

# Modelo de Performabilidade para Sistemas de Transporte de Média Prioridade

## *Performability Model for the Medium Priority Transport Systems*

Renata Cristine de Sá Pedrosa Dantas  
Joana Ancila Pessoa Forte Avelino  
Coordenação Acadêmica de Administração  
Instituto Federal de Pernambuco - IFPE  
Recife, Brasil  
[renatadantas@recife.ifpe.edu.br](mailto:renatadantas@recife.ifpe.edu.br),  
[joanaforte@recife.ifpe.edu.br](mailto:joanaforte@recife.ifpe.edu.br)

Jamilson Ramalho Dantas  
Paulo Romero Martins Maciel  
Centro de Informática - CIn  
Universidade Federal de Pernambuco - UFPE  
Recife, Brasil  
[jrd@cin.ufpe.br](mailto:jrd@cin.ufpe.br), [prmm@cin.ufpe.br](mailto:prmm@cin.ufpe.br)

Carlos Melo  
Trybe - Brasil  
[prof.casm@gmail.com](mailto:prof.casm@gmail.com)

**Resumo** — A mobilidade dos grandes centros urbanos vem sendo afetada pelo alto tráfego de veículos, o que demanda dos gestores soluções que possam viabilizar melhorias no transporte público. Uma alternativa que tem se mostrado viável é o investimento em transporte de médias Prioridade, como BRT, VLT, entre outros, 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, melhorando a relação custo-benefício. Avaliar métricas como desempenho, confiabilidade e performabilidade auxiliam no planejamento, monitoramento e otimização dos STUMPs. Este artigo apresenta modelos hierárquicos, usando técnicas de modelagem CTMC, para avaliar métricas como desempenho e performabilidade. Os resultados mostram que esses modelos apontaram os intervalos de pico com maior probabilidade de chegar ao destino em menor tempo, além de mostrar a probabilidade do veículo ser afetado pela falha em cada intervalo. Também foi possível estabelecer bases para a replicação do modelo em diferentes cenários para possibilitar novos estudos comparativos.

**Palavras Chave** - *Performabilidade; CTMC; STUMP.*

**Abstract** — The mobility of large urban centers has been affected by high vehicle traffic, which demands solutions from managers that can enable improvements in public transport. An alternative that has proven to be viable is the investment in medium Priority transport, such as BRT, VLT, among others, as they do not compete directly with other vehicles on the road, and operate on exclusive routes, although in competition with general traffic, with a differentiated fee collection method (before boarding), thus allowing greater confidence in the vehicle at its destination within a planned time interval, improving the cost-benefit ratio. Evaluating metrics such as performance, reliability and performability help in the planning, monitoring and optimization

of STUMPs. This article presents hierarchical models, using CTMC modeling techniques, to evaluate metrics such as performance and performability. The results show that these models pointed out the peak intervals most likely to reach the destination in the shortest time, in addition to showing the probability of the vehicle being affected by the failure in each interval. It was also possible to establish bases for replicating the model in different scenarios to enable new comparative studies.

**Keywords** - *PerformabilityCTMC; STUMP.*

### I. INTRODUÇÃO

As grandes cidades têm enfrentado cada vez mais problemas de transporte devido ao grande número de veículos nas ruas, o que resulta em congestionamentos e, consequentemente, perda de tempo e diminuição na mobilidade urbana. Em alternativa aos cenários de tráfego intenso, os governos têm investido em alternativas 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 [1], 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 [2].

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.

Ingvardson e Jensen [3] desenvolveram um modelo de simulação mesoscópica onde o ônibus operações são modeladas em um nível microscópico, enquanto as interações com outros tráfegos são modeladas macroscopicamente. Este estudo é realizado considerando a implementação do sistema BRT em Copenhague, fazendo combinações de componentes BRT, ou seja, os autores consideram que melhorias no sistema proporcionam maior confiabilidade, o que afeta operação do planejamento do sistema. Embora seja uma proposta válida, os autores a tratam sob a perspectiva da simulação, enquanto o que se propõe neste trabalho é a matemática modelagem (através de Cadeias de Markov) para o planejamento do tratamento de STUMPs. Com uma perspectiva diferente de confiabilidade proposta pelos autores, pois considera a vida útil do equipamento e amplia a perspectiva de análise, considerando o desempenho e a ocorrência de falhas para analisar a performabilidade do sistema.

A avaliação de desempenho nas rotas de ônibus também é trabalhada por [4]. O artigo usa como ferramenta de coleta de dados o Automatic Vehicle Location (AVL), que extrai o dados reais do sistema, como tempos percentuais de viagem, o coeficiente de variação (COV) de tempos de viagem, velocidade comercial média e distribuição do tempo de viagem. A partir desses dados, o estudo busca propor um conjunto de índices de desempenho: Variação do Tempo de Viagem, Adesão no Tempo, Regularidade de Partidas e Correlação de desvios. No entanto, todo o estudo é baseado em dados estatísticos para prever o tempo, que às vezes esses dados não estão disponíveis para os gerentes, o que dificultaria o planejamento; portanto, aumentando a importância do uso de modelos.

A principal contribuição deste trabalho é o desenvolvimento dos modelos hierárquicos para avaliar os sistemas BRT e a validação do modelo usando dados experimentais retirados da literatura. Considerando que os modelos apresentados não encontram evidências para refutá-los, como os estudos mostram, esses modelos podem ser usados por planejadores de STUMP para obter métricas de desempenho, confiabilidade e desempenho na busca de alternativas viáveis para o sistema.

