Sistema BRT, escolhidos para estudar os STUMPs. Através destes Estudos de Caso, será possível avaliar, inicialmente, a possibilidade de melhoria do sistema sobre a perspectiva de tempo de alcance do destino, dado a obtenção de informações sobre a probabilidade de se alcançar em dado tempo, o que auxilia os gestores na tomada de decisões. Outro fator que torna este estudo relevante, é que, nestes estudos de caso, podemos avaliar o impacto da falha num sistema como o BRT, através do modelo de performabilidade, o que alerta para a prevenção de falhas para a manutenção do desempenho. Deste forma, estes estudos de caso, tornam-se relevantes para parte da solução que será proposta neste projeto.

Dessa maneira, os estudos de caso foram divididos em Modelos de Desempenho e Modelos de Performabilidade. Nos Modelos de Desempenho são realizados Estudos para a Distribuição de Probabilidade de Alcance de Destino, sendo realizados dois estudos de caso; Estudos para Métricas de Desempenho Estacionárias, onde serão realizados outros dois estudos de caso, assim como também é feita a Análise de Sensibilidade para esse modelo.

No modelo de Performabilidade, é realizada avaliação de disponibilidade e confiabilidade e realizados dois estudos de caso contemplando o impacto da falha no sistema.

### 6.1 Estudos de Caso para Modelos de Desempenho

Para a avaliação de desempenho, foram construídos modelos para avaliação da distribuição de probabilidade de alcance de destino e para avaliação de métricas estacionárias de avaliação de desempenho, como tempo médio de fila, tamanho médio da fila, tamanho médio do sistema, entre outras.

Para demonstrar a aplicabilidade dos modelos, foram construídos estudos de caso para avaliação. Assim, tem-se dois estudos de caso para os modelos de distribuição de probabilidade do tempo de alcance do destino, através da CTMC, onde é feita a comparação aos resultados para o modelo com utilização de SPN, onde é possível perceber a aplicabilidade destes para diagnóstico e planejamento de Sistemas BRTs.

Outros dois estudos de caso foram construídos para avaliação do Modelo SPN para métricas estacionárias, onde foi realizada, também, uma análise de sensibilidade para identificar que fatores são mais impactantes nos resultados das métricas avaliadas.

### 6.1.1 Estudos de Caso para Modelo de Distribuição de Probabilidade do Tempo de Alcance de Destino - CTMC

Para tratar a Avaliação de Desempenho do Sistema BRT, foi considerado um modelo CTMC e uma equação hipo-exponencial, que visa apresentar a probabilidade de alcance do destino em determinado tempo. Para tanto, são descritos os dois cenários avaliados.

#### 6.1.1.1 Estudo de Caso 1

No cenário 1, a arquitetura apresentada considera um Sistema BRT composto por duas estações centrais e seis estações intermediárias (veja a Figura 30). Esta arquitetura tentou representar da melhor forma o Sistema BRT, que objetiva, principalmente, fazer a ligação dos subúrbios ao centro das cidades, incluindo dentro desta perspectiva algumas paradas para que a demanda dos passageiros seja atendida.

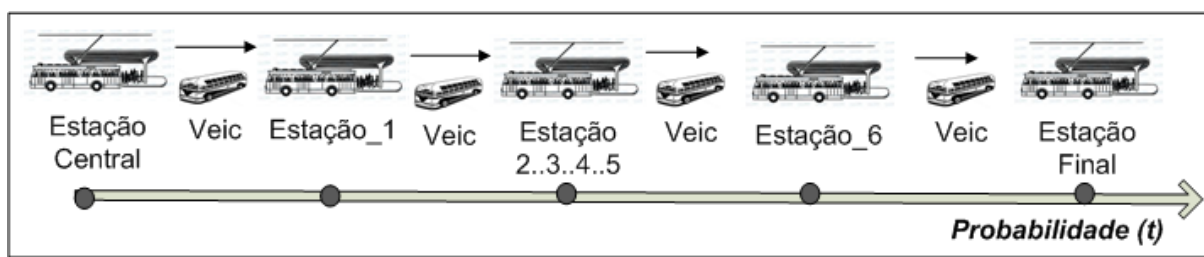


Figura 30 – Arquitetura Proposta

Para a construção do cenário foi utilizado o detalhamento de tempo de viagem descrito por (HUO et al., 2014) referente ao Sistema BRT de Changzhou-China. Os dados fornecidos por (HUO et al., 2014) são referentes ao tempo médio de viagem em determinados horários do dia, ou seja, picos de horário, que foram adaptados para o objetivo desta proposta e farão a composição para verificação da validade do modelo construído.

A Tabela 10 apresenta os tempos de viagem para cinco intervalos (picos) diferentes, em determinada rota descrita por (HUO et al., 2014). Estes picos são: *Início da Manhã*, *Pico da Manhã*, *Entre Picos*, *Pico da Tarde* e *Noite*. O *Tempo Máximo de Viagem* para cada rota é considerado como a soma do tempo de espera e tempo de viagem, onde, o *Intervalo Parado na Origem ( $H_i$ )* refere-se ao tempo de espera na estação acumulado em todo o sistema, enquanto o *Tempo de Viagem no Veículo ( $T_i$ )* é o tempo de viagem acumulada em uma rota.

Este estudo considera oito estações, ao longo de uma rota, considerando dentre estas as estações centrais inicial e final. Assim, os dados da Tabela 10 serão subdivididos visando representar o intervalo de tempo que se leva no deslocamento entre as estações nos seus respectivos picos. Assim, a Tabela 11 ilustra o conjunto de dados para cada horário de pico, onde  $\alpha_{ttw}$  representa o tempo de viagem considerando a espera, enquanto  $\alpha_{tt}$  considera somente o tempo de viagem, sem a espera, uma vez que parte da estação

Tabela 10 – Tempo de Viagem de um Sistema BRT, por (HUO et al., 2014).

Período	Intervalo Parado na Origem (Hi) min	Tempo de Viagem no Veículo (Ti) min	Tempo Máximo de Viagem (Hi + Ti) min
Início da Manhã	7,15	22,80	29,95
Pico da Manhã	1,87	21,52	23,39
Entre Picos	4,07	18,88	22,95
Pico da Tarde	5,65	17,35	23,00
Noite	5,75	21,70	27,45

central, presumindo-se que o veículo saia no horário previsto, considerando-se somente o deslocamento até à próxima estação.

Tabela 11 – Parâmetros de Entrada para cada Intervalo (Pico)

Período do Dia	Parâmetros	Tempo Médio de Espera (min)	Tempo Médio no Veículo (min)	Valor (min)
Início da Manhã	$\alpha_{tt}$	–	3,26	3,26
	$\alpha_{ttw}$ 1 to 6	1,19	3,26	4,45
Pico da Manhã	$\alpha_{tt}$	–	3,07	3,07
	$\alpha_{ttw}$ 1 to 6	0,31	3,07	3,38
Entre Picos	$\alpha_{tt}$	–	2,70	2,70
	$\alpha_{ttw}$ 1 to 6	0,68	2,70	3,38
Pico da Tarde	$\alpha_{tt}$	–	2,48	2,48
	$\alpha_{ttw}$ 1 to 6	0,94	2,48	3,42
Noite	$\alpha_{tt}$	–	3,10	3,10
	$\alpha_{ttw}$ 1 to 6	0,96	3,10	4,06

Desta forma, tomando como base o conjunto de dados obtidos a partir do trabalho de (HUO et al., 2014) e expostos na Tabela 11, foi calculada a probabilidade de chegada do veículo na estação final, em dado intervalo de tempo. A Figura 31 ilustra estas probabilidades. É possível perceber que os picos *Início da Manhã* e *Noite* apresentam os piores comportamentos em relação ao tempo para atingir o destino, ou seja, um tempo maior para que a probabilidade se torne estacionária. Este fato ocorre possivelmente porque nestes picos a demanda é menor, o que acarreta uma menor liberação de veículos na via e possível menor velocidade para o veículo, conseqüentemente, apresentando maior tempo para alcançar o destino. Os intervalos *Pico da Manhã*, *Entre Picos* e *Pico da Tarde* apresentaram comportamentos similares, refletindo que, dado o aumento da demanda, é necessário uma maior velocidade na via e, como consequência, um menor tempo para alcance do destino.

A relação entre a probabilidade e tempo de alcance de destino indica que o processo de planejamento dos Sistemas de Transporte é requisito fundamental para que se consiga reduzir o tempo de viagem e melhorar a probabilidade de alcance de destino, ou seja,

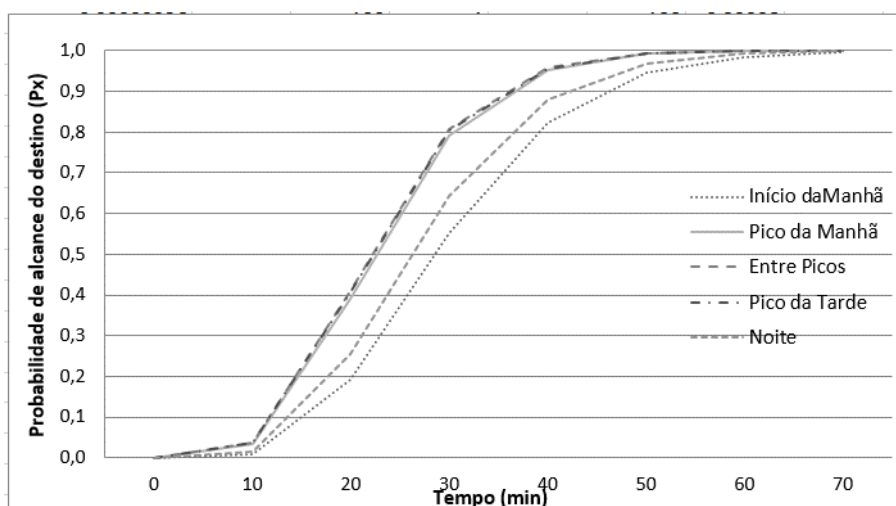
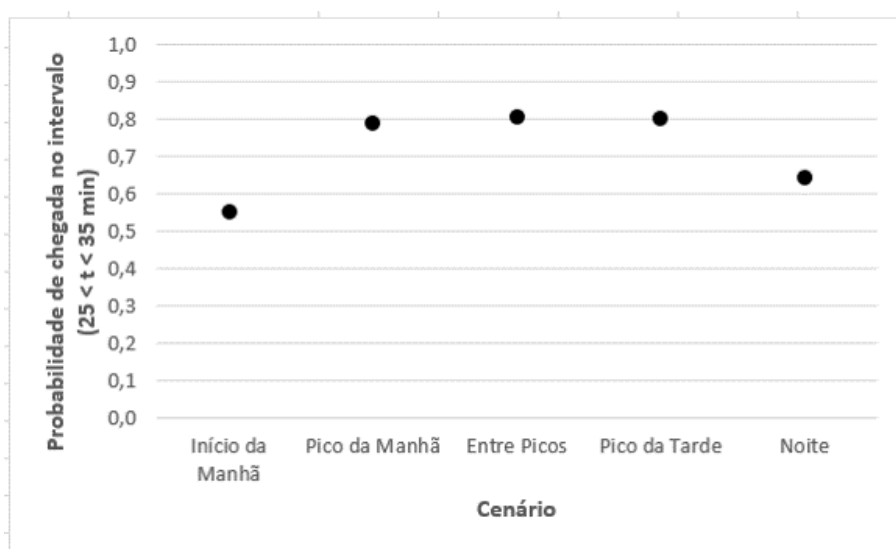


Figura 31 – Probabilidade de Alcance de Destino.

Figura 32 – Probabilidade de Alcance de Destino no Intervalo ( $25 < T < 35$ ).

oferecer garantias aos usuários que este estará no seu destino no momento planejado para isto, sem atrasos.

Outro fator que pode ser considerado no planejamento é a probabilidade de alcance de destino num intervalo de tempo médio que seja aceitável ao usuário. Nesta proposta o intervalo considerado aceitável é de 10 min, ou seja, a probabilidade do usuário chegar ao destino num tempo de 25 a 35 min. A Figura 32 mostra o comportamento dos tempos de chegada nos picos, onde no período *Entre picos*, o tempo médio é de 22,95 min. Assim, neste intervalo, existe a probabilidade de 80% do veículo chegar ao destino no intervalo estipulado. Os períodos *Pico da Manhã* e *Pico da Tarde* apresentam comportamento semelhante, com probabilidade de chegada no intervalo de 25-35 min de aproximadamente 80%. Os Picos *Início da Manhã* e *Início da Tarde* apresentam probabilidade de chegada no intervalo estudado de 60%.

Numa avaliação sobre os tempos para alcance do destino, é possível identificar o tempos mediano e de cada quartil, assim como como estes evoluem ao longo da jornada, como pode ser visto na Figura 33.

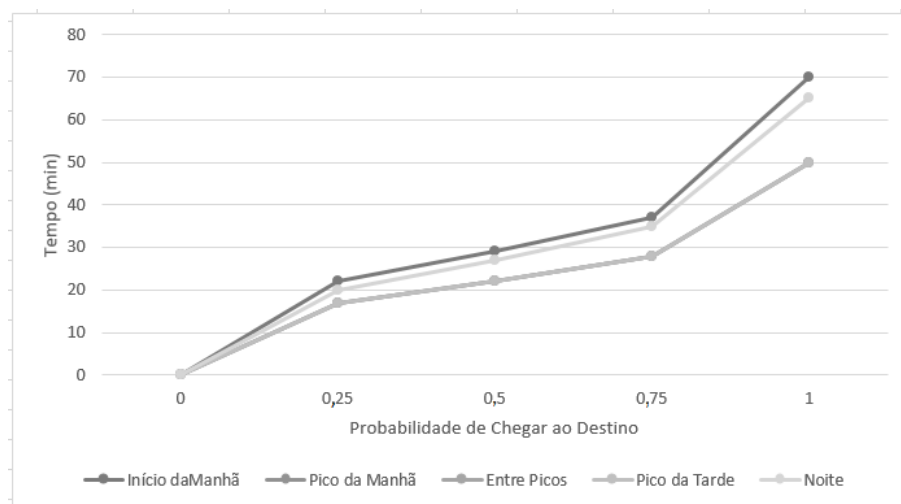


Figura 33 – Estudo dos Tempos - Caso 1.

Assim, é possível identificar que o tempo do primeiro quartil (25% das vezes é possível alcançar este tempo) varia de 17 a 23 minutos a depender do pico. O tempo mediano (50% das vezes é possível alcançar este tempo) varia de 22 a 29 dependendo do pico. Assim, em comparação ao tempo médio de absorção, este valor é bastante aproximado, ou seja, o tempo médio e o tempo mediano estão bastante próximos, corroborando com a validade do modelo.

Como forma de mostrar a validade do modelo, foi avaliado o Tempo Médio de Absorção (MTTA), onde na Tabela 12 é mostrada a comparação dos dados reais obtidos de (HUO et al., 2014) com os dados obtidos através da Equação 5.3, que representa o valor da média para uma distribuição Hipo-exponencial.

Tabela 12 – Erro Médio para o MTTA.

Período	Tempo Máximo de Viagem (Hi + Ti) min	Tempo Médio de Absorção (modelo)	Erro Médio
Início da Manhã	29,95	29,96	0,00033
Pico da Manhã	23,39	23,39	0,00005
Entre Picos	22,95	22,95	0,00011
Pico da Tarde	23,00	23,05	0,00200
Noite	27,45	27,45	0,00080

O Erro Médio dos valores descritos na Tabela 12 sugerem que o modelo é preciso, portanto, válido.

#### 6.1.1.1.1 Comparando os resultados com o Modelo SPN

Considerando como parâmetros de entrada os mesmos valores computados no Estudo de Caso 1 (6.1.1.1), foram aplicados estes valores ao modelo SPN de Distribuição de Probabilidade do Tempo de Alcance de Destino (Figura 23). Para resolução, foi utilizada a simulação transiente, com margem de erro de 10%. Assim, foram obtidos os resultados expressos na Figura 34.

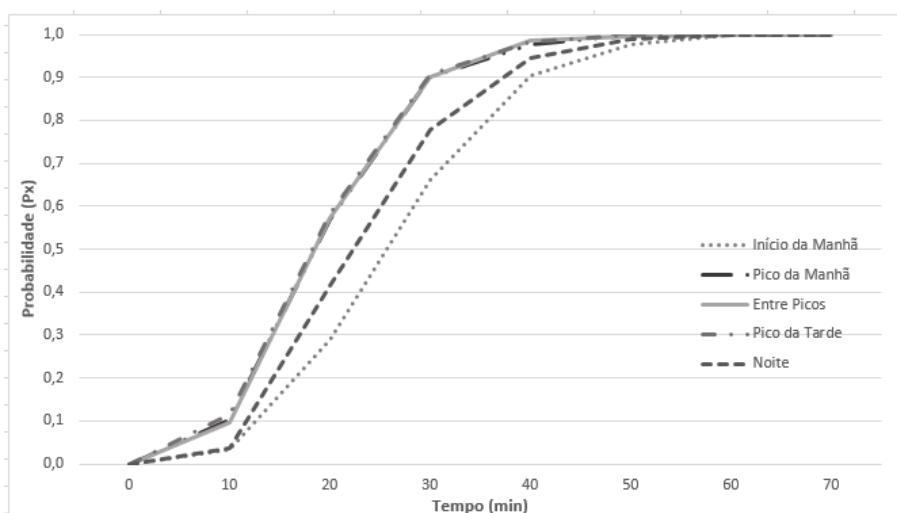


Figura 34 – Probabilidade de Alcance de Destino - Modelo SPN Caso 1.

É possível perceber que os resultados apresentados na Figura 34 apresentam comportamento similar aos apresentados na Figura 31. Considerando a margem de erro, estão dentro da mesma faixa de resultados, o que pode referendar que os modelos CTMC e SPN apresentam resultados equivalentes. Assim, quando a distribuição não for exponencial, para se obter a solução pela CTMC que requer menos recursos para avaliação, poderá ser aplicada ao modelo SPN, onde se pode ter a solução por simulação.

Comportamento semelhante ao apresentado na Figura 35, que dentro da margem de erro, apresenta comportamento similar à Figura 32.

Em ambos os casos as soluções podem ser encontradas tanto pelo Modelo SPN ou CTMC para Distribuição de Probabilidade do Tempo de Alcance de Destino.

#### 6.1.1.2 Estudo de Caso 2

Uma vez que não havia motivos para a refutação do modelo, como mostrado em 6.1.1.1, o segundo cenário foi desenvolvido baseando-se nas informações do Sistema BRT a ser implantado na cidade de Recife, Nordeste do Brasil. Nesse sistema, foram consideradas 22 estações com uma distância média de 500m entre estações, conforme apresentado por (PASSOS, 2015). A arquitetura deste modelo pode ser compreendida a partir da Figura 30, considerando uma expansão do cenário 1, onde tem-se agora uma *Estação Central* e uma *Estação Final* e outras 20 estações intermediárias.

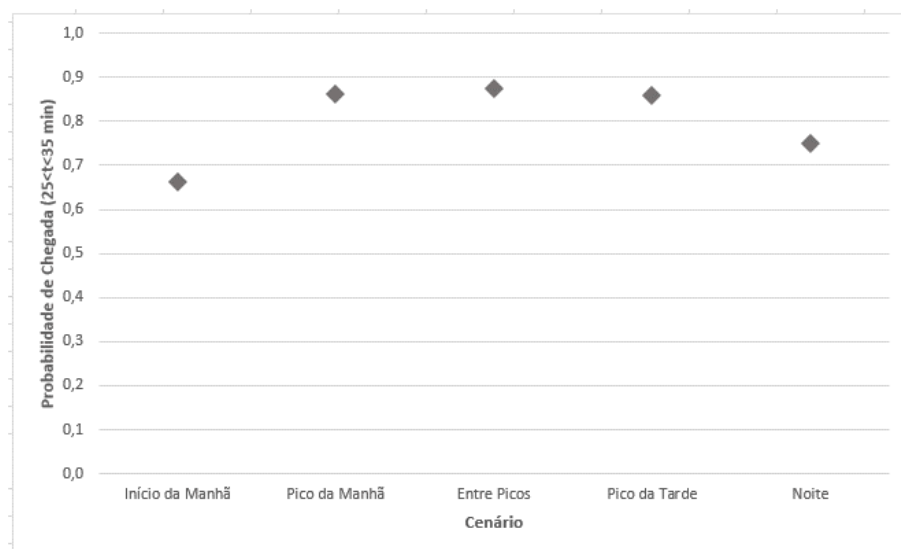


Figura 35 – Probabilidade de Alcance de Destino no Intervalo ( $25 < T < 35$ ) - Modelo SPN Caso 1.

Para a construção do cenário, levou-se em conta, também, a velocidade média do veículo apresentada por (ARIAS et al., 2008), que afirmam que um Sistema BRT eficiente têm velocidade média aproximada entre 23 e 39 Km/h. Outro fato importante considerado no cenário foi o tempo médio parado para o embarque e o desembarque de passageiros. Neste caso, o valor considerado foi de 13 segundos (0,22 min), que é o período de paragem dada para um veículo articulado de quatro portas (ARIAS et al., 2008).

A partir destes dados, foram concebidas 3 perspectivas para análise relativas à velocidade média, assim consideradas, a mínima (23 km/h), a média (31 Km/h) e máxima (39 Km/h), sendo referidas, respectivamente, como *Persp\_1*, *Persp\_2* e *Persp\_3*. Na Tabela 13, são conhecidos os valores das transições para cada Perspectiva. Como no Cenário 1, não há tempo de espera ( $\alpha_{tt}$ ) na primeira estação, tendo sido assumido que o veículo sairá no horário previsto. A taxa ( $\alpha_{ttw}$ ) considera o tempo de atraso na estação e o tempo de deslocamento entre as estações, neste caso, das estações de 1 a 21.

Tabela 13 – Parâmetros de Entrada por cenário.

Cenários	Parâmetros	Tempo Médio de Espera (min)	Tempo Médio no Veículo (min)	Valores de Entrada (min)
23 Km/h	$\alpha_{tt}$	–	1,30	1,30
	$\alpha_{ttw}$ 1to21	0,22	1,30	1,52
31 Km/h	$\alpha_{tt}$	–	0,97	0,97
	$\alpha_{ttw}$ 1to21	0,22	0,97	1,19
39 Km/h	$\alpha_{tt}$	–	0,77	0,77
	$\alpha_{ttw}$ 1to21	0,22	0,77	0,99

Neste modelo, o tempo médio para a absorção (MTTA) será medido como forma de analisar o tempo que o veículo leva para chegar à última estação. Esta é uma informação



importante para o Planejamento do Sistema, pois representa o reconhecimento do tempo aproximado de deslocamento do veículo, podendo assim minimizar atrasos. Neste caso, como pode ser visto na Tabela 14, o tempo de absorção tem influência direta sobre a probabilidade do tempo de alcance em um intervalo conhecido e é inversamente proporcional à velocidade do veículo.

Tabela 14 – Relação entre os MTTAs.

Viagem	Relação entre Viagens	Tempo Médio de Absorção (MTTA)(min)	Relação entre os MTTAs
23 Km/h	1,00	31,78	1,00
31 Km/h	1,35	24,72	0,78
39 Km/h	1,70	20,55	0,64

Na Tabela 14, pode-se perceber que, na *Persp\_1* a 23 Km/h o *MTTA* é de 31,78 min. Na *Persp\_2*, a velocidade foi aumentada em cerca de 35% (1,0 para 1,35), no entanto, a diminuição do *MTTA* é de 22% (0,78 do *MTTA* na *Persp\_1*). Na *Persp\_3*, a velocidade aumenta cerca de 70% em relação a *Persp\_1* (1,0 para 1,70), enquanto a diminuição no *MTTA* é de 36% (0,64 do *MTTA* na *Persp\_1*). Assim, pode-se notar que, embora o aumento da velocidade seja inversamente proporcional à diminuição do *MTTA*, não existe uma correlação direta. Em outras palavras, aumentando a velocidade do veículo no dobro da velocidade inicial, não significa que o veículo irá chegar na metade do tempo.

A Figura 36, que ilustra a probabilidade de alcance do destino em um determinado tempo ( $t$ ), retrata que para um intervalo de tempo de 20 min, a probabilidade aumenta de 0,03 (3%) a 23 Km/h para quase 0,5 (50%) a 39 Km/h. Isto confirma o impacto da velocidade do veículo na probabilidade de chegada. Outro ponto importante a perceber, é que em um intervalo de tempo de 40 min, a probabilidade de chegada a uma velocidade de 23 Km/h é de 0,87 (87%), enquanto que nas velocidades de 31 e 39 Km/h, a probabilidade já se apresenta em 0,99 (99%).

Se é natural supor que uma probabilidade alta para a chegada do veículo num intervalo determinado é vista como tendo um impacto positivo sobre a confiança que os usuários têm no sistema, torna-se necessário estabelecer um intervalo de chegada aceitável. Nesse caso, o intervalo definido foi de 21 a 32 min, ou seja, 9 minutos máximos para atraso, a ser apresentado na Figura 37.

Conforme os parâmetros apresentados e tal como ilustra a Figura 37, existe um forte impacto da velocidade na probabilidade de alcance de destino. Na *Persp\_1* a 23 Km/h, a probabilidade para alcance de destino no intervalo de 21 a 31 min é de 0,2 (20%), ao passo que na outra extremidade, *Persp\_3* a 39 Km/h, a probabilidade de chegada é de 0,9 (90%).

Assim, numa avaliação sobre os tempos para alcance do destino no Caso 2, é possível identificar o tempo mediano e de cada quartil e como estes evoluem ao longo da jornada, como pode se visto na Figura 38.

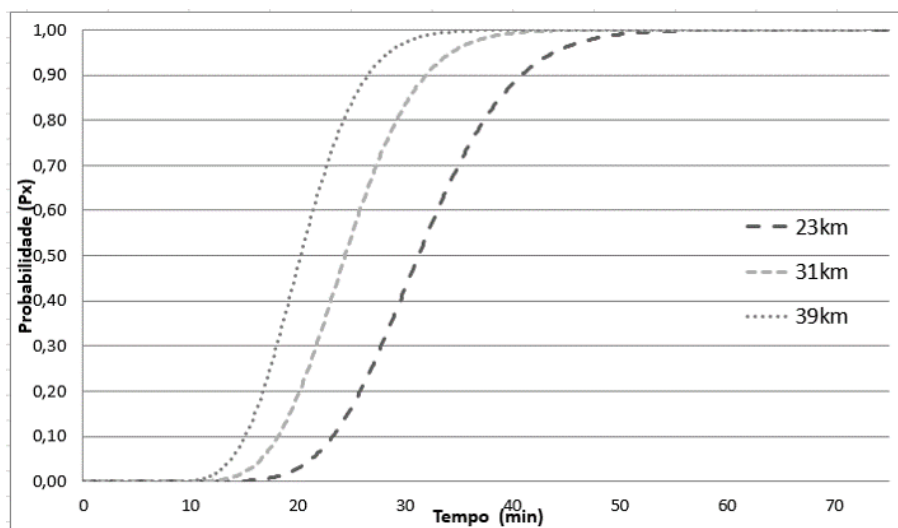


Figura 36 – Probabilidade de Alcance do Destino - Cenário 2

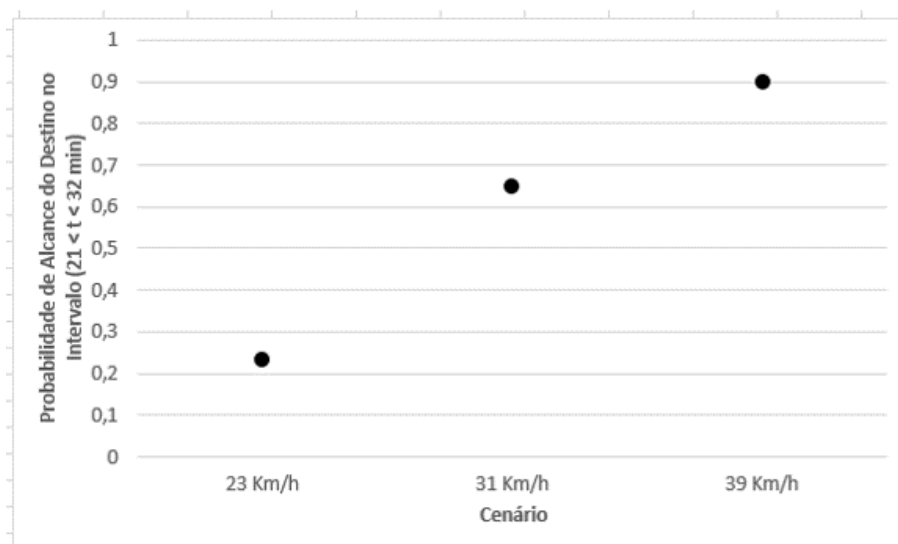


Figura 37 – Probabilidade de Alcance do Destino em determinado Intervalo - Cenário 2

A Figura 38 mostra que Interquartil é relativamente baixa, com tempos bastante aproximados, com variações de menos de 10 min. Este resultado mostra que linearmente, é possível oferecer bastante confiança ao usuário, garantindo a baixa variabilidade de tempo para alcançar o destino.

### 6.1.2 Estudos de Caso para Avaliação de Métricas Estacionárias de Desempenho - SPN

Os Sistemas BRTs têm se expandido de maneira relativamente rápida em termos de número de cidades na última década, especialmente nos países em Desenvolvimento, mas não necessariamente com a qualidade e o ritmo adequados (LINDAU; HIDALGO; LOBO, 2014). Dessa maneira são muitos os desafios impostos aos planejadores de transportes, visto que,

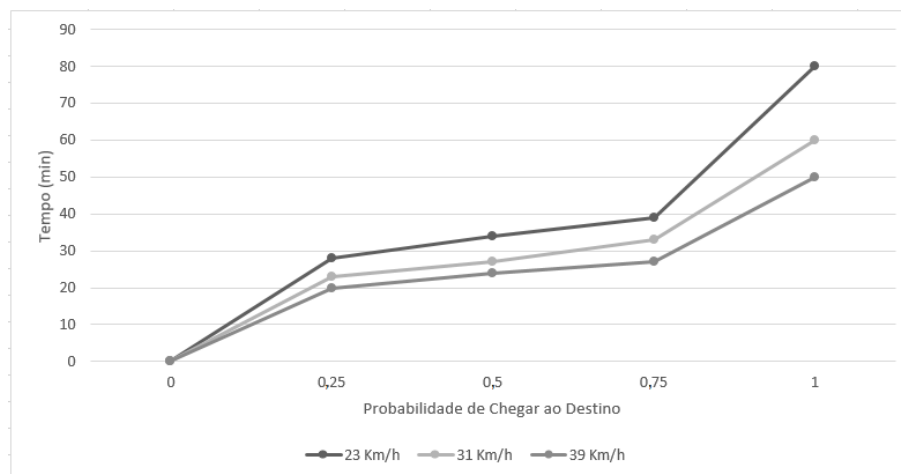


Figura 38 – Estudo dos Tempos - Caso 2.

é preciso garantir a qualidade dos serviços prestados.

Esta seção apresenta um estudo de caso para ilustrar as possibilidades de avaliações do modelo apresentado na seção 5.1.3, visando desenvolver parâmetros para a Avaliação de Desempenho de Sistemas BRTs pelos planejadores. As métricas escolhidas referem-se às que impactam diretamente no tempo de espera do passageiro e formação de fila. Assim, serão avaliadas neste artigo: Tamanho Médio do Sistema (MSS), Tamanho Médio da Fila (MQS), Tempo Médio de Fila (MQT), a Probabilidade de não embarcar no primeiro veículo que chega à estação (PNE), que, como se refere a um sistema de Transporte, representa a probabilidade do veículo estar lotado e o passageiro ter que esperar pelo próximo veículo, Utilização e Vazão do Sistema.

Para melhor compreensão, será descrito o Cenário Utilizado para Avaliação e, posteriormente, a avaliação de cada métrica utilizada.

#### 6.1.2.1 Estudo de Caso 1

O cenário escolhido para avaliação foi apresentado por (DANTAS et al., 2018) (com adaptação das propostas de (HUO et al., 2014)). A arquitetura proposta considera um sistema de BRT composto de duas estações centrais e cinco estações intermediárias (ver Figura 30, que descreve o modo de operação do sistema). Essa arquitetura foi projetada de acordo com os sistemas de BRT do mundo real, onde o principal objetivo é ligar os subúrbios ao centro da cidade, incluindo, dentro desse parâmetro, numerosas paradas na tentativa de satisfazer a demanda dos passageiros.

Os Cenários apresentados por (DANTAS et al., 2018) considera cinco horários de pico para deslocamento, no entanto, para este estudo foi considerado somente Cenário do Pico Início da Manhã, que tem tempo de deslocamento entre estações de 267 segundos.

Para mensurar a chegada de passageiros à estação, foi consultada a matriz origem/destino da Linha 40, da Cidade de Recife ((RECIFE, )), que embora tenha quantidade de estações superior ao cenário requerido, foi trabalhada considerando a divisão da rota em

trechos de quantidade de estações proporcionais para que se tivesse a mesma quantidade de estações do estudo. Neste caso, dados de cada 8 estações reais irão compor a entrada de uma estação no estudo, considerando as quantidades de entradas e saídas no sistema. Desta forma, os tempos de chegada à cada estação foram distribuídos de acordo com a Tabela 15.

Tabela 15 – Parâmetros de entrada para chegadas e desembarques nas estações.

Estação	Intervalo Médio de Chegada de Passageiros nas Estações (s)	Probabilidade de Desembarque Na Estação
SC	46	-
St_1	56	0,01
St_2	71	0,12
St_3	44	0,22
St_4	88	0,15
St_5	360	0,25
FS	-	1

Este cenário trabalha com possibilidade da variação de dois parâmetros pelos gestores, que implicam uso dos veículos na estação. Assim, pode-se variar o intervalo entre as saídas dos veículos e a quantidade de veículos disponíveis para a rota, gerando uma série de combinações possíveis para avaliação, como pode ser visto na Figura 39.

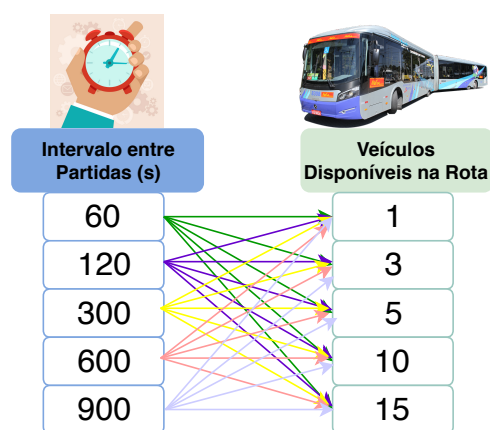


Figura 39 – Combinações de parâmetros para o cenário.

A Figura 39 mostra que para cada intervalo entre partidas (60, 120, 300, 600 e 900), serão feitas cinco avaliações considerando a possibilidade de determinada quantidade de veículos, neste caso 1, 3, 5, 10 e 15. Assim, o modelo foi avaliado 25 vezes para fazer a composição esperada como resultado do cenário.

Destacamos que, no caso de ter somente um veículo na via, os intervalos de partida foram mostrados somente como ilustração didática, para referendar que o impacto seria

muito alto em filas, já que, com esta quantidade de veículos qualquer intervalo de partida terá resultados muito semelhantes, dado que não comportaria o veículo chegar ao fim da rota. Assim, para um veículo, os resultados para intervalos diferenciados, se mostrarão sempre muito semelhantes.

Ressalta-se que, como se está trabalhando com uma quantidade reduzida de estações, limitou-se o número de vagas no veículo a 50 assentos, para aproximar o reduzido número de estações há um limite inferior de passageiros, visando minimizar a complexidade do estudo.

Esta seção busca avaliar o impacto de métricas que possam interferir diretamente no passageiro. Assim, a primeira a ser avaliada foi Tamanho Médio do Sistema, que será descrita na subseção 6.1.2.1.1 a seguir.

#### 6.1.2.1.1 Tamanho Médio do Sistema (MSS)

O Tamanho Médio do Sistema representa a quantidade de pessoas que estão no Sistema BRT, seja no veículo ou esperando na estação, ou seja, representa uma quantidade total de pessoas para cada cenário. Assim, o resultado apresentado na Figura 40, traz cada barra representando o intervalo de saída e cada conjunto de barras representando a quantidade de veículos na rota (o eixo x). No eixo y, é apresentada a quantidade de passageiros no sistema.

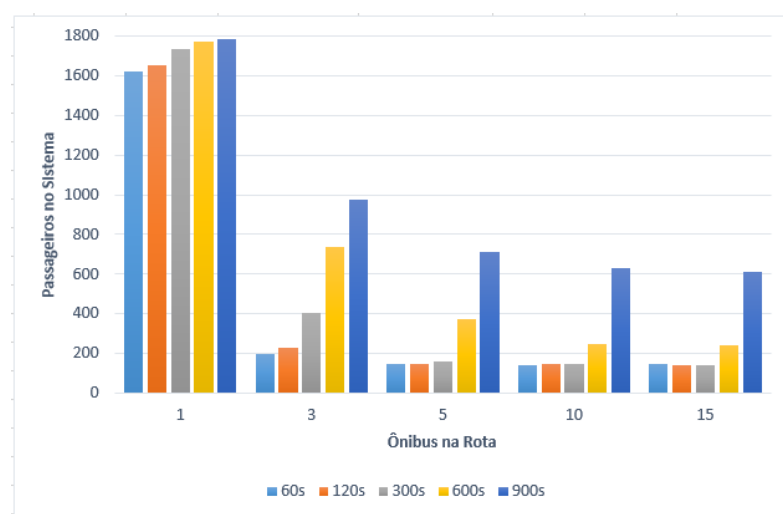


Figura 40 – Resultados para MSS.

É possível observar na Figura 40 que com apenas 1 veículo a quantidade média de passageiros no sistema atinge seus maiores picos, em todos os intervalos de partidas. Isso acontece, principalmente, pela baixa capacidade de um veículo absorver toda a demanda de passageiros, ou seja, ocorrerá a formação de filas, como será apresentado na Figura x. Quando se coloca 3 veículos na rota, verifica-se que para curtos intervalos, como 60 e 120 s, o Tamanho Médio do Sistema chega a valores aproximados de 200 pessoas, considerando

que, no estudo, cada veículo comporta 50 passageiros, tem-se 150 passageiros embarcados e 50 distribuídos nas estações aguardando para embarque.

A partir de 5 veículos na rota, o sistema praticamente assume o seu estado estacionário, ou seja, sem grandes alterações de tamanho, o que mostra que está em equilíbrio de quantidade de passageiros e veículos. São percebidas mudanças significativas somente para intervalos de saída de 600s, os quais de 5 veículos, decaem de aproximadamente 400 pessoas, para, em 10 e 15 ter somente 200 pessoas. Assim como o intervalo de partida de 900s que com 5 veículos na via tem MSS de aproximadamente 700 passageiros estaciona em aproximadamente 600 para 10 e 15 veículos.

Sob a perspectiva de planejamento a melhor relação de quantidade de veículos (considerando que quanto maior a quantidade, maior o custo) e intervalos de partidas, na configuração montada, a escolha seria 5 veículos com partidas de 300 s, que mantêm a fila em nível baixo com uma média de veículos razoável para as apresentadas.

#### 6.1.2.1.2 Tamanho Médio da Fila (MQS)

O Tamanho Médio da Fila (MQS) representa a quantidade de Passageiros aguardando para acessar o veículo. Para planejadores de sistemas de transporte, a minimização da fila se apresenta como um fator importante, pois, além de interferir na imagem daquilo que o Sistema Representa para sociedade, incute em custos para o próprio sistema e passageiros. A Figura 41 mostra a quantidade de passageiros que esperam sob cada parâmetro variado.



Figura 41 – Resultados para MQS.

Numa avaliação sobre o tamanho da fila, é possível perceber que somente um veículo na via gera um volume muito alto de esperas de passageiros, referendando o que foi destacado na Figura 40 em um cenário com alto volume de pessoas no sistema. Assim, para este, o fator tempo para saídas causa uma inferência mínima no tamanho da fila. No entanto, como se percebe na Figura 41, ao aumentar a quantidade de veículos para 3, consegue-se uma redução significativa no tamanho da fila, principalmente se considerar o intervalo de partidas de 60s, que chega a quase zerar a fila. No entanto, quando se aumenta o tempo de

partidas para 120s o tamanho da fila se aproxima de 200 pessoas, o que ainda se mostra muito bom.

Na pior variação de intervalos de partidas, que são intervalos de 900s, a fila ainda é reduzida para, aproximadamente, da metade do tamanho inicial para somente 1 veículo. Assim, o impacto do aumento de veículos na via traz consequências bastante positivas para o sistema e na diminuição da espera do passageiro.

Na figura 41, é possível perceber que, para o cenário apresentado, o sistema permanece sem alterações significativas quando se tem 5 veículos na via, onde para os intervalos de partidas postos não há grandes alterações, mesmo com a adição de mais veículos, como a inclusão de 10 e 15 veículos na rota. Dessa maneira, quando se tem 5 veículos na via, para intervalos de partida de 60s, 120s e 300s, a fila se torna praticamente inexistente.

Sob a perspectiva de planejamento, como aconteceu com Tamanho Médio do Sistema, o tamanho da frota que traria benefícios seria de 5 veículos, com a variação de intervalo de partidas de 60s, 120s ou mesmo 300s, sendo uma consideração a ser feita pelo gestor, que pode levar em conta fatores aleatórios, como o pico do dia para viabilizar melhores resultados para o Sistema.

#### 6.1.2.1.3 Tempo Médio de Fila (MQT)

O Tempo Médio de Fila representa, numa observação do sistema, o tempo médio que cada passageiro está esperando para embarcar no veículo. Assim, a relação do tempo de fila se mostra uma métrica bastante interessante para avaliação, já que impacta diretamente na imagem que o Sistema BRT pode gerar para os usuários, pois longas filas causam desconforto e transtornos para os que esperam. A Figura 42 apresenta o MQT para o cenário avaliado, apresentando os tempos médios de fila para cada configuração de tempo de partida e veículos na rota.

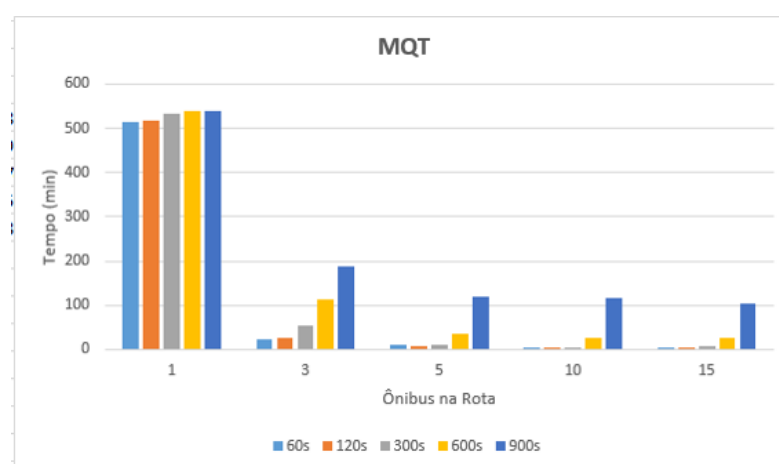


Figura 42 – Resultados para MQT.

Para o Cenário avaliado, é possível perceber que quando se tem somente um veículo na rota, o tempo de fila é bastante elevado, pois os passageiros, além de terem de esperar

o veículo fazer todo o percurso do Sistema, ainda terão que ficar esperando longos tempos nas estações mais próximas da Estação Final, pois existe a possibilidade de o veículo estar lotado, assim, em nenhuma configuração esta alternativa se apresenta como favorável.

No entanto, é possível perceber, na Figura 42, que quando se tem 3 veículos na via, o tempo de espera reduz bastante, principalmente para partidas com intervalos de 60 e 120s, que com 3 veículos já entra em estado estacionário. O Resultado para intervalos de partida de 300 s também apresenta redução significativa, o que já pode ser considerado satisfatório para o usuário.

Ainda na Figura 42, é possível perceber que para intervalos de partidas de veículos de 900s nenhuma configuração de veículos se mostra satisfatório, com tempos de espera bastante elevados. O que pode ocorrer pela pouca quantidade de estações, é que, no cenário apresentado, o tempo de fila, ainda que se tenha mais de 10 veículo na rota, apresenta tempo de espera de aproximadamente 100 minutos.

Assim, sob a perspectiva de planejamento, a possibilidade que se apresentaria mais viáveis, ou seja, maior intervalo de tempo para partidas, menor quantidade de veículos e menor tempo de espera na fila. Isso se aplicaria numa relação de 3 veículos na rota com intervalos de partida de até 300s, que teria o custo reduzido pela quantidade de veículos circulando e ainda seria possível organizar as partidas com breves intervalos de pausas de 5 minutos para partidas.

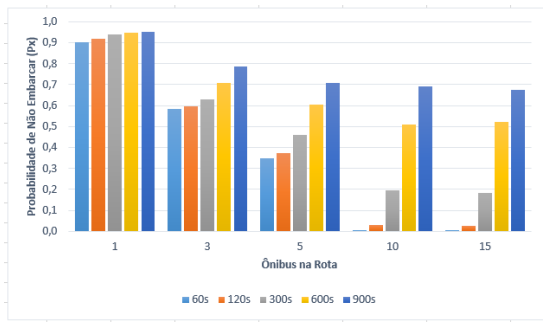
#### 6.1.2.1.4 Probabilidade de Não Embarcar no Primeiro Veículo que Chega à Estação

A Probabilidade de não embarcar no primeiro veículo em Sistemas de Transporte está relacionada à possibilidade de o passageiro não conseguir ingressar no veículo na primeira vez que este passar pela estação, ou seja, o veículo estará com a sua lotação máxima e não comportará a entrada do passageiro. Neste caso, portanto, o tempo de espera deverá ser maior, dado que o passageiro terá que aguardar a chegada de outro veículo para poder seguir sua viagem. A Probabilidade de não embarcar no primeiro veículo será melhor, para efeitos de planejamento, quando estiver mais próxima de zero, uma vez que representa uma baixa probabilidade de algum passageiro não seguir na rota no primeiro veículo que chegar à estação. Além disso, se Probabilidade de não embarcar no primeiro veículo for baixa, a espera é menor, o que melhora, conseqüentemente, a imagem do Sistema.

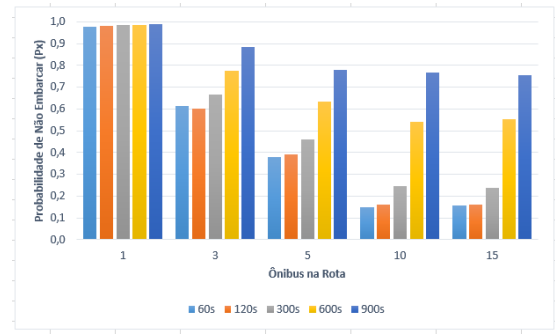
De acordo com o cenário proposto, descrito em 6.1.2.1, a análise será feita por estação, na qual em cada uma delas, existirá a possibilidade do passageiro não conseguir acessar o Sistema. Na Figura 43 são apresentados os resultados encontrados.

Na Figura 43a, ao avaliar a probabilidade de o passageiro não conseguir entrar no primeiro ônibus que para na Estação Central, é possível perceber que quando se tem apenas um veículo na rota, esta probabilidade se aproxima de 0,9. Isso implica que 90% dos passageiros terão que esperar mais de um veículo para poder conseguir fazer a sua viagem, independente do intervalo de partidas. Quando se tem 3 veículos na via, a probabilidade

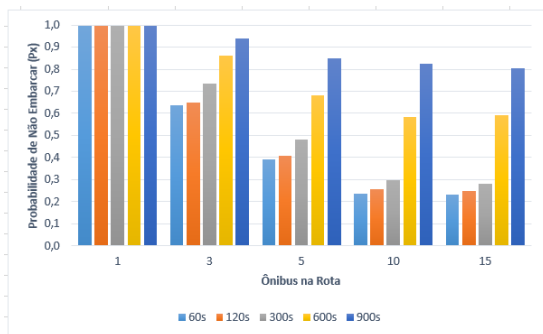




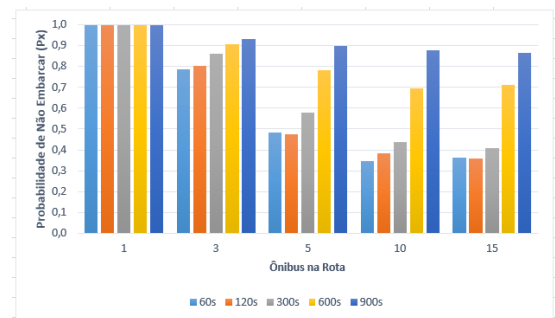
(a) Probabilidade de não embarcar no primeiro veículo Estação Central.



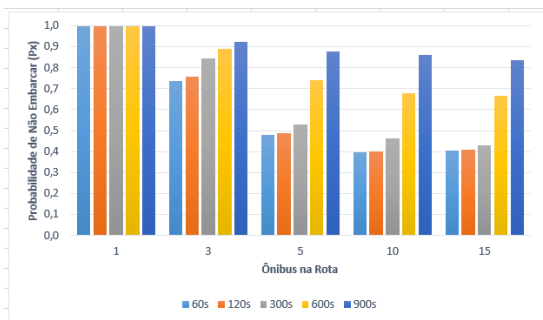
(b) Probabilidade de não embarcar no primeiro veículo Estação 1.



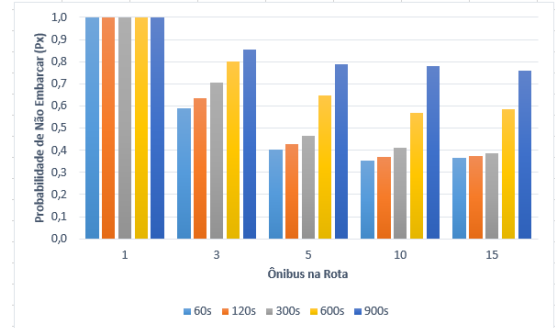
(c) Probabilidade de não embarcar no primeiro veículo Estação 2.



(d) Probabilidade de não embarcar no primeiro veículo Estação 3.



(e) Probabilidade de não embarcar no primeiro veículo Estação 4.



(f) Probabilidade de não embarcar no primeiro veículo Estação 5.

Figura 43 – Probabilidade de não embarcar no primeiro veículo do Sistema BRT.

de ter que esperar melhora, caindo para aproximadamente 60% quando os intervalos de partida são de 60, 120 e 300 s, e chegando a 70% e 80% respectivamente para intervalos de 600 e 900s. A melhor relação entre o intervalo de partidas de veículos e quantidade de veículos na rota, dá-se quando se tem 10 veículos na via, onde o sistema assume aproximadamente o seu estágio estacionário. Para intervalos de saída de 60 s e 120s, a fila praticamente zera, e atinge o nível de apenas 20% de passageiros não conseguirem embarcar da primeira vez no veículo para o intervalo de 300s.

Já na Figura 43b, é possível perceber que a Probabilidade de não embarcar no primeiro veículo, quando se tem apenas um veículo, permanece bastante alta, aproximando-se de

100%. É possível perceber que a probabilidade de não se conseguir embarcar no primeiro veículo que para na estação melhora, sendo reduzida com o incremento de uma maior quantidade de veículos na rota. No entanto, o comportamento que se percebe é que como o veículo já estará com alguns lugares ocupados, dado que veio da Estação Central, mesmo com 10 ou 15 veículos, a probabilidade de não conseguir embarcar no veículo aumenta. Assim, na Estação Central era próximo a zero, na primeira estação já está em cerca de 20% para intervalos de partida de 60s e 120s, chega a 30% para o intervalo de partida de 300s e será maior que 50% para intervalos de partida maiores que 600s.

A Probabilidade de o Passageiro não conseguir acessar o primeiro veículo que chegar à Estação 2 é bastante similar à estação 1 quando se tem 1, 3 ou 5 veículos na rota, sendo para as três possibilidades maior que 40%, independente do intervalo de partidas dos veículos. No entanto, quando se tem veículos na rota, o cenário piora sensivelmente em relação à estação 1, subindo de 20% para 30% a possibilidade de o passageiro ter que esperar mais, para intervalos de partida de 60 e 120s.

Nas estações 3, 4 e 5, o comportamento da Probabilidade de não embarcar no primeiro veículo se mostra bastante semelhante, Figuras 43d, 43e e 43f. Para somente um veículo na rota a probabilidade de não embarcar no primeiro veículo que para na via se aproxima de 100%, vai diminuindo com o acréscimo de veículos na rota. No entanto, ao se colocar 10 veículos, se mantém para todos os intervalos de partida maior que 0,4, ou seja, mais de 40% dos passageiros nestas estações precisarão esperar mais de um veículo para embarcar, sendo pior para intervalos de partida superiores a 600s, onde a probabilidade de passageiros que esperam mais de um veículo é de mais de 60% dos passageiros.

Esse processo, para a imagem do Sistema BRT, não é positivo, pois as características do Sistema que garantem agilidade e confiança de se chegar ao destino em certo intervalo de tempo pode não ser concretizado devido às possibilidades tão altas de espera. Assim, para planejadores, certamente, esta não é a melhor solução.

No contexto apresentado, para planejadores, a alternativa de composição de veículos na rota, intervalos de partidas e probabilidade de esperar mais de um veículo, no conjunto de estações, a melhor composição é de 5 veículos e intervalos de partida de até 300s, que trazem resultados com menor probabilidade de perdas, referendando as escolhas em Tempo Médio de Fila, Tamanho Médio da Fila e Tamanho Médio do Sistema.

#### 6.1.2.1.5 Utilização do Sistema BRT

A avaliação da Utilização em Sistemas de Transporte representa a diferença entre a demanda de passageiros e a capacidade dos veículos, possibilitando identificar em que momentos se têm a lotação total dos veículos e em que proporção isto acontece. O nível de utilização foi avaliado considerando a variação de 0 a 1, podendo ser identificado, portanto, o percentual a partir dos dados apresentados. A Figura 44 apresenta a relação de utilização do veículo em cada estação, mostrando os resultados para o cenário apresentado (6.1.2.1).



Figura 44 – Utilização do Sistema BRT.

Na Figura 44a, que representa o nível de Utilização na Estação Central, é possível perceber que quando se tem somente um veículo na rota, em todos os intervalos de partidas não se atinge o máximo de utilização, porém, tem-se o maior percentual variando de 70% a 80% da ocupação total. Por outro lado, quando são inseridos outros veículos na rota, a relação melhora, diminuindo a utilização do ônibus para menos de 40% em todas as possibilidades de quantidades de veículos e intervalos de partida, sendo que o cenário aparenta assumir seu estado estacionário quando se tem 10 veículo na rota, que apresenta menores índices de utilização em todos os intervalos de partidas.

Considerando que o veículo se desloca de uma estação a outra numa sequência linear, ao chegar à Estação 1 (Figura 44b) é natural que o nível de utilização aumente para todas as possibilidades de avaliação apresentadas. Assim, quando se tem somente um veículo na via, o nível de utilização se aproxima de 1, em todos os intervalos de partidas. A avaliação

de três veículos na via também apresenta crescimento notável, assumindo valores maiores que 40% em todos os intervalos de partida e chegando a 80% no intervalo de 900s. Para as demais possibilidades de avaliação, destaca-se, novamente, o cenário com 10 veículos na via, o qual apresenta menores níveis de utilização.

A partir da segunda estação, o cenário com apenas um veículo já apresenta nível de utilização de 100%, como pode ser visto nas Figuras 44c, 44d, 44e e 44f, sendo que, a partir da Estação 4 (Figura 44e), a possibilidade de ter três veículos na via também atinge a utilização de 100%. Nos cenários apresentados, para intervalos de partida de 900s, já na terceira Estação (Figura 44d), a utilização também atinge 100%.

Uma possibilidade que deve ser destacada é para cenários com 5 veículos na rota que, para intervalos de partidas de 60s, 120s e 300s, atinge percentuais abaixo de 80%, mostrando-se uma boa relação para os planejadores, com uma quantidade média (no cenário apresentado) de veículos e com altos níveis de ocupação, sem comprometer a qualidade do serviço com a lotação máxima.

#### 6.1.2.1.6 Vazão do Sistema BRT

A Vazão apresentada, nesta tese, representa a quantidade de passageiros por segundo que deixam uma estação em direção à próxima estação, ou seja, estão no veículo. Assim, a Figura 45 apresenta os resultados da vazão de cada estação analisada.

A Figura 45a apresenta que na Estação Central a quantidade de veículos impacta diretamente na vazão da estação, ou seja, quanto mais veículos estiverem disponíveis para a rota, maior a vazão da estação. Assim, a melhor relação nesta estação de quantidade de veículos e intervalos entre partidas, dá-se quando se tem 10 veículos na rota. Assim, para intervalos de 60s e 120s, apresentam-se os melhores resultados de vazão, ou seja, maior quantidade de passageiros transportados.

A vazão tende a aumentar a cada estação, dado que no deslocamento do veículo entre estações, embora exista o movimento de desembarques e embarques, o volume de pessoas no veículo aumenta, fazendo com que a vazão acompanhe esta tendência. Assim, é possível observar, nas Figuras 45b, 45c, 45d e 45e, que a vazão aumenta a cada estação em que o veículo avança, a exceção para a Estação 5 (Figura 45f), a última estação antes da Estação Final, onde a vazão tem uma pequena queda em relação à Estação 4 (Figura 45e). Isso tem a possibilidade de ocorrer em função do número de passageiros que podem descer na estação ser maior do que os que entraram.

É possível observar, também, que em todas as estações, assim como em qualquer intervalo de partida, o comportamento do Sistema para dez ou quinze veículos se mostra bastante similar, ou seja, pode-se inferir que, para o cenário estudado, uma quantidade maior que 10 veículos, não causará impacto significativo na vazão. Outro fator de destaque é que, a cada estação, a diferença entre a vazão quando se tem três, cinco ou dez veículos vai



Figura 45 – Vazão do Sistema BRT.

diminuindo, porém, quando atinge a Estação 5 a vazão se torna praticamente similar para quantidades de veículos maiores do que três (Figuras 45c, 45d, 45e e 45f, principalmente).

De modo geral, na Figura 45, pode-se perceber que a vazão, quando se tem somente um veículo é muito baixa, com comportamento semelhante em todas as estações, ou seja, está sempre abaixo de 0,03 passageiros/s e apresenta a mesma linha de descendente em todos os intervalos de partida.

O desafio dos gestores de transporte ao observar a vazão é atentar para manter bons níveis de vazão, conseguir comparar com as métricas anteriormente estudadas, para que se tenha um relação de menor quantidade de veículos, assim como intervalo de tempo entre partidas aceitável, a fim de manter a boa satisfação dos usuários do Sistema.

### 6.1.2.2 Estudo de Caso 2

Numa segunda perspectiva de avaliação do modelo (Figura 24), utilizou-se, como cenário, a alternância do tempo de chegada dos passageiros à estação, ficando fixo os parâmetros de quantidade de veículos na rota e intervalos de saída, respectivamente, 5 veículos na rota e intervalos de partida de 300s, já que no cenário anterior (6.1.2.1) apresentaram melhores resultados em relação às métricas avaliadas.

Considerando os dados apresentados na subseção anterior (6.1.2.1), que utilizou aqueles da matriz origem/destino da Linha 40, da Cidade de Recife ((RECIFE, )) e construiu um cenário para as 6 estações do estudo, utilizou-se esse dado como parâmetro central para a avaliação. Assim, fez-se a variação do tempo de chegada entre 50% menor tempo e 50% maior tempo para as chegadas. A probabilidade de desembarques nas estações foi conservada, dado que se acredita que não se altera no contexto do trabalho. Assim, foi construída a Tabela 16 para apresentar os dados.

Tabela 16 – Parâmetros de entrada para chegadas e desembarques nas estações.

<b>Estação</b>	<b>50% menor</b>	<b>25% menor</b>	<b>Dado Real</b>	<b>25% maior</b>	<b>50 % maior</b>	<b>Probabilidade Desembarque</b>
<b>CS</b>	23	35	46	58	69	-
<b>St_1</b>	28	42	56	70	84	0,01
<b>St_2</b>	36	53	71	89	107	0,12
<b>St_3</b>	22	33	44	55	66	0,22
<b>St_4</b>	44	66	88	110	132	0,15
<b>St_5</b>	180	270	360	450	540	0,24
<b>FS</b>	-	-	-	-	-	1

Cada Cenário descrito, pode ser entendido como picos diários, em dados momentos do dia, pode haver mais ou menos passageiros para utilizar o Sistema. Nesta perspectiva, serão avaliadas as métricas de desempenho: Tamanho Médio do Sistema, Tamanho Médio da Fila, Tempo Médio da Fila, Probabilidade de não embarcar no primeiro veículo (não ingresso no primeiro ônibus que aporta à estação), Utilização e Vazão do Sistema.

#### 6.1.2.2.1 Tamanho Médio do Sistema (MSS)

Numa avaliação do Tamanho Médio do Sistema, que considera a quantidade de passageiros que estão no Sistema BRT, seja no veículo ou aguardando na estação, ao inserir os parâmetros de entrada descritos na Tabela 16, têm-se os resultados descritos na Figura 46.

É possível perceber que no cenário com o menor tempo de chegada (50% menor que a média da diária), o tamanho médio do Sistema se apresenta com mais pessoas, aproximadamente 700 passageiros, ou no veículo ou aguardando na estação. No entanto, o Cenário\_2 que tem tempo de chegada 25% menos que a média diária, o número de

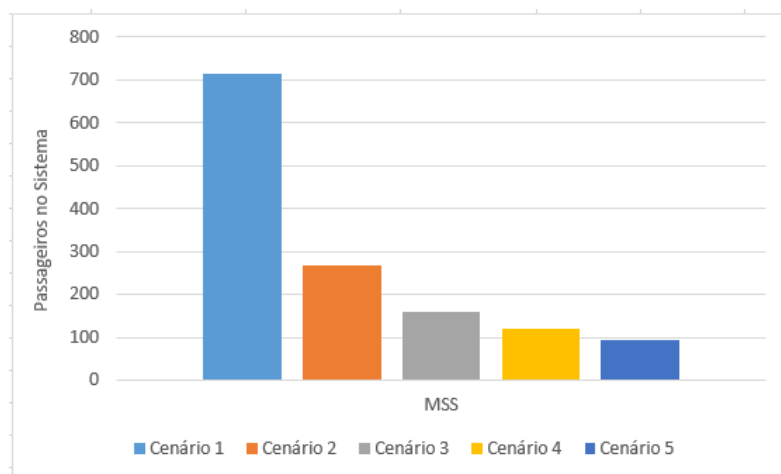


Figura 46 – Resultados para MSS - Cenário 2.

passageiros no sistema cai significativamente, com aproximadamente 250 pessoas no Sistema. Esta relação mostra que não há uma correlação direta da diminuição do tempo de chegada com o tamanho do sistema. Para ressaltar este aspecto, foi criada a Tabela 17 para mostrar a correlação:

Tabela 17 – Correlação entre diminuição do Tempo de Chegada e o Tamanho Médio do Sistema

Cenário	Tempo	MSS	Relação
Cenário_1	50% maior	714	446,70%
Cenário_2	25% maior	268	168,05%
Cenário_3	Padrão	160	100,00%
Cenário_4	25% menor	120	75,43%
Cenário_5	50% menor	93	58,20%

Na Tabela 17, é possível perceber que o aumento e a diminuição do tempo padrão não formatam um padrão de resposta para o tamanho médio do sistema. Assim, para gestores, é necessário verificar cada caso individualmente, conhecendo as possibilidades, para tomar a decisão mais acertada. Por isso, destaca-se a importância de um modelo que possa representar a realidade.

#### 6.1.2.2.2 Tamanho Médio da Fila (MQS)

A quantidade de passageiros aguardando nas estações para acessar o veículo representa o Tamanho Médio da Fila. Para mostrar os resultados quando ocorre a variação dos intervalos de chegadas (Picos), foi apresentada a Figura 47, que traz os resultados do modelo sob a perspectiva em estudo.

A Figura 47 aponta que num intervalo de chegadas menor, a fila se torna maior, como era esperado, e corrobora com o resultado da Subseção 6.1.2.2.1, que aponta resultado em

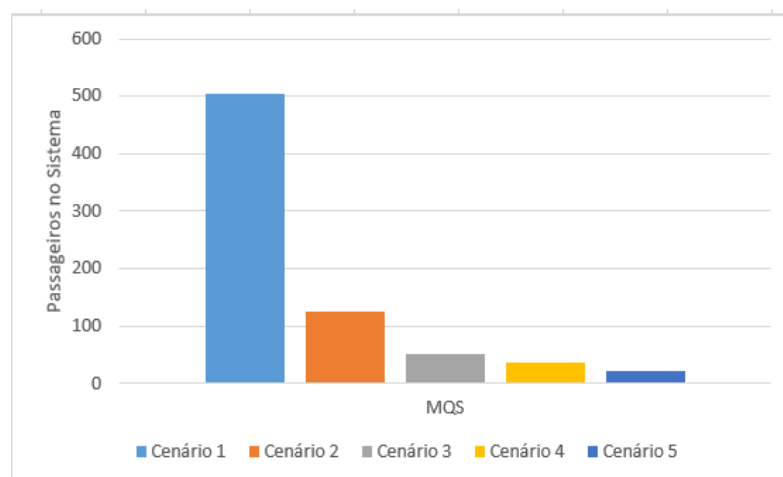


Figura 47 – Resultados para MQS.

sentido similar. Outro fator que pode ser observado, é que como na seção anterior, não existe correlação direta entre a diminuição do intervalo de chegada e a diminuição da fila (Tabela 18).

Tabela 18 – Correlação entre diminuição do Tempo de Chegada e o Tamanho Médio da Fila.

Cenário	Tempo	MQS	Relação
Cenário_1	50% maior	505	993,15%
Cenário_2	25% maior	124	244,58%
Cenário_3	Padrão	51	100,00%
Cenário_4	25% menor	37	71,89%
Cenário_5	50% menor	21	41,58%

A Tabela 18 destaca a inexistência de padrão de correlação entre a diminuição de tempo de chegada e o aumento das filas de maneira proporcional, no entanto, para o cenário apresentado, o que se pode perceber é que um maior tempo de fila traria transtornos gigantes para os passageiros que teriam que esperar nas estações.

#### 6.1.2.2.3 Tempo Médio de Fila (MQT)

O Tempo Médio de Espera do Passageiro na estação é computado como Tempo Médio de Fila. Na variação dos tempos de chegadas dos passageiros, em diversos picos, é possível observar que quanto menor tempo entre as chegadas, maior tempo o passageiro deverá esperar para embarcar no veículo, conforme pode ser visto na Figura 48.

Muito embora o tempo máximo de espera apresentado no cenário seja inferior a 170s, como pode ser visto na Figura 48, é um número que se mostra relativamente alto, se comparado com os outros cenários de chegada, que no cenário 2 (25% menor que o tempo



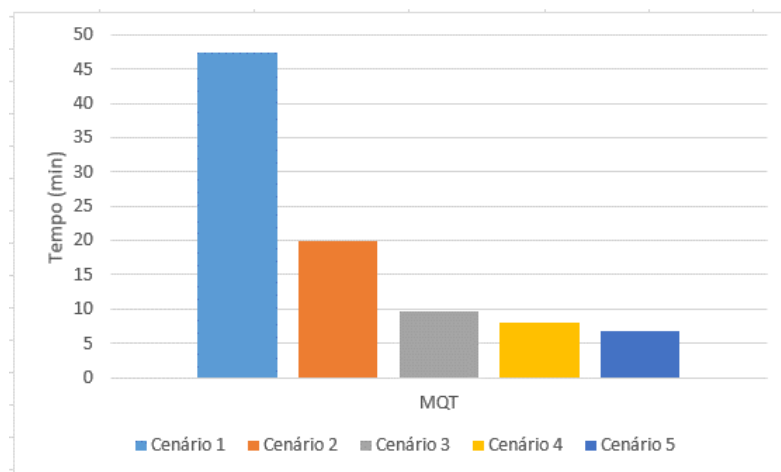


Figura 48 – Resultados para MQT.

padrão) está em 40s, reduzindo gradativamente nos cenários em que existe um intervalo maior de chegada.

Desta forma, em cenário com pico de menor intervalo de chegada, deve-se avaliar a possibilidade de aumentar a quantidade de veículos na rota, ou mesmo diminuir os intervalos de partidas.

#### 6.1.2.2.4 Probabilidade de Não Embarcar no Primeiro Veículo que Chega à Estação

A Probabilidade de não embarcar no primeiro veículo na estação representa que o passageiro não conseguiu embarcar no primeiro veículo que para na estação, ou seja, deverá esperar o próximo veículo para fazer o embarque. Então, uma maior taxa de Probabilidade de não embarcar no primeiro veículo representa que o passageiro passará mais tempo na fila. Os resultados para intervalos de chegadas distintos estão apresentados na Figura 49.

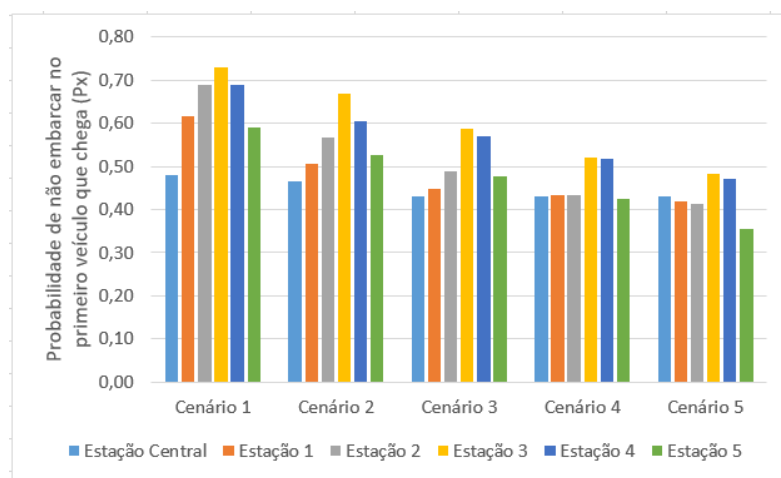


Figura 49 – Resultados para Probabilidade de não embarcar no primeiro veículo.

Em todos os cenários, apresentados na Figura 49, a Probabilidade de não embarcar no primeiro veículo atinge o ápice na Estação 4. Isso pode ocorrer em virtude das probabili-

dades de embarques até esta estação serem maior que as de decidas, já que o ônibus lota e fica inacessível ao passageiro, tendo este que esperar pelo próximo veículo.

Numa comparação entre os cenários, é possível perceber que mesmo com a diferença entre intervalos de chegada à estação, variando percentualmente de 50% menor e 50% maior, a variação entre a Probabilidade de não embarcar no primeiro veículo mostra pouca disparidade, de estação à estação, ficando mais linear do tempo padrão de chegada até um intervalo de chegada 50% maior.

#### 6.1.2.2.5 Utilização do Sistema BRT

Para avaliação da Utilização do Sistema BRT, que representa a diferença entre a capacidade dos veículos e a demanda de passageiros, foram avaliados os cenários com diferentes tempos de entrada, conforme apresentado na Tabela 16. A partir da avaliação do modelo, foram obtidos os seguintes resultados (Figura 50).

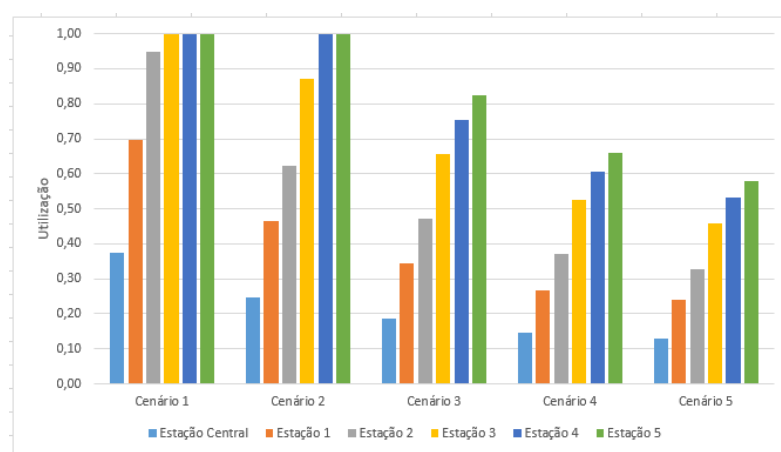


Figura 50 – Resultados para Utilização

No Cenário 1, que é quando o intervalo de chegada é menor 50% que o padrão representando um cenário de pico mais movimentado, a partir da Estação 4, é possível perceber que o nível de utilização atinge o seu ponto máximo, o que representa que desta estação à estação final, o veículo deverá permanecer lotado.

No Cenário 2, onde o tempo de chegada é menor que o padrão em 25%, é possível perceber que já existe uma melhora na utilização, dado que o nível máximo é atingido somente nas duas últimas estações. Este cenário segue melhorando até o maior intervalo de chegadas, que é quando a utilização atinge o nível máximo de 55%, já na última estação, com intervalo de chegada 50% maior que o padrão.

Na perspectiva de planejamento, a utilização em seu nível máximo pode gerar filas e insatisfação dos passageiros, no entanto, em níveis como 55% também não são favoráveis, dado que o Sistema estará subutilizado. Assim, os gestores devem manter o equilíbrio, considerando a demanda de passageiros em cada pico para assim determinar a quantidade e o intervalo de veículos na rota.

### 6.1.2.2.6 Vazão do Sistema BRT

Numa avaliação sobre o volume de passageiros que se deslocam de uma estação à outra, vazão, foi considerada a variação dos tempos de chegadas, no qual foi possível obter os resultados apresentados na Figura 51.

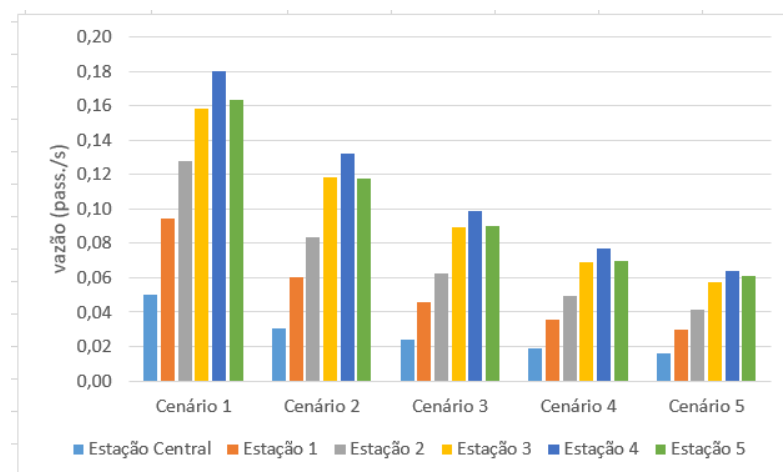


Figura 51 – Resultados para Vazão.

É possível perceber, na Figura 51, que a estação 4 mostra o maior pico em todos os cenários. Isso ocorre devido ao processo de lotação do veículo, que atinge o ápice neste ponto. É importante destacar, que embora os intervalos de chegadas às estações sejam alterados de maneira significativa, a partir do segundo cenário (intervalo de chegada 25% menor que o tempo padrão), o volume de passageiros pouco se acentua. Assim, o cenário que fica mais linear no intervalo de chegada padrão é maior 25% e maior 50%.

Nesta perspectiva, é possível verificar que impactos no sistema no cenário 1, podem levar a muitos transtornos para os passageiros, por causa do alto volume de pessoas transportadas.

### 6.1.3 Análise de Sensibilidade

Como descrito na Seção 2.6, a análise de sensibilidade é um importante instrumento de planejamento, visto que possibilita identificar os fatores que mais impactam no sistema, identificando como isto afetará nos resultados buscados.

Nesta tese, a análise de sensibilidade corrobora para que se identifique os fatores que mais causam impactos em sistemas de transportes, para tanto, foi utilizado o modelo apresentado na Seção 5.1.3. O modelo é descrito na Figura 24, no entanto, como a análise de sensibilidade irá considerar todas as transições que estão no modelo, este será apresentado, por completo, no *script* disponível nos Apêndices desta tese (Apêndice A).

A análise de sensibilidade será efetivada pela avaliação do modelo através de linguagem de script do software ®Mercury, que possibilita tanto a criação do modelo, quanto a sua análise.

Para facilitar o entendimento do leitor, na Tabela 19, estão descritas as transições apresentadas no modelo utilizado, destacando o que cada uma representa.

Tabela 19 – Transições para Análise de Sensibilidade.

TRANSIÇÕES	REPRESENTAÇÃO NO MODELO
<b>ACS</b>	Intervalo de chegada dos passageiros na Estação Central
<b>T1_1</b>	Intervalo de chegada dos passageiros na Estação 1
<b>T1_2</b>	Intervalo de chegada dos passageiros na Estação 2
<b>T0</b>	Intervalo de chegada dos passageiros na Estação 3
<b>T3</b>	Intervalo de chegada dos passageiros na Estação 4
<b>T8</b>	Intervalo de chegada dos passageiros na Estação 5
<b>TIB</b>	Tempo para Entrada no Veículo do Passageiro na Estação Central
<b>T2_1</b>	Tempo para Entrada no Veículo do Passageiro na Estação 1
<b>T2_2</b>	Tempo para Entrada no Veículo do Passageiro na Estação 2
<b>T1</b>	Tempo para Entrada no Veículo do Passageiro na Estação 3
<b>T4</b>	Tempo para Entrada no Veículo do Passageiro na Estação 4
<b>T6</b>	Tempo para Entrada no Veículo do Passageiro na Estação 5
<b>TBD</b>	Intervalo de Partidas dos Ônibus
<b>TJSCTF</b>	Tempo de Deslocamento da Estação Central para a Estação 1
<b>T3_1</b>	Tempo de Deslocamento da Estação 1 para a Estação 2
<b>T3_2</b>	Tempo de Deslocamento da Estação 2 para a Estação 3
<b>T2</b>	Tempo de Deslocamento da Estação 3 para a Estação 4
<b>T5</b>	Tempo de Deslocamento da Estação 4 para a Estação 5
<b>T7</b>	Tempo de Deslocamento da Estação 5 para a Estação Final

### 6.1.3.1 Análise de Sensibilidade para o Tamanho Médio do Sistema (MSS)

Visando avaliar o impacto que cada processo causa no Tamanho Médio do Sistema, foi utilizado o Modelo descrito no Apêndice A. Para visualização dos resultados, foi construída a Figura 52 que apresenta, por ordem de importância, os principais fatores.

Na Figura 52, é possível identificar que a transição que mais impacta no modelo é a **TBD** que representa o intervalo de partida dos ônibus. Este fator aponta que o intervalo de partida interfere mais diretamente no sistema, ou seja, se for um intervalo de partida maior, mais pessoas estarão nos sistemas, ou aguardando nas filas ou transitando nos veículos; se for menor, o contrário.

Pode-se destacar, também, o conjunto de transições **T1\_1**, **T0**, **ACS** e **T3**, que representam o intervalo de chegadas dos passageiros às estações. Também, tem forte influência no Tamanho Médio do Sistema, com destaque para a entrada na Estação 1 e Estação 2, que apresentam os maiores índices de sensibilidade, significando que deve-se atentar a estas estações, ou mesmo criar alternativas para minimizar o impacto no Sistema.

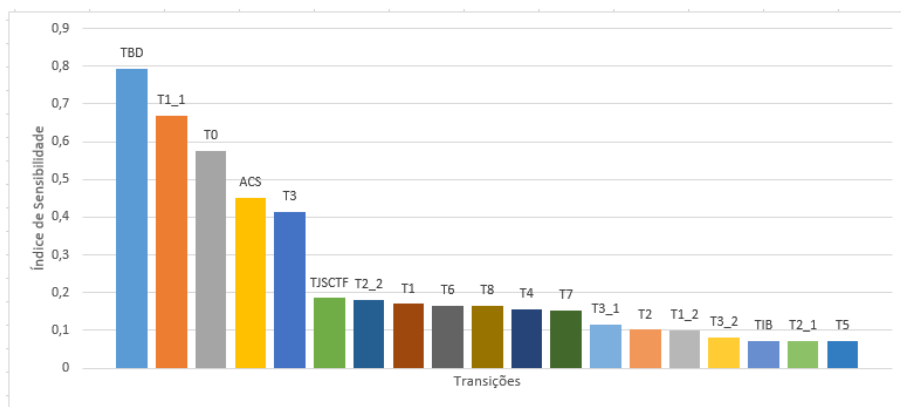


Figura 52 – Análise de Sensibilidade para MSS.

### 6.1.3.2 Análise de Sensibilidade para o Tamanho Médio da Fila (MQS)

Numa Análise sobre os fatores que mais impactam no Tamanho Médio da Fila, referendando o que foi apresentado na seção anterior (Subseção 6.1.3.1), a transição que apresenta maior impacto para a fila é **TBD**, como pode ser visto na Figura 53.

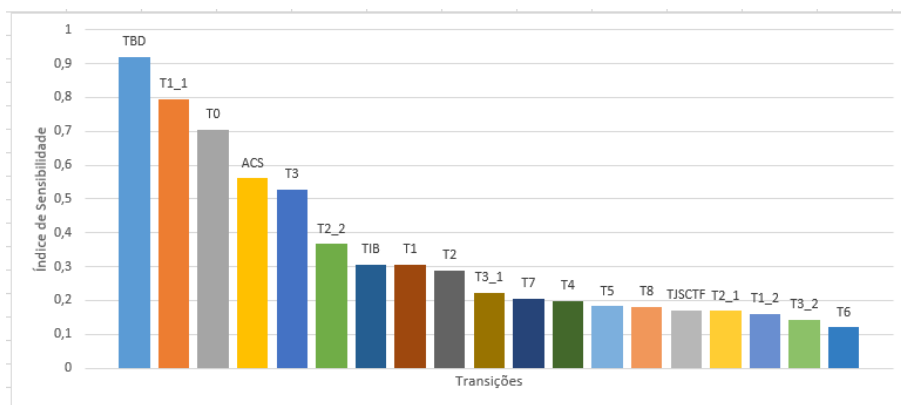


Figura 53 – Análise de Sensibilidade para MQS.

A Figura 53, mostra que para o Tamanho da Fila os fatores que mais impactam são: o intervalo de partida dos ônibus (**TBD**), o intervalo de chegada dos passageiros na Estação 1 e 3 (**T1\_1**, **T0**) e o intervalo de chegada à Estação Central (**ACS**). Numa comparação com a subseção anterior (Subseção 6.1.3.1), o índice de sensibilidade apresenta maior valor, atingindo, nos casos citados, mais de 50%, o que mostra o forte impacto no resultado para mudanças nestas transições. Assim, é preciso atentar para estes fatores quando se busca satisfazer as necessidades dos passageiros, que são os que serão impactados pelo tamanho da fila.

### 6.1.3.3 Análise de Sensibilidade para o Tempo Médio de Fila (MQT)

Outro fator avaliado pelo modelo, através do Script para avaliação de métricas de desempenho em sistemas de transporte (Apêndice A), foi o impacto dos fatores no Tempo Médio e Fila, que tem seus resultados apresentados na Figura 54.

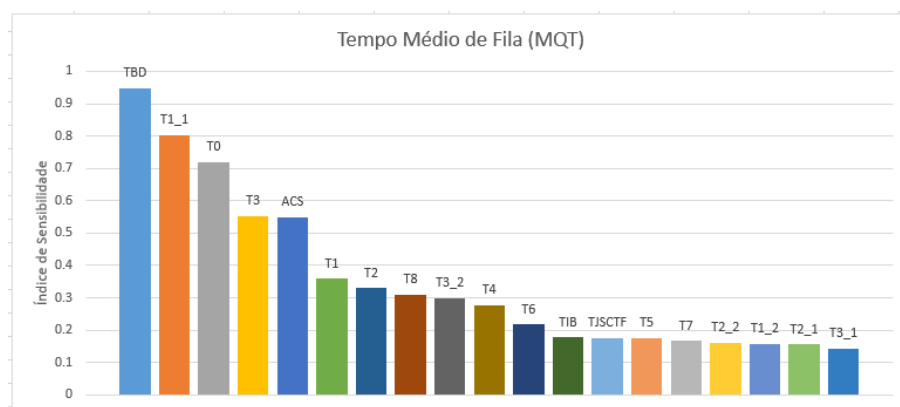


Figura 54 – Análise de Sensibilidade para MQT.

É possível perceber que, na Figura 54, são mantidos os fatores mais importantes para o sistema, representados pelas Transições **TBD**, **T1\_1** e **T0**, que representam respectivamente o intervalo de partida dos veículos, intervalos de chegada à estação 1 e estação 3. No entanto, destaca-se a emergência da transição **T3**, que representa o intervalo de chegada à Estação 4, que teoricamente está na parte final da rota; no entanto, nesta estação, ainda existe uma grande probabilidade do passageiro não embarcar no veículo. Para corrigir e minimizar tempo de espera dos passageiros, os gestores podem pensar em alternativas como implantação de mini-rotas dentro do sistema, contemplando apenas as estações com maior demanda e, conseqüentemente, fila e espera, o que poderia trazer ganhos em imagem para o sistema.

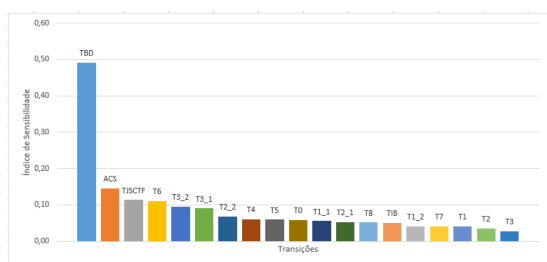
#### 6.1.3.4 Análise de Sensibilidade para a Probabilidade de Não Embarcar no Primeiro Veículo que Chega à Estação

Para verificar a Probabilidade de não embarcar no primeiro veículo no sistema, que representa a probabilidade do passageiro não conseguir embarcar no primeiro veículo que chega à estação, foi considerada cada estação separadamente, pois se pode "perder" o veículo em qualquer estação; os resultados são apresentados na Figura 55.

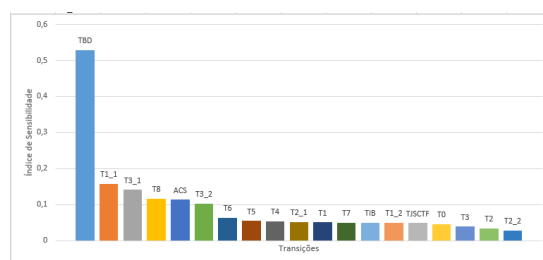
Na Figura 55, em todas as estações, representadas pelas Sub-figuras 55a, 55b, 55c, 55d, 55e e 55f, é possível perceber que a transição que mais impacta é **TBD**, que representa o intervalo de partidas dos veículos, dado que se apresenta com maior índice de sensibilidade em todas elas. As demais transições vão variando em importância, de acordo com a estação que se avalia, sempre trazendo como segundo fator de importância, o intervalo de chegada à estação de cada passageiro.

#### 6.1.3.5 Análise de Sensibilidade para a Utilização do Sistema BRT

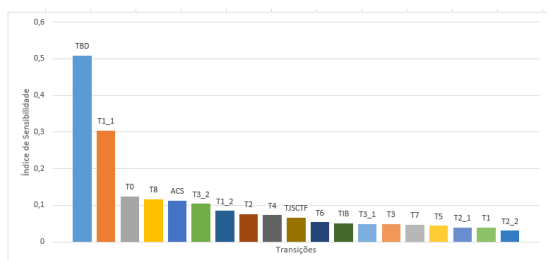
Quando se considera o nível de utilização do sistema, o que se busca é proporcionar um equilíbrio entre o máximo de utilização, com o mínimo de recursos, garantindo o atendimento dos usuários de maneira satisfatória, sem apertos ou filas. Assim, foram



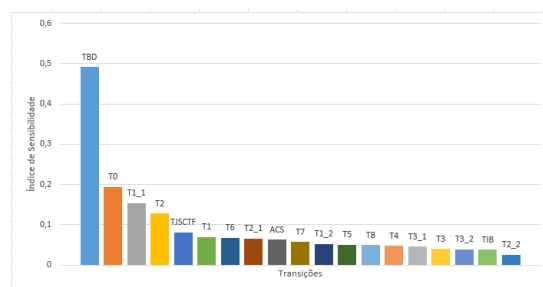
(a) Análise de Sensibilidade para a Probabilidade de não embarcar no primeiro veículo Estação Central.



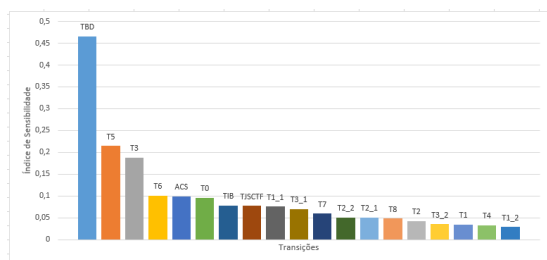
(b) Análise de Sensibilidade para a Probabilidade de não embarcar no primeiro veículo Estação 1.



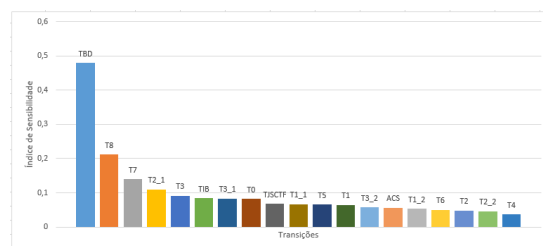
(c) Análise de Sensibilidade para a Probabilidade de não embarcar no primeiro veículo Estação 2.



(d) Análise de Sensibilidade para a Probabilidade de não embarcar no primeiro veículo Estação 3.



(e) Análise de Sensibilidade para a Probabilidade de não embarcar no primeiro veículo Estação 4.



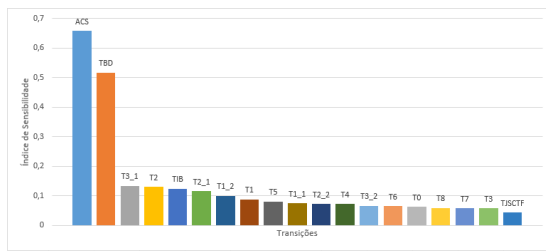
(f) Análise de Sensibilidade para a Probabilidade de não embarcar no primeiro veículo Estação 5.

Figura 55 – Análise de Sensibilidade para a Probabilidade de não embarcar no primeiro veículo do Sistema BRT.

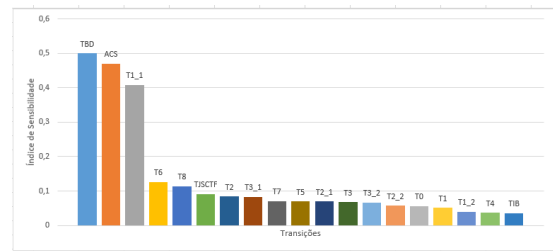
verificados os fatores que mais impactam na utilização do sistema, sendo avaliado estação a estação, como cada transição interfere no resultado, apresentado na Figura 57.

Na Figura 56a, que apresenta os resultados para a Estação Central, o fator preponderante é o intervalo de chegada dos passageiros à Estação Central (**ACS**), o que mostra que, no início da Rota, o tempo de chegada do passageiro interfere mais no nível de utilização do que o intervalo de partida dos veículos (**TBD**), que até então tem se mostrado o fator preponderante do sistema. Isto pode ocorrer uma vez que, na estação central, o intervalo de chegadas dos passageiros é baixo, gerando um acúmulo de passageiros já no aguardo do veículo.

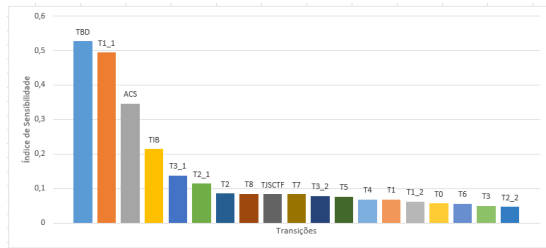
A Figura 56b mostra os resultados para a Estação 1, onde o índice de sensibilidade para a métrica de utilização indica que os fatores que mais afetam o resultado são o intervalo



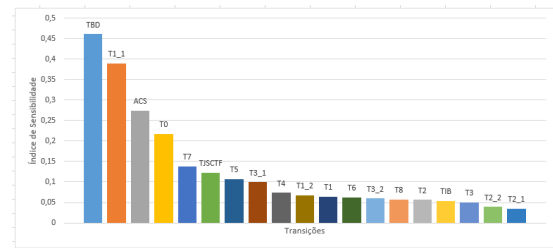
(a) Análise de Sensibilidade para Utilização na Estação Central.



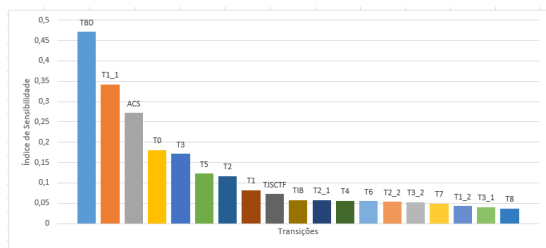
(b) Análise de Sensibilidade para Utilização na Estação 1.



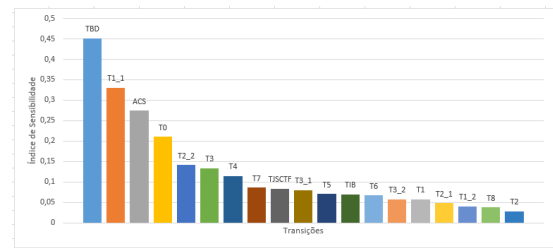
(c) Análise de Sensibilidade para Utilização na Estação 2.



(d) Análise de Sensibilidade para Utilização na Estação 3.



(e) Análise de Sensibilidade para Utilização na Estação 4.



(f) Análise de Sensibilidade para Utilização na Estação 5.

Figura 56 – Análise de Sensibilidade para Utilização do Sistema BRT.

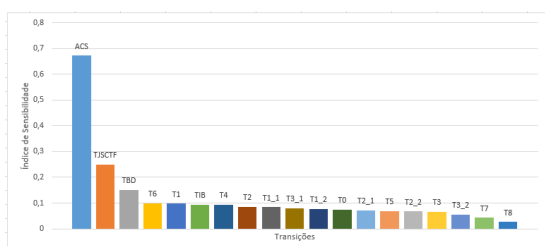
de partida dos veículos (**TBD**), em primeiro posto, seguido do intervalo de chegada dos passageiros à Estação Central (**ACS**) e o intervalo de chegada dos passageiros à Estação 1 (**T1\_1**). Estas transições são destaque ante as demais, o que prevalece porque a análise a ser feita em relação à Estação 1, e até esta estação, só se verifica no sistema os passageiros da Estação Central e Estação 1, limitados à quantidade de vagas no veículo.

Para as Estações 2, 3, 4 e 5 (Figuras 56c, 56d, 56e e 56f), a importância dos três fatores principais permanece na seguinte ordem: **TBD**, **t1\_1** e **ACS**, respectivamente, intervalo de partida dos veículos, intervalos de chegadas à Estação 1 e intervalos de chegadas à Estação Central. Isto pode acontecer em virtude das maiores demandas de chegadas acontecerem nas primeiras estações; assim, o sistema atingiria determinado nível de equilíbrio em utilização a partir da Estação 2, com o índice de importância pouco sendo alterado entre as transições mais importantes, no decorrer da rota.

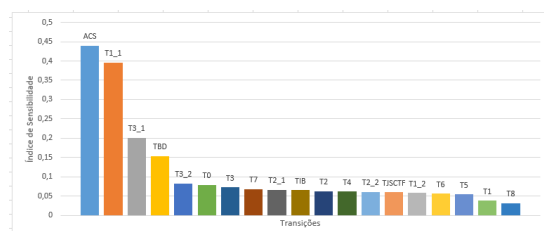


### 6.1.3.6 Análise de Sensibilidade para a Vazão do Sistema BRT

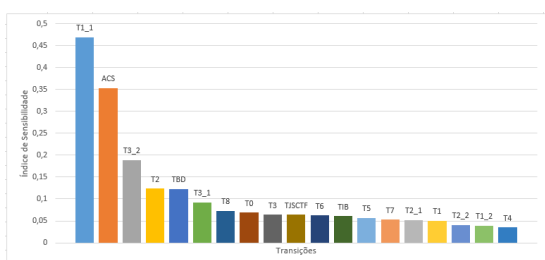
Numa análise sobre os fatores que mais impactam a Vazão do Sistema, que nesta tese é considerada como a quantidade de passageiros por segundo que deixam uma estação em direção à próxima estação, ou seja, estão no veículo, são apresentados, na Figura 57, os resultados que interferem mais diretamente no resultado da vazão, destacando que a análise é feita sob cada estação da rota.



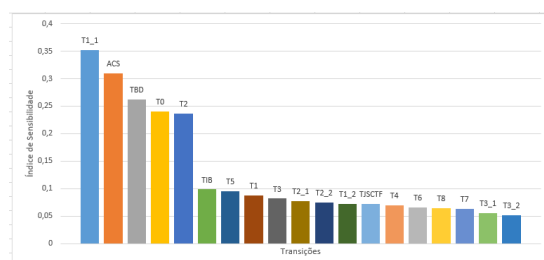
(a) Análise de Sensibilidade para Vazão na Estação Central.



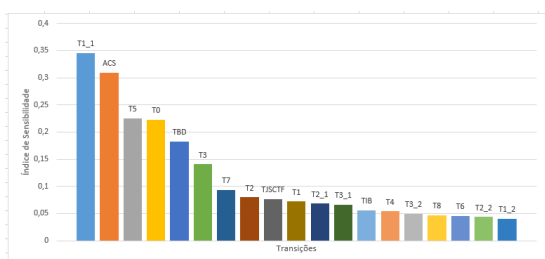
(b) Análise de Sensibilidade para Vazão na Estação 1.



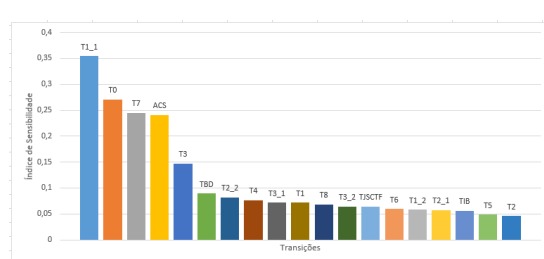
(c) Análise de Sensibilidade para Vazão na Estação 2.



(d) Análise de Sensibilidade para Vazão na Estação 3.



(e) Análise de Sensibilidade para Vazão na Estação 4.



(f) Análise de Sensibilidade para Vazão na Estação 5.

Figura 57 – Análise de Sensibilidade para Vazão do Sistema BRT.

Na Figura 57a, que representa a vazão do sistema na Estação Central, o principal fator de impacto é o intervalo de chegada de passageiros na Estação Central (**ACS**) que, junto com o tempo de deslocamento da Estação Central para a Estação 1 (**TJSCTF**), são as transições que mais impactam no resultado da métrica. Isto ocorre, dado que a junção destas transições é o que, de fato, representa a vazão do sistema.

Para a vazão na Estação 1 (Figura 57b), as duas transições mais importantes são **ACS** e **T1\_1**, que representam o intervalo de chegada dos passageiros à Estação Central e à Estação 1, respectivamente. Neste aspecto, isto ocorre porque na Estação 1, a entrada de

passageiros só tem ocorrido por estas duas estações e, ainda assim, o intervalo de chegada é menor na Estação Central.

Para as Estações 2, 3, 4 e 5 (Figuras 57c, 57d, 57e e 57f), a transição que assume maior índice de importância é **T1\_1**, o que pode acontecer por esta funcionar como alimentadora das demais estações, mantendo-se como mais importante por prover a demanda do sistema e, nas estações seguintes, haver equilíbrio entre entradas e decidas, ou mesmo, o sistema ter atingido um comportamento linear quanto a quantidade de pessoas no veículo.

Estes fatores se mostram importantes para os gestores, uma vez que se pode avaliar quantas pessoas estão transitando no sistema à cada estação e perceber possíveis gargalos para que se possa investir e minimizar caso haja transtornos aos usuários.

#### 6.1.4 Sumarizando Resultados com Comparativo de Custos

Para referendar a importância deste estudo, envolver numericamente fatores que possam impactar no custo operacional do sistema e, conseqüentemente, impactar na tomada de decisão, são apresentadas as relações dos principais resultados das métricas avaliadas desenvolvendo um comparativo com o custo operacional associado a esta métrica.

Ressalta-se que o custo operacional considerado não compõe um estudo aprofundado de custo, que em casos de Sistemas de transporte é por deveras complexo. Assim, este estudo tem a finalidade precípua de ressaltar uma relação superficial, que em trabalhos futuros pode ser aprofundada, pois o olhar puro da métrica, necessariamente, não representa a melhor solução de planejamento que, num processo de gestão, possui recursos financeiros limitados.

Para avaliação de custo, tomou-se por base o estudo realizado por (AHMAD et al., 2018), que foi trabalhado para atender as finalidades do estudo e apresentado na Tabela 5. A partir disto, foram construídas tabelas para enfatizar os resultados das métricas e posto o custo dado por (AHMAD et al., 2018), a fim de mostrar para o gestor as opções de alternativas possíveis e sua relação com o custo operacional do veículo.

Para sumarizar os resultados, foram trabalhadas as análises desenvolvidas no Cenário 1, do segundo estudo de Avaliação de Desempenho (Subseção 6.1.2.1), onde há uma variação na quantidade de veículos na rota, neste caso, necessariamente custos diferentes.

As tabelas são apresentadas, destacando em vermelho o que seria o pior resultado da métrica e em azul o melhor resultado sob a perspectiva de sistemas de transporte. Por fim, são apresentados os custos operacionais diários referentes à quantidade de veículos na rota.

Visando detalhar a importância do custo operacional diário por veículo, informando que existe certa linearidade nos resultados, será explorada, nesta seção, a Tabela 20, que traz a relação dos principais resultados quando se tem intervalos de partida de 300s e para os demais intervalos, que seguem o mesmo padrão de resultado, as tabelas estão disponíveis para consulta no Apêndice B.

Tabela 20 – Relação entre as métricas avaliadas e o custo operacional por veículos na rota - Intervalo de Partidas de 300s.

Veículos	Cenários com Intervalo de Partida de 300s				
	1	3	5	10	15
MMS	<b>1735</b>	402	160	145	<b>143</b>
MQS	<b>1695</b>	300	48	<b>24</b>	26
MQT	<b>565,00</b>	99,99	16,15	<b>7,85</b>	8,51
Utilização Média	<b>0,95183</b>	0,75044	0,52294	0,45509	<b>0,44544</b>
Vazão Média	<b>0,02492</b>	0,06361	0,06654	0,07319	<b>0,07593</b>
Probabilidade de não embarcar Média	<b>0,98645</b>	0,74053	0,49565	0,34096	<b>0,32155</b>
Custo Operacional Diário	<b>\$249,58</b>	<b>\$748,74</b>	<b>\$1.247,90</b>	<b>\$2.495,80</b>	<b>\$3.743,70</b>

Na Tabela 20, é possível perceber que o pior cenário para resultados das métricas é o que possui somente um veículo na rota, o que se apresenta previsível, dado que mesmo que sejam alterados os intervalos de partidas com apenas um veículo, este fator não causa impacto. No entanto, o cenário de um veículo é o que apresenta menor custo. O Cenário com 15 veículos, apresenta a maior parte dos melhores resultados para as métricas, porém, o seu custo se mostra mais elevado.

Assim, o que se busca mostrar é que o poder de decisão é do gestor e das suas possibilidades orçamentárias. O gestor é quem determina quais são as prioridades e, com base nas informações extraídas do modelo, ele poderá julgar o que será mais conveniente para o Sistema de Transporte sob sua gerência. O papel do modelo é apresentar as alternativas, além do gestor avaliar o que proporciona melhores resultados nas possibilidades que ele possui.

## 6.2 Estudos de Caso para Modelos de Performabilidade

Considerando que a Avaliação de Performabilidade consiste no estudo do impacto da Falha no Desempenho do Sistema, será inicialmente trabalhado a Taxa de falha do Sistema BRT. Neste caso, através dos modelos RBD's de Dependabilidade, será extraído o MTTF do Sistema, que será convertido para taxa e aplicado ao modelo CTMC de Performabilidade.

Para verificação dos resultados e demonstração da adequação dos modelos construídos, foram realizados dois estudos considerando os cenários de BRTs. O primeiro estudo compara os resultados obtidos com o modelo CTMC com um estudo de um Sistema de BRT realizado por (HUO et al., 2014). As expressões algébricas foram usadas para calcular a confiabilidade do Sistema BRT e conseqüentemente o tempo de falha do veículo. Neste caso, os dados para composição do sistema foram obtidos no site da empresa, Volvo (EQUIPMENT, 2013), bem como os fabricantes de componentes e sistemas de segurança, com o objetivo de atribuir parâmetros MTTF aos modelos.

É importante enfatizar o propósito de usar expressões algébricas. A escolha foi feita dado

que as expressões algébricas permitem uma avaliação mais simplificada da confiabilidade e disponibilidade de sistemas e, também, porque é um formalismo menos sofisticado, sendo menos complexa sua execução; no entanto, leva em conta os parâmetros solicitados no estudo com precisão, o que o torna mais adequado para esta etapa da pesquisa.

No primeiro estudo, foi considerada a probabilidade de chegar ao destino em um Sistema de BRT, apresentado na Subseção 6.1.1. Neste caso, o modelo CTMC foi escolhido devido à sua alta capacidade computacional e à capacidade de sintetizar a avaliação de diferentes parâmetros da composição do modelo; assim, trazer a equação de forma fechada, sendo ampliado para a avaliação de performabilidade.

Para o segundo estudo, foi construído um cenário baseado em informações obtidas de um sistema real de BRT. Para a construção do estudo, foi considerado um Sistema de BRT com maior número de estações do que o primeiro caso. Isso mostra a capacidade de avaliação do modelo, o que favorece o planejamento de novos cenários de Sistemas de BRTs, onde é possível considerar a precisão dos tempos de chegada e o impacto que a falha pode causar no sistema, ainda no planejamento.

### 6.2.1 Estudo de Caso 1

Para a composição do primeiro estudo de caso, utilizou-se um conjunto de dados retirado nos estudos de (HUO et al., 2014) como indicado na Tabela 10 e a probabilidade de tempo de chegada do veículo na estação final em um período de tempo específico do dia foi calculado. Os períodos do dia foram definidos de acordo com os intervalos de pico definidos por (HUO et al., 2014).

A Tabela 21 descreve os tempos de viagem para cinco intervalos diferentes em uma rota específica (HUO et al., 2014). Os picos de viagem são: *Manhã*, *Pico da Manhã*, *Entre Picos*, *Pico da Tarde* e *Noite*. O Tempo Máximo de Viagem  $H_i + T_i$  é a soma do tempo parado na origem  $H_i$  mais o tempo de deslocamento total entre as estações  $T_i$ , ou seja, o veículo na rota.

Tabela 21 – Tempo de Viagem de um Sistema BRT, por (HUO et al., 2014).

Período	Intervalo Parado na Origem ( $H_i$ ) min	Tempo de Viagem no Veículo ( $T_i$ ) min	Tempo Máximo de Viagem ( $H_i + T_i$ ) min
Início da Manhã	7,15	22,80	29,95
Pico da Manhã	1,87	21,52	23,39
Entre Picos	4,07	18,88	22,95
Pico da Tarde	5,65	17,35	23,00
Noite	5,75	21,70	27,45

Para a construção do modelo CTMC de Performabilidade do Estudo 1, Figura 58, foram utilizadas as taxas de deslocamentos apresentadas na Tabela 22 (HUO et al., 2014),

que referendam a avaliação de desempenho do sistema, os dados dos modelos, que serão obtidos através dos modelos RBD's, descritos na seção 5.2.

Tabela 22 – Parâmetros de Entrada para cada Intervalo (Pico)

Período do Dia	Parâmetros	Tempo Médio de Espera (min)	Tempo Médio no Veículo (min)	Valor (min)
Início da Manhã	$\alpha_{tt}$	–	3,26	3,26
	$\alpha_{ttw}$ 1 to 6	1,19	3,26	4,45
Pico da Manhã	$\alpha_{tt}$	–	3,07	3,07
	$\alpha_{ttw}$ 1 to 6	0,31	3,07	3,38
Entre Picos	$\alpha_{tt}$	–	2,70	2,70
	$\alpha_{ttw}$ 1 to 6	0,68	2,70	3,38
Pico da Tarde	$\alpha_{tt}$	–	2,48	2,48
	$\alpha_{ttw}$ 1 to 6	0,94	2,48	3,42
Noite	$\alpha_{tt}$	–	3,10	3,10
	$\alpha_{ttw}$ 1 to 6	0,96	3,10	4,06

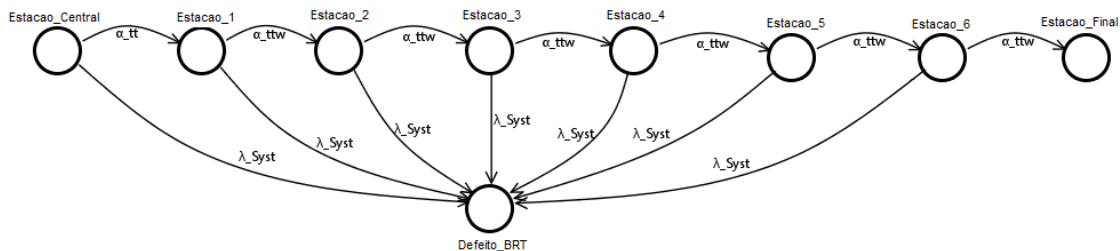


Figura 58 – Modelo CTMC para avaliação de performabilidade no Sistema BRT

Apresenta-se que  $\alpha_{tt}$ , refere-se ao tempo de viagem de ônibus a partir da primeira estação para a próxima estação e  $\alpha_{ttw}$  refere-se ao tempo de viagem das outras estações, considerando o tempo parado na estação mais o tempo de viagem para a próxima estação, neste caso, a Estação \_1 para a Estação \_6.

Para o cálculo do MTTF do Sistema BRT, foi considerada a Função Estrutural, dada por  $FuncaoEstrutural = (IE) \times (Veiculo)$ . Esta composição requer que se obtenha os dados referentes à Infra estrutura, que é dada por  $FuncaoEstrutural = (Caminho) \times (Estacao2/8)$ . Neste processo, ainda se faz necessário conhecer os valores das estações, que podem ser obtidos a partir de  $FuncaoEstrutural = (Acesso_veicula1/3) \times (Acesso_Estacao1/2)$ .

Para dados de entrada dos modelos, são expostos na Tabela ??, obtidos a partir de referências publicadas:

Assim, considerando o modelo RBD (Figura 26b), o bloco  $Acess\_Estacao$  sendo um  $K$  out of  $N$  1/2, e o bloco  $Acesso\_veiculo$  um  $K$  out of  $N$  1/3, para o MTTF e o MTTR das estações, têm-se, respectivamente, 41999,9998h e 0,0026h. O MTTF e MTTR da Infra Estrutura são obtidos pelo modelo RBD da Estação, considerando que ao menos 2

Tabela 23 – Dados de entrada do modelo.

Componente	Tempo Médio para Falhar (MTTF) (h)	Tempo Médio para Reparo (MTTR) (h)	Fonte
Veículo	7000	2	Site Volvo Company (EQUIPMENT, 2013)
Caminho	120 (6 acidentes por mês)	1	EMBARQ (DUDUTA et al., 2015)
Porta de Acesso	40000	10	Magnetic Autocontrol (GROUP, 2013)

devem estar funcionando num universo de 8, em composição com o caminho (*Caminho*) (Figura 26a), sendo respectivamente, 119,9999 h e 0,9999 h. Nesta perspectiva, o Modelo RBD que representa o Sistema BRT (Figura 25), o qual considera a Infra Estrutura e o Veículo (*Veículo*), tem como resultados basilares: MTTF = 117,9775 h, MTTR = 1,0171 h e Disponibilidade: 0,9914522651143357. Ainda é possível descrever que o Downtime anual é de 74,93h.

Sob esta perspectiva, é possível afirmar que o sistema BRT tem alta disponibilidade, no entanto, em um ano, poderá estar inoperante por cerca de três dias, o que pode comprometer a confiança dos usuários no sistema.

Para o cálculo da performabilidade, a partir do modelo CTMC apresentado na Figura 58, dos dados de entrada mostrados na Tabela 23 e na Tabela 22, os resultados são mostrados na Figura 59.

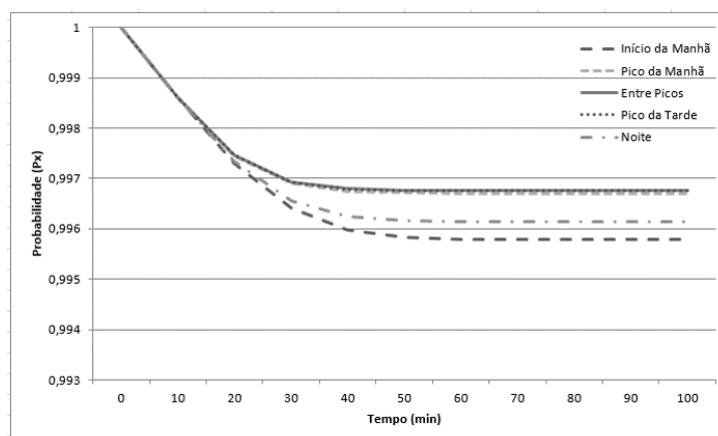


Figura 59 – Performabilidade para o Sistema BRT

É possível perceber na Figura 59 que a performabilidade permanece aproximadamente em 0,99 (dois nozes) em todos os picos avaliados. O resultado que se apresenta menos favorável corresponde ao período *Início da Manhã*, que também apresentou o pior desempenho, um resultado de maneira proporcional à evolução do desempenho dos picos. Desta forma, pode-se afirmar que o impacto da falha é superficial, sendo assim entendido, possivelmente, pelo cálculo ter sido considerado para o tempo de uma viagem.

Assim, para uma avaliação mais completa, foi utilizado o modelo descrito na Figura

29, que considera o Sistema BRT com um sistema de ida e volta da Estação Central até a Estação Final. Os resultados apresentados na Figura 60 mostram a relação da probabilidade de sobrevivência do Sistema BRT considerando que, quando a falha ocorre, o reparo não ocorrerá, ou seja, o sistema entra em Defeito; assim, sendo avaliada uma quantidade maior de viagens já que considera a ida e a volta do veículo.

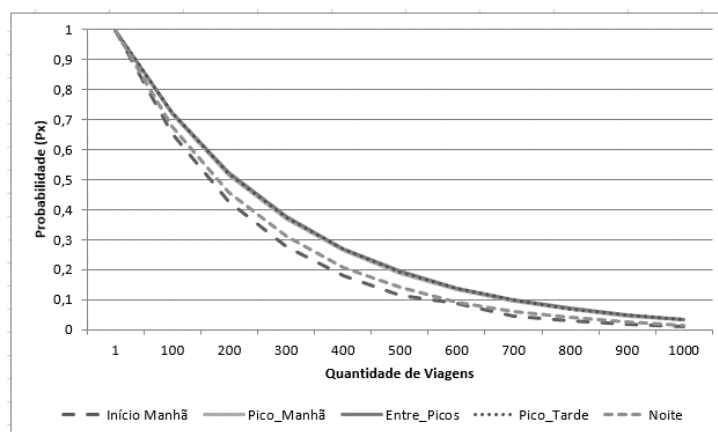


Figura 60 – Performabilidade do sistema considerando o deslocamento constante.

A Figura 60 mostra que, considerando o número de viagens, o Sistema BRT estudado poderia sobreviver a cerca de 1000 viagens, ou seja, considerando que o tempo máximo de viagem não excede 30 minutos e que o tempo de viagem diário de veículo é de 12 horas, o veículo faria 24 viagens. Dessa forma, é possível perceber a necessidade de manutenção do sistema, pois só sobreviveria por aproximadamente 42 dias se não houvesse investimentos em manutenção.

Os Picos *Manhã* e *Noite* teriam um resultado pior, com o sistema entrando em defeito mais rapidamente, já que o tempo de deslocamento desses picos é maior, o que impacta diretamente no processo de operação do sistema.

## 6.2.2 Estudo de Caso 2

No segundo estudo de caso, temos a expansão do caso 1 (Figura 58), considerando os dados do BRT a ser implementado em Recife, citados por (PASSOS, 2015). O Sistema descrito apresenta 22 estações, e será considerado como parâmetro para os deslocamentos de acordo com os valores apresentados na Tabela 24

Mantendo a sistemática de análise para os modelos RBD's, podemos definir o modo operacional do Sistema BRT pela Função Estrutural:  $FuncaoEstrutural = (IE) \times (Veiculo)$ . A Infraestrutura é dada pela função:  $FuncaoEstrutural = (Caminho) \times (Estacao2/22)$ , onde ao menos 2 estações devem estar funcionando no universo de 22. E para definir o funcionamento da estação utilizou-se a seguinte função estrutural:  $FuncaoEstrutural = (Acesso_veiculo1/3) \times (Acesso_estacao1/2)$ .

Tabela 24 – Dados de entrada para CTMC de Performabilidade, Caso 2.

Dado	Valor
23 Km/h	$\alpha_{tt}$ 1.30 min
	$\alpha_{ttw}$ 1.66 min
31 Km/h	$\alpha_{tt}$ 0.97 min
	$\alpha_{ttw}$ 1.33 min
31 Km/h	$\alpha_{tt}$ 0.77 min
	$\alpha_{ttw}$ 1.13 min
$\lambda_{Syst}$ 1/MMTF	1/6666.67 min

Assim, utiliza-se os valores de entrada apresentados na Tabela ???. Para o Modelo RBD da Estação (Figura 26b), sendo o bloco *Acesso\_Veiculo* um *K out of N* 1/3, e o bloco *Acess\_Estacao*, um *K out of N* 1/2, tem-se o MTTF de 41999,9998h e MTTR de 0,0026h. No modelo RBD que avalia a Infra Estrutura (Figura 26a), para que o Sistema esteja operacional ao menos 2 estações, devem estar operando entre as 22 (um bloco *k out of n* 2/22), tem-se o MTTF e MTTR, respectivamente, 112,9032h e 0,9410h. Assim, o modelo a partir do modelo RBD para o Sistema BRT (Figura 26b), é possível descrever: MTTF = 111,1111h, MTTR = 0,9581h e A= 0,9914509022091744; Com um *Downtime* anual de 74,93h.

O modelo de Performabilidade, com a composição das informações apresentadas, mostra os resultados expostos na Figura 61.

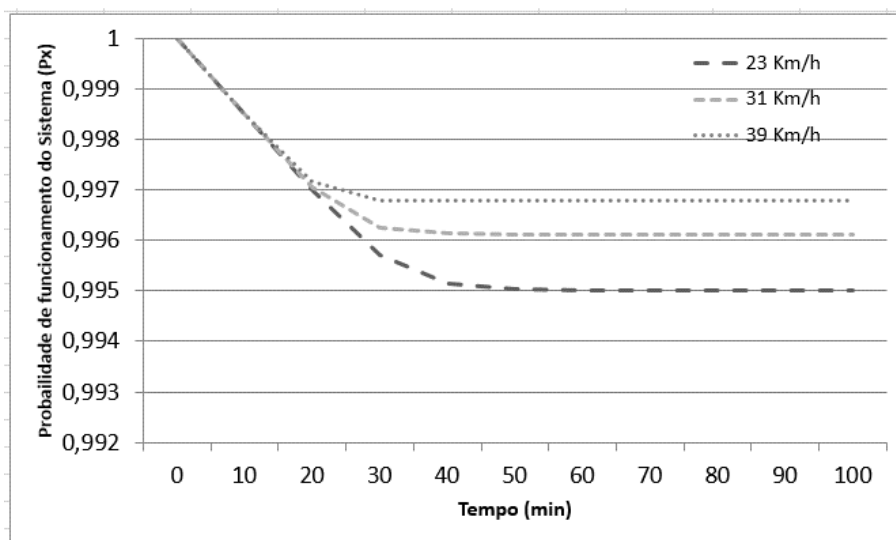


Figura 61 – Performabilidade no Cenário 2.

Pelo exposto na Figura 61, notou-se que a performabilidade é influenciada pela velocidade do veículo na rota, o que pode proporcionar melhores resultados no sistema. Ou seja, o resultado da performabilidade é diretamente proporcional ao desempenho do sistema, com baixo impacto da falha no contexto final.



Considerando que o sistema é de fluxo contínuo, a Figura 62 mostra a baixa taxa de sobrevivência analisando uma grande quantidade de viagens; o sistema de BRT estudado poderia sobreviver a cerca de 1000 viagens, ou seja, considerando que o tempo máximo de viagem não excede 35 minutos e que o tempo de viagem diário do veículo é de 12 horas; assim, o veículo faria 21 viagens por dia. Dessa forma, é possível perceber a necessidade de manutenção do sistema, uma vez que ele só sobreviveria por aproximadamente 48 dias se não houvesse investimentos em sua manutenção.

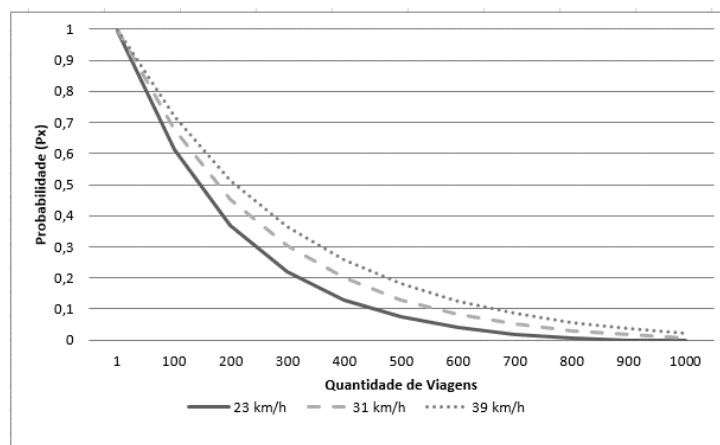


Figura 62 – Performabilidade do sistema considerando viagens constantes, Caso 2.

O Estudo de caso de performabilidade destacou a velocidade como um fator relevante para garantir o alcance do destino no intervalo determinado. Uma vantagem significativa do Sistema BRT é que, uma vez que opera em rota exclusiva e, portanto, não é influenciado pelo tráfego, informações mais precisas sobre os tempos de viagem podem ser repassadas para os usuários, criando, assim, uma confiança no sistema e, conseqüentemente, atraindo mais clientes ao serviço. Assim, através de uma combinação de fatores como velocidade média e número de veículos na rota, o sistema pode ser empregado produtivamente para fornecer um meio de transporte em massa, criando melhores condições de mobilidade nas cidades, diminuindo o número de veículos nas estradas e garantindo que os passageiros possam prever com confiança seus tempos de viagem.

### 6.3 Resultados Alcançados

Os estudos de caso apresentados revelam a aplicabilidade dos modelos de desempenho e performabilidade, emergindo como uma alternativa ao alcance de informações sobre previsibilidade de tempo de chegada e sobre o impacto da falha em sistemas de transportes.

A aplicabilidade do modelo de desempenho proporciona o conhecimento do tempo de alcance de destino, o que para o planejamento de rotas de transporte é fundamental quando se busca oferecer confiança ao usuário de que este não terá comprometimento no seu tempo em virtude de transtornos no transporte, ou mesmo, planejar suas atividades

considerando o período para que esteja no seu destino. O que se mostra diferencial nesta tese, pois demonstra uma forma plausível, conforme relatado nos estudos de caso, de promover o planejamento de STUMPs.

Quanto ao modelo de Performabilidade, este reaciona ao gestor de STUMPs conhecer o impacto da falha no Sistema, de maneira que possa intervir sob a perspectiva de minimizar este impacto. Os modelos RBDs apresentados trazem o entendimento do MTTF, MTTR, disponibilidade e *downtime* do sistema, que proporcionam o conhecimento da possibilidade de falha do sistema, além de ressaltar o tempo em que o sistema estará indisponível. Esta informação deve ser utilizada quando se busca incrementar melhorias no sistema, afinal, quanto menor o tempo que o sistema esteja inoperante, maior o ganho de imagem para este sistema.

Desta forma, estes estudos de caso se mostram importantes sob a perspectiva de melhoria de STUMPS, posto que oferece informações aos gestores que podem minimizar as falhas no Sistema, melhorar o desempenho e diminuir o tempo de inoperância do sistema.

## 7 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

Junto com o desenvolvimento econômico e o crescimento da população, houve um aumento significativo na demanda por transportes em cidades do mundo todo nas últimas décadas. Este fato tem levado a muitos desafios, como congestionamentos, consumo de energia e emissões de veículos, impedindo o desenvolvimento sustentável das cidades. Os formuladores de políticas e pesquisadores tem proposto e adotado políticas para atender à crescente demanda de transporte e, ao mesmo tempo, mitigar as externalidades negativas associadas (DIAO, 2018).

A mobilidade urbana tem se tornado cada vez mais importante, enquanto política pública, muitos investimentos são necessários para garantir os deslocamentos das pessoas. Assim, investir em Transporte Público de qualidade se apresenta como alternativa importante para garantir a mobilidade aos cidadãos.

Neste íterim, é preciso desenvolver alternativas de planejamento que possam possibilitar análises confiáveis para os gestores de transporte, visando oferecer confiabilidade e desempenho, tanto para o sistema, como aumentar a confiança do usuário para fazer a escolha do transporte coletivo com garantias de que irá alcançar o seu destino de maneira segura e no tempo previsto.

Esta tese abordou os fatores fundamentais envolvidos nos sistemas de Transporte de Média Prioridade, que tem bons resultados quanto a quantidade de usuários atendidos e um investimento considerado razoável, ou seja, boa relação custo-benefício, empregando modelos CTMC, RBD e SPN como meio de promover a análise do sistema e melhorar o processo de planejamento, particularmente no que diz respeito à probabilidade de chegada, confiabilidade, performabilidade e desempenho do sistema, sendo o último relacionado, também, ao usuário, com melhores perspectivas com relação à fila. Os modelos permitem que funções matemáticas calculem as probabilidades de arquiteturas correspondentes.

Os resultados mostram que a avaliação do desempenho do sistema de BRT pode fornecer o horário de chegada ao destino, do usuário com a garantia de chegar em um determinado intervalo de tempo previsto. Para a confiabilidade do sistema de BRT, o fator que mais causa impacto é o ônibus, pois tem o menor tempo de sobrevivência. E, do ponto de vista da performabilidade, embora em ambos os estudos haja 'dois noves', a performabilidade é mais afetada pelo tempo de viagem do que pela ocorrência da falha.

Os resultados das métricas de desempenho do STUMP fornecem perspectivas de combinações de headways e quantidades de veículos no sistema, que dão aos gerentes a possibilidade de tomar decisões com base na expectativa do que é uma prioridade em cada sistema. Para o usuário, é possível minimizar a espera, com reduções de filas e,

consequentemente, maior conforto ao viajar para o destino.

O emprego de estudos de caso endossa a importância de modelos para planejar o sistema: eles podem capturar informações sobre a chegada ao destino, o tempo de viagem e as probabilidades de saída do sistema, propriedades das filas, o que pode ajudar a desenvolver possibilidades de investimento e melhorias nos STUMP.

Esta tese alcançou uma série de resultados nas áreas às quais explorou e sua maior contribuição é o conjunto de modelos que podem promover alternativas para o planejamento de Sistemas de Transporte. Sumarizando os resultados podem ser descritos da seguinte maneira:

- Modelos de desempenho visando estimar a probabilidade de alcance de destino e o tempo de chegada de veículos em STUMP;
- Modelos de confiabilidade para avaliar o tempo de falha e a probabilidade do Sistema não entrar em defeito em dado intervalo de tempo;
- Modelo de Performabilidade visando apontar o impacto da falha em STUMP;
- Modelo de desempenho visando corroborar com uma análise sobre a relação usuários - veículos - intervalos de partida e custo (estimado pela literatura), apontando alternativas para planejamento em STUMP;
- Possibilitar ao gestor subsídios, a partir da avaliação das métricas dos modelos, para a tomada de decisão sobre alternativas para planejamento em STUMP.

Esta tese, também, fornece guias para melhorar os sistemas de forma contínua, servindo como suporte em um processo de planejamento da infraestrutura. As técnicas foram testadas por meio de estudos de casos distintos e produziram diversas outras contribuições.

As próximas seções descrevem as principais limitações desta tese e propõem possíveis extensões com trabalhos futuros.

## 7.1 Limitações

Mesmo com a proposição de diversos modelos e os resultados alcançados, esta tese possui algumas limitações.

A principal limitação é que o modelo de desempenho para métricas estacionárias, por ser uma SPN e ter muitos estados, embora seja analisável, só se conseguiu resolver por simulação, dado a grande quantidade de recursos necessários para a resolução do modelo.

Outra limitação foi que, embora na literatura existam muitos estudos sobre Sistemas de Transporte de Média Prioridade, pouco se teve acesso a dados brutos dos sistemas de transporte, principalmente os BRT's, que estão em forte expansão no Brasil, o que poderia aproximar os resultados ainda mais da realidade local.

## 7.2 Trabalhos futuros

Embora esta tese tenha alcançado diversos resultados e coberto alguns pontos relacionados ao planejamento de transportes de média prioridade, existem possibilidade de estender o trabalho atual. Algumas dessas possibilidades podem ser implementados em trabalhos futuros, os quais estão listadas abaixo:

A criação de uma interface gráfica que possibilite gestores, mesmo que não conhecendo detalhadamente sobre modelagem, que possam de maneira simples lançar dados e obter resultados, ou seja, criar um programa de planejamento de sistemas de transporte com as proposições desta tese.

É possível estender os resultados desta tese através da avaliação de outras métricas, como a disponibilidade, que foi pouco aprofundada, além de avaliações de custo, que também foi tratada muito superficialmente nesta tese.

Outro fator que pode ser trabalhado é o envelhecimento do sistema, considerando a taxa de falha crescente, com a composição de dados e criação de novos cenários para avaliação, o que permitiria a avaliação do impacto desse no tempo de sobrevivência do sistema.

Assim, a utilização de novas abordagens, a partir dos modelos já existentes, podem promover mais subsídios para o planejamento de Sistemas de Transporte e ampliar os resultados desta tese.

# REFERÊNCIAS

- AHMAD, K.; AFOLABI, S.; NDA, M.; DAURA, H. Economic benefit of introducing a bus rapid transit (brt) in kano state nigeria. In: IOP PUBLISHING. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. [S.l.], 2018. v. 140, n. 1, p. 012093.
- ALVES, G. Modelagem e avaliação de desempenho operacional e ambiental em cadeias de suprimentos verdes. 2013.
- ANTP, A. N. d. T. P. *CUSTOS DOS SERVIÇOS DE TRANSPORTE PÚBLICO POR ÔNIBUS: MÉTODO DE CÁLCULO*. [S.l.], 2017.
- ARIAS, C.; CASTRO, A.; COLOMBINI, W.; CUSTODIO, P.; DIAZ, J.; FJELLSTROM, K.; HIDALGO, D.; HOOK, W.; KING, M.; WEI, L. et al. Manual de brt: Guia de planejamento (bus rapid transit manual). *Ministerio das Cidades (Brazilian Ministry of Cities), ITDP, Brasília, DF, Brazil*, 2008.
- AVILA-TORRES, P.; CABALLERO, R.; LITVINCHEV, I.; LOPEZ-IRARRAGORRI, F.; VASANT, P. The urban transport planning with uncertainty in demand and travel time: a comparison of two defuzzification methods. *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing*, Springer, v. 9, n. 3, p. 843–856, 2018.
- AVIZIENIS, A.; LAPRIE, J.-C.; RANDELL, B. et al. *Fundamental concepts of dependability*. [S.l.]: University of Newcastle upon Tyne, Computing Science, 2001.
- BAUSE, F.; BUCHHOLZ, P.; FISCHER, M.; KEMPER, P. Hybrid performability analysis of logistic networks. In: ACM. *Proceedings of the eighteenth workshop on Parallel and distributed simulation*. [S.l.], 2004. p. 131–138.
- BEAMON, B. M. Performance, reliability, and performability of material handling systems. *International Journal of Production Research*, Taylor & Francis, v. 36, n. 2, p. 377–393, 1998.
- BEIRÃO, G.; CABRAL, J. S. Understanding attitudes towards public transport and private car: A qualitative study. *Transport policy*, Elsevier, v. 14, n. 6, p. 478–489, 2007.
- BOLCH, G.; GREINER, S.; MEER, H. de; TRIVEDI, K. S. *Queueing networks and Markov chains: modeling and performance evaluation with computer science applications*. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2006.
- BRASIL, A. *Transporte público ruim afeta saúde, educação e cultura, dizem analistas*. 2016. Disponível em: <<https://noticias.terra.com.br/brasil/transito/transporte-publico-ruim-afeta-saude-educacao-e-cultura-dizem-analistas,2c8aa6faad0bf310VgnCLD2000000ec6eb0aRCRD.html>>.
- BRASIL, M. *Trilhos urbanos no Brasil*. Mobilize Brasil, 2017. Disponível em: <<https://www.mobilize.org.br/estatisticas/48/trilhos-urbanos-no-brasil.html>>.
- BRTDATA, G. *Global BRT Data*. [S.l.]: <https://brtdata.org/>, August, 2018., 2017.

- CASSANDRAS, C. G.; LAFORTUNE, S. *Introduction to discrete event systems*. [S.l.]: Springer Science & Business Media, 2009.
- DANTAS, J.; MATOS, R.; ARAUJO, J.; MACIEL, P. An availability model for eucalyptus platform: An analysis of warm-standby replication mechanism. In: IEEE. *Systems, Man, and Cybernetics (SMC), 2012 IEEE International Conference on*. [S.l.], 2012. p. 1664–1669.
- DANTAS, R.; DANTAS, J.; MELO, C.; MACIEL, P.; ALVES, G. A performability model for the brt system. In: IEEE. *Systems Conference (SysCon), 2018 Annual IEEE International*. [S.l.], 2018. p. 1–8.
- DENG, T.; NELSON, J. D. Bus rapid transit implementation in beijing: An evaluation of performance and impacts. *Research in Transportation Economics*, Elsevier, v. 39, n. 1, p. 108–113, 2013.
- DESROCHERS, A. A. Applications of petri nets in manufacturing systems: Modeling. *Control and performance Analysis*, IEEE press, 1995.
- DIAO, M. Towards sustainable urban transport in singapore: Policy instruments and mobility trends. *Transport Policy*, Elsevier, 2018.
- DIAZ, R. *Characteristics of bus rapid transit for decision-making*. [S.l.]: Federal Transit Administration, 2004.
- DUDUTA, N.; STEIL, C. A.; WASS, C.; HIDALGO, D.; LINDAU, L.; JOHN, V. *Traffic safety on bus priority systems: recommendations for integrating safety into the planning, design, and operation of major bus routes*. [S.l.], 2015.
- EQUIPMENT, V. C. *Protecao da disponibilidade mecanica de desempenho*. [S.l.], 2013.
- GIRAULT, C.; VALK, R. *Petri nets for systems engineering: a guide to modeling, verification, and applications*. [S.l.]: Springer, 2003.
- GITTENS, A.; SHALABY, A. Evaluation of bus reliability measures and development of a new composite indicator. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, Transportation Research Board of the National Academies, n. 2533, p. 91–99, 2015.
- GOOGLE. *Pesquisa do Termos: Problemas no Transporte Público*. Google, 2018. Disponível em: <[https://www.google.com.br/search?q=Problemas+no+Transporte+P%C3%BAblico&rlz=1C1CHBF\\_enBR780BR780&source=lnms&tbm=nws&sa=X&ved=0ahUKEwj\\_8NPftndAhXBQ5AKHQOIAKoQ\\_AUIDygC&biw=1093&bih=526](https://www.google.com.br/search?q=Problemas+no+Transporte+P%C3%BAblico&rlz=1C1CHBF_enBR780BR780&source=lnms&tbm=nws&sa=X&ved=0ahUKEwj_8NPftndAhXBQ5AKHQOIAKoQ_AUIDygC&biw=1093&bih=526)>.
- GROUP, M. A. *Pedestrian Gates - MPH 112*. [S.l.], 2013.
- HAO, X.; JIN, W.; YANG, Y. Scheduling combination optimization research for bus lane line. *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science*, v. 12, n. 1, p. 809–817, 2014.
- HAVERKORT, B. R. *Performability modelling: techniques and tools*. [S.l.]: John Wiley & Sons Inc, 2001.

- HEILIG, L.; VOSS, S. A scientometric analysis of public transport research. *Journal of Public Transportation*, v. 18, n. 2, p. 8, 2015.
- HERZOG, U. Formal methods for performance evaluation. In: *Lectures on Formal Methods and Performance Analysis*. [S.l.]: Springer, 2001. p. 1–37.
- HISCOCK, R.; MACINTYRE, S.; KEARNS, A.; ELLAWAY, A. Means of transport and ontological security: Do cars provide psycho-social benefits to their users? *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, Elsevier, v. 7, n. 2, p. 119–135, 2002.
- HOOK, W.; WRIGHT, L. et al. Bus rapid transit: planning guide (online version). *Institute for Transportation and Development Policy (ITDP)* <<https://brtguide.itdp.org/branchmasterguide>, 2016.
- HUO, Y.; ZHAO, J.; LI, W.; HU, X. Measuring bus service reliability: An example of bus rapid transit in changzhou. *Journal of Public Transportation*, v. 17, n. 2, p. 6, 2014.
- INGVARDSON, J. B.; JENSEN, J. Implementation of bus rapid transit in copenhagen based on international experiences. In: *Annual Transport Conference at Aalborg University, Kgs. Lyngby, Denmark: Masters Thesis at the Technical University of Denmark, DTU Transport, Aalborg University*. [S.l.: s.n.], 2012. p. 15.
- JAIN, R. The art of computer system performance analysis: techniques for experimental design, measurement, simulation and modeling. *New York: John Wiley*, 1991.
- JÚNIOR, R. d. S. M.; GUIMARAES, A. P.; CAMBOIM, K. M.; MACIEL, P. R.; TRIVEDI, K. S. Sensitivity analysis of availability of redundancy in computer networks. *CTRQ 2011*, Citeseer, p. 122, 2011.
- JUNIOR, R. M. *An automated approach for systems performance and dependability improvement through sensitivity analysis of markov chains*. Tese (Doutorado) — Masters thesis, FEDERAL UNIVERSITY OF PERNAMBUCO CENTER OF INFORMATICS, 2011.
- KUO, W.; ZUO, M. J. *Optimal reliability modeling: principles and applications*. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2003.
- LAO, Y.; LIU, L. Performance evaluation of bus lines with data envelopment analysis and geographic information systems. *Computers, Environment and Urban Systems*, Elsevier, v. 33, n. 4, p. 247–255, 2009.
- LAPRIE, J.-C. *Dependability: Basic concepts and terminology*. [S.l.]: Springer, 1992.
- LILJA, D. J. *Measuring computer performance: a practitioner's guide*. [S.l.]: Cambridge university press, 2005.
- LIMA, M. A. de Q.; MACIEL, P. R.; SILVA, B.; GUIMARÃES, A. P. Performability evaluation of emergency call center. *Performance Evaluation*, Elsevier, v. 80, p. 27–42, 2014.
- LINDAU, L. A.; HIDALGO, D.; LOBO, A. de A. Barriers to planning and implementing bus rapid transit systems. *Research in Transportation Economics*, Elsevier, v. 48, p. 9–15, 2014.



- LINDEMANN, C. Performance modelling with deterministic and stochastic petri nets. *ACM SIGMETRICS Performance Evaluation Review*, ACM, v. 26, n. 2, p. 3, 1998.
- LOPEZ, D.; TRIANA, A.; CHAMORRO, H. Simulation model of public transportation system using multiagent approach by means of petri nets: Bogotá study case. In: *IEEE. Robotics symposium, 2011 IEEE IX Latin American and IEEE Colombian conference on automatic control and industry applications (LARC)*. [S.l.], 2011. p. 1–6.
- MACIEL, P.; TRIVEDI, K. S.; MATIAS, R.; KIM, D. S. Dependability modeling. In: *Performance and Dependability in Service Computing: Concepts, Techniques and Research Directions*. Hershey: IGI Global, 2011.
- MACIEL, P. R.; LINS, R. D.; CUNHA, P. R. *Introdução às redes de Petri e aplicações*. [S.l.]: UNICAMP-Instituto de Computacao, 1996.
- MARSAN, M. A.; BALBO, G.; CONTE, G.; DONATELLI, S.; FRANCESCHINIS, G. Modelling with generalized stochastic petri nets. *ACM SIGMETRICS Performance Evaluation Review*, ACM, v. 26, n. 2, p. 2, 1998.
- MELO, R. M. D. *ANÁLISE DE SENSIBILIDADE APLICADA À IDENTIFICAÇÃO DE PONTOS QUE REQUEREM MELHORIA NA DISPONIBILIDADE EM INFRAESTRURA DE CLOUD*. Tese (Doutorado) — Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Informática, Doutorado em Ciência da Computação,, Recife, 2017.
- MENASCE, D. A.; ALMEIDA, V. A.; DOWDY, L. W.; DOWDY, L. *Performance by design: computer capacity planning by example*. [S.l.]: Prentice Hall Professional, 2004.
- MEYER, J. F. On evaluating the performability of degradable computing systems. *IEEE Transactions on computers*, IEEE, v. 100, n. 8, p. 720–731, 1980.
- MEYER, J. F. Performability: a retrospective and some pointers to the future. *Performance evaluation*, Elsevier, v. 14, n. 3, p. 139–156, 1992.
- MURATA, T. Petri nets: Properties, analysis and applications. *Proceedings of the IEEE*, IEEE, v. 77, n. 4, p. 541–580, 1989.
- NASCIMENTO, A.; ALVES, G.; SOUSA, E.; NOGUEIRA, B.; TAVARES, E. Transport mode assessment for inbound logistics: A study based on coffee industry. In: *2014 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (SMC)*. [S.l.: s.n.], 2014.
- OLIVEIRA, D.; BRINKMANN, A.; MACIEL, P. Advanced stochastic petri net modeling with the mercury scripting language. In: *ValueTools, 11th EAI International Conference on Performance Evaluation Methodologies and Tools*. [S.l.: s.n.], 2017.
- OORT, N. V. Incorporating enhanced service reliability of public transport in cost-benefit analyses. *Public Transport*, Springer, v. 8, n. 1, p. 143–160, 2016.
- OU, Y.; DUGAN, J. B. Approximate sensitivity analysis for acyclic markov reliability models. *IEEE Transactions on Reliability*, IEEE, v. 52, n. 2, p. 220–230, 2003.
- PANCHORE, V.; KHUSHWAHA, N. Performance evaluation of brts. *IJSTE - International Journal of Science Technology & Engineering*, v. 2, n. 11, p. 509–512, 2016.

- PASSOS, T. *Acessibilidade é um dos pontos fracos do BRT do Recife no Norte-Sul (Accessibility is a weakness of Recife BRT North-South)*. [S.l.]: Jornal do Comercio on line, 2015.
- PERRY, J. L.; BABITSKY, T. T. Comparative performance in urban bus transit: Assessing privatization strategies. *Public Administration Review*, JSTOR, p. 57–66, 1986.
- PETRI, C. A. *Kommunikation mit automaten*. 1962.
- PEÑA, A. J. F. J.; MATEOS, A. A first approach to the optimization of bogotas transmilenio brt system. In: *Society 40 th Anniversary Workshop–FORS40*. [S.l.]: LUT Scientific and Expertise Publications, 2013. v. 24, p. 94–104.
- POLUS, A. Modeling and measurements of bus service reliability. *Transportation Research*, Elsevier, v. 12, n. 4, p. 253–256, 1978.
- RAMALHO, G. *Brasil perde R\$ 267 bilhões por ano com congestionamentos*. Globo News - G1, 2018. Disponível em: <<https://g1.globo.com/globonews/noticia/2018/08/07/brasil-perde-r-267-bi-por-ano-com-congestionamentos.ghtml>>.
- RECIFE, C. G. *Pesquisa Origem-Destino 2010*. <<http://www.granderecife.pe.gov.br/sitegrctm/transporte/pesquisas/origem-e-destino/>>. Acess 08/09/2018.
- REIBMAN, A. L. Modeling the effect of reliability on performance. *Reliability, IEEE Transactions on*, IEEE, v. 39, n. 3, p. 314–320, 1990.
- SAHNER, R. A.; TRIVEDI, K. S. Reliability modeling using sharpe. *IEEE Transactions on Reliability*, IEEE, v. 36, n. 2, p. 186–193, 1987.
- SALTELLI, A.; TARANTOLA, S.; CAMPOLONGO, F.; RATTO, M. *Sensitivity analysis in practice: a guide to assessing scientific models*. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2004.
- SCHMID, V. Hybrid large neighborhood search for the bus rapid transit route design problem. *European Journal of Operational Research*, Elsevier, v. 238, n. 2, p. 427–437, 2014.
- SHAH, W.; SHAH, S. A. A.; KUMAR, W.; SAHITO, A. R.; MAHAR, R. B.; BROHI, K. M.; KHANZADA, T. J. S.; JAFFARI, N. A.; ZARDARI, Z. A.; KUMAR, W. et al. Performance evaluation of controlled arrival rate system through matrix geometric method using transient analysis. *Performance Evaluation*, v. 32, n. 3, 2013.
- SHETH, C.; TRIANTIS, K.; TEODOROVIĆ, D. Performance evaluation of bus routes: A provider and passenger perspective. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, Elsevier, v. 43, n. 4, p. 453–478, 2007.
- SILAEN, S. K.; NASUTION, A. D.; SUWANTORO, H. Public preference for new service network plan brt trans mebidang (route: Pancurbatu - sambu market center). *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, v. 420, n. 1, p. 012010, 2018. Disponível em: <<http://stacks.iop.org/1757-899X/420/i=1/a=012010>>.
- SILVA, B.; MATOS, R.; CALLOU, G.; FIGUEIREDO, J.; OLIVEIRA, D.; FERREIRA, J.; DANTAS, J.; LOBO, A.; ALVES, V.; MACIEL, P. Mercury: An integrated environment for performance and dependability evaluation of general systems. In: *Proceedings of Industrial Track at 45th Dependable Systems and Networks Conference, DSN*. [S.l.: s.n.], 2015.

- SOUSA, E. d. *Avaliação do impacto de uma política de manutenção na performabilidade de sistemas de transferência eletrônica de fundos*. Tese (Doutorado) — Dissertação, Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Informática, 2009.
- SOUSA, E. T. G. d. *MODELAGEM DE DESEMPENHO, DEPENDABILIDADE E CUSTO PARA O PLANEJAMENTO DE INFRAESTRUTURAS DE NUUVENS PRIVADAS*. Tese (Doutorado) — Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Informática, Doutorado em Ciência da Computação,, Recife, 2015.
- STEWART, W. J. *Introduction to the numerical solutions of Markov chains*. [S.l.]: Princeton Univ. Press, 1994.
- STEWART, W. J. *Probability, Markov chains, queues, and simulation: the mathematical basis of performance modeling*. [S.l.]: Princeton University Press, 2009.
- THORLACIUS, P.; LAHRMANN, H.; PITTELKOW, A. Time-and-space modelling of public transport systems using gis. *Trafikdage på AUC*, 1998.
- (US), S. S. H. R. P.; SYSTEMATICS, C.; GROUP, H. S. C. *Performance measurement framework for highway capacity decision making*. [S.l.]: Transportation Research Board of the National Academies, 2009.
- VASUDEVAN, P.; MULUKUTLA, P.; BHATT, A.; ROY, A.; PRABHU, A.; MASCARENHAS, B.; PANDEY, M.; CHAUDHARY, N.; BACHU, P. K.; SHASTRY, S. et al. *Bus karo 2.0 case studies from india*. 2014.
- VISWANADHAM, N.; RAM, R. Composite performance-dependability analysis of cellular manufacturing systems. *IEEE transactions on robotics and automation*, IEEE, v. 10, n. 2, p. 245–258, 1994.
- VUCHIC, V. R. *Urban transit systems and technology*. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2007.
- WRIGHT, L. *Bus rapid transit*. Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit (GTZ), 2002.
- XIE, M.; DAI, Y.-S.; POH, K.-L. *Computing system reliability: models and analysis*. [S.l.]: Springer Science & Business Media, 2004.
- ZHANG, C.; JUAN, Z.; LUO, Q.; XIAO, G. Performance evaluation of public transit systems using a combined evaluation method. *Transport Policy*, Elsevier, v. 45, p. 156–167, 2016.
- ZHENG, L.; JIAQING, W. Summary of the application effect of bus rapid transit at beijing south-centre corridor of china. *Journal of Transportation Systems Engineering and information technology*, Elsevier, v. 7, n. 4, p. 137–142, 2007.
- ZUO, X.; CHEN, C.; TAN, W.; ZHOU, M. Vehicle scheduling of an urban bus line via an improved multiobjective genetic algorithm. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, IEEE, v. 16, n. 2, p. 1030–1041, 2015.

# APÊNDICE A – SCRIPT PARA AVALIAÇÃO DE MÉTRICAS DE DESEMPENHO EM SISTEMAS DE TRANSPORTE DE MÉDIA PRIORIDADE

Este apêndice apresenta em detalhes o *script* utilizado para avaliação do modelo de desempenho e verificação do modelo SPN 24. Vale ressaltar que as métricas de desempenho avaliadas são: Tamanho Médio do Sistema (MSS), Tamanho Médio da Fila (MQS), Tempo Médio de Fila (MQT), Utilização, Vazão e Probabilidade de Descarte. O Modelo SPN em linguagem de *script* traduzido pela ferramenta @Mercury (SILVA et al., 2015) (OLIVEIRA; BRINKMANN; MACIEL, 2017).

Listing A.1 – SPN Evaluation Script

```

1
  acs = 46.0;
3  t1_1 = 56.0;
  t1_2 = 71.0;
5  t0 = 44.0;
  t3 = 88.0;
7  t8 = 360.0;
  tib = 3.0;
9  t2_1 = 3.0;
  t2_2 = 3.0;
11 t1 = 3.0;
  t4 = 3.0;
13 t6 = 3.0;
  tbd = 480.0;
15 tJSTCF = 235.0;
  t3_1 = 235.0;
17 t3_2 = 235.0;
  t2 = 235.0;
19 t5 = 235.0;
  t7 = 235.0;
21
  SPN Model{
23
    place A_CS( tokens= 1 );
25    place B_B_ISC( tokens= 2 );
    place B_CS( tokens= 300 );
27    place B_ISC;
    place B_P_SC;
29    place Buffer_Bus( tokens= 5 );
    place I_CS;
31    place P1_1( tokens= 1 );
    place P1_2( tokens= 1 );

```

```
33     place P1_3( tokens= 1 );
      place P1_4( tokens= 1 );
35     place P1_5( tokens= 1 );
      place P21;
37     place P2_1;
      place P2_2;
39     place P2_3;
      place P2_4;
41     place P2_5;
      place P31;
43     place P32;
      place P3_1;
45     place P3_2;
      place P3_3;
47     place P3_4;
      place P3_5;
49     place P4_1( tokens= 300 );
      place P4_2( tokens= 300 );
51     place P4_3( tokens= 300 );
      place P4_4( tokens= 300 );
53     place P4_5( tokens= 300 );
      place P5_1;
55     place P5_2;
      place P5_3;
57     place P5_4;
      place P5_5;
59     place P6_1;
      place P6_2;
61     place P6_3;
      place P6_4;
63     place P6_5;
      place P7_1;
65     place P7_2;
      place P7_3;
67     place P7_4;
      place P7_5;
69     place P8_1;
      place P8_2;
71     place P8_3;
      place P8_4;
73     place P8_5;
      place P9_1( tokens= 2 );
75     place P9_2( tokens= 2 );
      place P9_3( tokens= 2 );
77     place P9_4( tokens= 2 );
      place P9_5( tokens= 2 );
79     place Q_CS;
      place Station_Central;
81
83     immediateTransition TI0(
      weight = 0.22,
85     inputs = [P6_3],
      outputs = [P5_3],
87     inhibitors = [P7_3]
      );
89
```

```

    immediateTransition TI1(
91     weight = 0.78,
        inputs = [P6_3("IF(#P6_3>=1):(#P6_3)ELSE(1)"]],
93     outputs = [P7_3("#P6_3")],
        inhibitors = [P7_3]
95 );

97     immediateTransition TI10(
        inputs = [P21("#P21"), P31("IF(#P31>=1):(#P31)ELSE(1)"), P32],
99     outputs = [Buffer_Bus]
        );
101
    immediateTransition TI1_1(
103     inputs = [P2_1, P4_1],
        outputs = [P1_1, P3_1]
105 );

107     immediateTransition TI1_2(
        inputs = [P2_2, P4_2],
109     outputs = [P1_2, P3_2]
        );
111
    immediateTransition TI2(
113     inputs = [P2_3, P4_3],
        outputs = [P1_3, P3_3]
115 );

117     immediateTransition TI2_1(
        weight = 0.01,
119     inputs = [P6_1],
        outputs = [P5_1],
121     inhibitors = [P7_1]
        );
123
    immediateTransition TI2_2(
125     weight = 0.12,
        inputs = [P6_2],
127     outputs = [P5_2],
        inhibitors = [P7_2]
129 );

131     immediateTransition TI3(
        weight = 0.15,
133     inputs = [P6_4],
        outputs = [P5_4],
135     inhibitors = [P7_4]
        );
137
    immediateTransition TI3_1(
139     weight = 0.99,
        inputs = [P6_1("IF(#P6_1>=1):(#P6_1)ELSE(1)"]],
141     outputs = [P7_1("#P6_1")],
        inhibitors = [P7_1]
143 );

145     immediateTransition TI3_2(
        weight = 0.88,

```

```

147     inputs = [P6_2("IF(#P6_2>=1):(#P6_2)ELSE(1)"]],
        outputs = [P7_2("#P6_2")],
149     inhibitors = [P7_2]
    );
151
152     immediateTransition TI4(
153     weight = 0.85,
        inputs = [P6_4("IF(#P6_4>=1):(#P6_4)ELSE(1)"]],
155     outputs = [P7_4("#P6_4")],
        inhibitors = [P7_4]
157     );
159
160     immediateTransition TI5(
        inputs = [P2_4, P4_4],
161     outputs = [P1_4, P3_4]
    );
163
164     immediateTransition TI7(
165     weight = 0.24,
        inputs = [P6_5],
167     outputs = [P5_5],
        inhibitors = [P7_5]
169     );
171
172     immediateTransition TI8(
        weight = 0.76,
173     inputs = [P6_5("IF(#P6_5>=1):(#P6_5)ELSE(1)"]],
        outputs = [P7_5("#P6_5")],
175     inhibitors = [P7_5]
    );
177
178     immediateTransition TI9(
179     inputs = [P2_5, P4_5],
        outputs = [P1_5, P3_5]
181     );
183
184     immediateTransition TI_CS(
        inputs = [I_CS, B_CS],
185     outputs = [A_CS, Q_CS]
    );
187
188     timedTransition TE0(
189     inputs = [P1_3],
        outputs = [P2_3],
191     delay = t0
    );
193
194     timedTransition TE1(
195     inputs = [P3_3, P5_3],
        outputs = [P4_3, P7_3],
197     delay = t1
    );
199
200     timedTransition TE1_1(
201     inputs = [P1_1],
        outputs = [P2_1],
203     delay = t1_1
    );

```

```

);
205
    timedTransition TE1_2(
207         inputs = [P1_2],
            outputs = [P2_2],
209         delay = t1_1
    );
211
    timedTransition TE2(
213         inputs = [P5_3("IF(#P8_3>1):((#P5_3)-50)ELSE(#P5_3)"), P7_3("IF(#P7_3>=1):(#
            P7_3)ELSE(0)"), P8_3, P9_4],
            outputs = [P9_3, P6_4("#P7_3"), P5_4("IF(#P8_3>1):((#P5_3)-50)ELSE(#P5_3)"),
                P8_4],
215         delay = t2
    );
217
    timedTransition TE2_1(
219         inputs = [P5_1, P3_1],
            outputs = [P4_1, P7_1],
221         delay = t2_1
    );
223
    timedTransition TE2_2(
225         inputs = [P5_2, P3_2],
            outputs = [P4_2, P7_2],
227         delay = t2_2
    );
229
    timedTransition TE3(
231         inputs = [P1_4],
            outputs = [P2_4],
233         delay = t3
    );
235
    timedTransition TE3_1(
237         inputs = [P8_1, P5_1("IF(#P8_1>1):((#P5_1)-50)ELSE(#P5_1)"), P7_1("IF(#P7_1
            >=1):(#P7_1)ELSE(0)"), P9_2],
            outputs = [P9_1, P6_2("#P7_1"), P5_2("IF(#P8_1>1):((#P5_1)-50)ELSE(#P5_1)"),
                P8_2],
239         delay = t3_1
    );
241
    timedTransition TE3_2(
243         inputs = [P7_2("IF(#P7_2>=1):(#P7_2)ELSE(0)"), P8_2, P5_2("IF(#P8_2>1):((#
            P5_2)-50)ELSE(#P5_2)"), P9_3],
            outputs = [P9_2, P5_3("IF(#P8_2>1):((#P5_2)-50)ELSE(#P5_2)"), P6_3("#P7_2"),
                P8_3],
245         delay = t3_2
    );
247
    timedTransition TE4(
249         inputs = [P3_4, P5_4],
            outputs = [P4_4, P7_4],
251         delay = t4
    );
253
    timedTransition TE5(

```



```

255     inputs = [P5_4("IF(#P8_4>1):((#P5_4)-50)ELSE(#P5_4)"), P7_4("IF(#P7_4>=1):(#
        P7_4)ELSE(0)"), P8_4, P9_5],
        outputs = [P9_4, P5_5("IF(#P8_4>1):((#P5_4)-50)ELSE(#P5_4)"), P6_5("#P7_4"),
        P8_5],
257     delay = t5
        );
259
260     timedTransition TE6(
261         inputs = [P5_5, P3_5],
                outputs = [P4_5, P7_5],
263         delay = t6
        );
265
266     timedTransition TE7(
267         inputs = [P5_5("IF(#P8_5>1):((#P5_5)-50)ELSE(#P5_5)"), P8_5, P7_5("IF(#P7_5
                >=1):(#P7_5)ELSE(0)"),
                outputs = [P9_5, P21("IF(#P8_5>1):((#P5_5)-50)ELSE(#P5_5)"), P31("#P7_5"),
                P32],
269         delay = t7
        );
271
272     timedTransition TE8(
273         inputs = [P1_5],
                outputs = [P2_5],
275         delay = t8
        );
277
278     timedTransition T_ACS(
279         inputs = [A_CS],
                outputs = [I_CS],
281         delay = acs
        );
283
284     timedTransition T_BD(
285         inputs = [B_B_ISC, Buffer_Bus],
                outputs = [B_ISC, B_P_SC(50)],
287         delay = tbd
        );
289
290     timedTransition T_IB(
291         inputs = [Q_CS, B_P_SC],
                outputs = [B_CS, Station_Central],
293         delay = tib
        );
295
296     timedTransition T_JSCTF(
297         inputs = [B_ISC, Station_Central("IF(#Station_Central>=1):(#Station_Central)
                ELSE(0)"), B_P_SC("IF(#B_ISC>1):((#B_P_SC)-50)ELSE(#B_P_SC)"), P9_1],
                outputs = [B_B_ISC, P6_1("#Station_Central"), P8_1, P5_1("IF(#B_ISC>1):((#
                B_P_SC)-50)ELSE(#B_P_SC)"),
299         delay = tJSCTF
        );
301
302     metric descartsc = stationarySimulation( expression = "P{(#B_P_SC=0)AND(#Q_CS
                >=1)}" );
303     metric descst1 = stationarySimulation( expression = "P{(#P5_1=0)AND(#P3_1>=1)}"
        );

```

```

metric descst2 = stationarySimulation( expression = "P{(#P5_2=0)AND(#P3_2>=1)}"
);
305 metric descst3 = stationarySimulation( expression = "P{(#P5_3=0)AND(#P3_3>=1)}"
);
metric desc4 = stationarySimulation( expression = "P{(#P5_4=0)AND(#P3_4>=1)}" );
307 metric desc5 = stationarySimulation( expression = "P{(#P5_5=0)AND(#P3_5>=1)}" );
metric mss = stationarySimulation( expression = "(E{#Station_Central})+(E{#Q_CS
})+(E{#P3_1})+(E{#P7_1})+(E{#P3_2})+(E{#P7_2})+(E{#P3_3})+(E{#P7_3})+(E{#
P3_4})+(E{#P7_4})+(E{#P3_5})+(E{#P7_5})+(E{#P31})" );
309 metric mqs = stationarySimulation( expression = "(E{#Q_CS})+(E{#P3_1})+(E{#P3_2
})+(E{#P3_3})+(E{#P3_4})+(E{#P3_5})+(E{#P31})" );
metric mqt = stationarySimulation( expression = "(E{#Q_CS}*1/3)+(E{#P3_1}*1/3)+(
E{#P3_2}*1/3)+(E{#P3_3}*1/3)+(E{#P3_4}*1/3)+(E{#P3_5}*1/3)+(E{#P31}*1/3)" );
311 metric ths = stationarySimulation( expression = "E{#Station_Central}*(1/267)" );
metric th1 = stationarySimulation( expression = "E{#P7_1}*(1/267)" );
313 metric th2 = stationarySimulation( expression = "E{#P7_2}*(1/267)" );
metric th3= stationarySimulation( expression = "E{#P7_3}*(1/267)" );
315 metric th4 = stationarySimulation( expression = "E{#P7_4}*(1/267)" );
metric th5 = stationarySimulation( expression = "E{#P7_5}*(1/267)" );
317 metric utilizationsc = stationarySimulation( expression = "E{#Station_Central
}/((E{#Station_Central})+(E{#B_P_SC}))" );
metric utilization1 = stationarySimulation( expression = "E{#P7_1}/((E{#P7_1})+(
E{#P5_1}))" );
319 metric utilization2 = stationarySimulation( expression = "E{#P7_2}/((E{#P7_2})+(
E{#P5_2}))" );
metric utilization3 = stationarySimulation( expression = "E{#P7_3}/((E{#P7_3})+(
E{#P5_3}))" );
321 metric utilization4 = stationarySimulation( expression = "E{#P7_4}/((E{#P7_4})+(
E{#P5_4}))" );
metric utilization5 = stationarySimulation( expression = "E{#P7_5}/((E{#P7_5})+(
E{#P5_5}))" );
323
}
325
main {
327   descartsc = solve( Model,descartsc );
      println(descartsc);
329
      descst1 = solve( Model,descst1 );
331   println(descst1);
333
      descst2 = solve( Model,descst2 );
      println(descst2);
335
      descst3 = solve( Model,descst3 );
337   println(descst3);
339
      desc4 = solve( Model,desc4 );
      println(desc4);
341
      desc5 = solve( Model,desc5 );
343   println(desc5);
345
      mss = solve( Model,mss );
      println(mss);
347
      ths = solve( Model,ths );

```

```

349     println(th5);

351     th1 = solve( Model, th1 );
        println(th1);

353

355     th2 = solve( Model, th2 );
        println(th2);

357     th3 = solve( Model, th3 );
        println(th3);

359

361     th4 = solve( Model, th4 );
        println(th4);

363     th5 = solve( Model, th5 );
        println(th5);

365

367     utilizationsc = solve( Model, utilizationsc );
        println(utilizationsc);

369     utilization1 = solve( Model, utilization1 );
        println(utilization1);

371

373     utilization2 = solve( Model, utilization2 );
        println(utilization2);

375     utilization3 = solve( Model, utilization3 );
        println(utilization3);

377

379     utilization4 = solve( Model, utilization4 );
        println(utilization4);

381     utilization5 = solve( Model, utilization5 );
        println(utilization5);

383     percentageDifference (
385         model_ = "Model",
            metric_ = "metric",
387         samplingPoints = 10,
            parameters = (
389             acs = [23, 69],
                t1_1 = [28, 84],
391             t1_2 = [36, 107],
                t0 = [22, 66],
393             t3 = [44, 132],
                t8 = [180, 540],
395             tib = [1, 6],
                t2_1 = [1, 6],
397             t2_2 = [1, 6],
                t1 = [1, 6],
399             t4 = [1, 6],
                t6 = [1, 6],
401             tbd = [60, 900],
                tJSCTF = [202.8, 267],
403             t3_1 = [202.8, 267],
                t3_2 = [202.8, 267],
405             t2 = [202.8, 267],

```

```

        t5 = [202.8, 267],
407         t7 = [202.8, 267]
        ),
409     output = (
        type = "R",
411     ylabel = "metric",
        baselineValue = metric,
413     format = "png"
        )
415     );
417
}
```

## APÊNDICE B – TABELAS ADICIONAIS SOBRE A RELAÇÃO DE MÉTRICAS COM O CUSTO

Este apêndice apresenta as tabelas adicionais referentes à relação entre métricas avaliadas e custo operacional diário de um veículo no Sistema BRT.

Tabela 25 – Relação entre as métricas avaliadas e o custo operacional por veículos na rota - Intervalo de Partidas de 60s.

Veículos	Cenários com Intervalo de Partidas de 60s				
	1	3	5	10	15
MMS	<b>1624</b>	198	145	<b>141</b>	147
MQS	<b>1579</b>	98	32	<b>17</b>	19
MQT	<b>526.20</b>	32.76	10.63	<b>5.53</b>	6.36
Utilização Média	<b>0.94405</b>	0.70034	0.48112	0.42315	<b>0.41678</b>
Vazão Média	<b>0.02838</b>	0.06476	0.07001	<b>0.07588</b>	0.07508
Probabilidade de Descarte Média	<b>0.97960</b>	0.65816	0.41434	<b>0.24884</b>	0.25524
Custo Operacional Diário	<b>\$249.58</b>	<b>\$748.74</b>	<b>\$1,247.90</b>	<b>\$2,495.80</b>	<b>\$3,743.70</b>

Tabela 26 – Relação entre as métricas avaliadas e o custo operacional por veículos na rota - Intervalo de Partidas de 120s.

Veículos	Cenários com Intervalo de Partida de 120s				
	1	3	5	10	15
MMS	<b>1653</b>	226	149	144	<b>138</b>
MQS	<b>1609</b>	124	36	<b>18</b>	<b>18</b>
MQT	<b>536.26</b>	41.34	11.93	5.91	<b>5.91</b>
Utilização Média	<b>0.94765</b>	0.70748	0.49773	0.42763	<b>0.42248</b>
Vazão Média	<b>0.02743</b>	0.06423	0.06743	<b>0.07675</b>	0.07544
Probabilidade de Descarte Média	<b>0.98215</b>	0.67362	0.42684	<b>0.26658</b>	0.26281
Custo Operacional Diário	<b>\$249.58</b>	<b>\$748.74</b>	<b>\$1,247.90</b>	<b>\$2,495.80</b>	<b>\$3,743.70</b>

Tabela 27 – Relação entre as métricas avaliadas e o custo operacional por veículos na rota - Intervalo de Partidas de 600s.

Veículos	Cenários com Intervalo de Partida de 600s				
	1	3	5	10	15
MMS	<b>1775</b>	736	370	244	<b>238</b>
MQS	<b>1741</b>	648	268	136	<b>133</b>
MQT	<b>580.23</b>	216.00	89.26	45.36	<b>44.24</b>
Utilização Média	<b>0.95197</b>	0.81470	0.69413	0.61990	<b>0.61706</b>
Vazão Média	<b>0.02168</b>	0.05591	0.06572	0.06653	<b>0.06695</b>
Probabilidade de Descarte Média	<b>0.98816</b>	0.82317	0.68124	<b>0.59584</b>	0.60572
Custo Operacional Diário	<b>\$249.58</b>	<b>\$748.74</b>	<b>\$1,247.90</b>	<b>\$2,495.80</b>	<b>\$3,743.70</b>

Tabela 28 – Relação entre as métricas avaliadas e o custo operacional por veículos na rota - Intervalo de Partidas de 900s.

Veículos	Cenários com Intervalo de Partida de 900s				
	1	3	5	10	15
MMS	<b>1783</b>	975	711	628	<b>613</b>
MQS	<b>1753</b>	897	622	531	<b>517</b>
MQT	<b>584.39</b>	299.161	207.20	177.11	<b>172.41</b>
Utilização Média	<b>0.95126</b>	0.87619	0.80925	<b>0.78182</b>	0.79296
Vazão Média	<b>0.01908</b>	0.04991	0.05690	0.05849	<b>0.06061</b>
Probabilidade de Descarte Média	<b>0.98964</b>	0.88685	0.81722	0.80021	<b>0.78298</b>
Custo Operacional Diário	<b>\$249.58</b>	<b>\$748.74</b>	<b>\$1,247.90</b>	<b>\$2,495.80</b>	<b>\$3,743.70</b>