O artigo está organizado da seguinte forma: a Seção 2 mostra os principais conceitos que subsidiam o trabalho; a Seção 3 apresenta a metodologia utilizada para a construção do Modelo de Performabilidade; A Seção 4 apresenta o Estudo de Caso construído para a efetiva aplicação do trabalho; A seção 5 aponta as principais conclusões do trabalho e indica a direção de possíveis trabalhos futuros.

## II. CONCEITOS FUNDAMENTAIS

Esta seção apresenta um resumo dos conceitos necessários para a compreensão deste trabalho, e também fornece uma visão geral do modelo de desempenho em STUMP.

### A. 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 [5]. 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 1.

$$R(t) = P \{T \geq t\}, t \geq 0, \quad (1)$$

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.

$$F(t) = 1 - R(t), P \{T < t\}, \quad (2)$$

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

### B. 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 ( $t$ ) [6].

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 [7].

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 [8].

### C. Métodos e Modelos para Avaliação de Sistemas

Existem técnicas formais que podem ser usadas para modelar sistemas de computador e estimar medidas relacionadas à disponibilidade, confiabilidade e desempenho do sistema. RBDs [9], Árvores de Falha [9], Redes de Petri Estocásticas (SPNs) [10] e Cadeias de Markov [11] foram usados para modelar muitos tipos de sistemas e avaliar várias medidas de disponibilidade e confiabilidade. E como forma de encontrar soluções ótimas, a Algoritmos

Os tipos de modelo mencionados podem ser amplamente classificados em espaço não-estado e espaço-estado modelos [12]. Os modelos de espaço não-estado (por exemplo, RBDs, árvores de falhas) permitem, em geral, uma representação mais concisa do sistema do que os modelos de espaço de estados. Modelos de espaço de estado (por exemplo, Cadeias de Markov, SPNs, Redes de Autômatos Estocásticos) permitem a representação de relacionamentos mais complexos entre os componentes do sistema, como dependências envolvendo subsistemas e restrições de recursos [12].

Tipos de modelos distintos podem ser combinados hierarquicamente, permitindo a representação de muitos tipos de dependências entre componentes e evitando o problema conhecido de explosão de espaço de estado ao lidar com sistemas grandes. Um exemplo dessa abordagem hierárquica é o uso de modelos combinatórios para representar as relações de disponibilidade entre subsistemas independentes, enquanto mecanismos de falha e reparo detalhados ou mais complexos são modelados com modelos de espaço de estados metodológica

#### D. Sistemas de Transporte de Média Prioridade (STUMP)

Conforme ilustrado na Figura 1, um STUMP (baseado em sistemas BRT) pode ser visto de três perspectivas diferentes. Observe que existem características de desempenho junto com os elementos individuais que determinam como um sistema útil é gerado. Os Elementos Principais de um STUMP estão aqui representados, juntamente com suas respectivas características e atributos: vias de circulação (vias de ônibus dedicadas), estações, veículos, sistema de cobrança de tarifas, Sistema de Transporte Inteligente (ITS: fundamentalmente a criação de semáforos inteligentes), bem como o serviço de planejamento de operação e o plano de operação. O desempenho do sistema refere-se aos seguintes atributos: economia de tempo de viagem, confiabilidade, identidade e imagem, segurança e proteção e capacidade. Os Benefícios do Sistema referem-se aos vários benefícios que um BRT oferece, incluindo: número de passageiros (níveis elevados de passageiros), desenvolvimento de uso do solo que apoie o trânsito, qualidade ambiental, eficácia do custo de capital, eficiência operacional e muitos outros benefícios. Essa estrutura de três perspectivas sugere as relações entre os elementos principais, o desempenho do sistema e os benefícios do sistema [13], que pode ser visto na Figura 1.

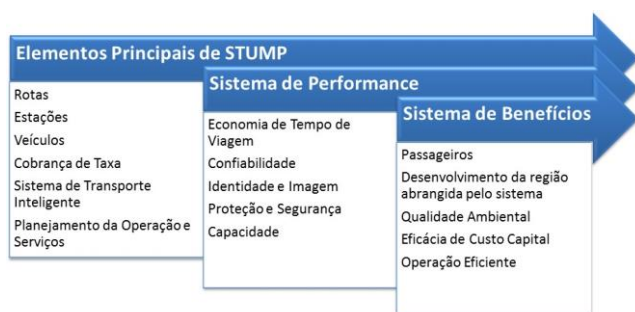


Figura 1: Apresentação de um Modelo STUMP (Adaptado de [14]).

### III. MODELO DE PERFORMABILIDADE

A Modelagem para Performabilidade trabalha a probabilidade de o 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.

Este artigo analisa o desempenho, a confiabilidade e a performabilidade dos STUMPs. Para efetivação do estudo, são realizadas Análises de Transientes, ou seja, considera-se um determinado período para a operação do sistema. Para avaliar e resolver o problema de pesquisa, um cenário *baseline* foi construído considerando a descrição do STUMP com as configurações das métricas para análise. Este *baseline* foi adaptado de [[14] [15]], que consideram todas as características fundamentais, componentes, estruturas, critérios de avaliação de desempenho e benefícios de um sistema de BRT. Depois da modelagem o cenário usando CTMC, foi construída a equação matemática subjacente que foi usado para avaliar o desempenho do STUMP.

Para analisar a performance, um modelo CTMC que é composto pelos sistemas descritos acima, foi criado. O cenário descrito no Changzhou BRT [16], que detalha os tempos de viagem e, a partir destes, calcula a confiabilidade do sistema, foi empregado para verificar a validação do sistema.

A arquitetura proposta considera um STUMP composto por duas estações centrais e seis estações intermediárias (ver Figura 2). Esta arquitetura foi projetada inspirada nos modelos de sistemas de BRT (que se adequa aos STUMPs) do mundo, onde o objetivo principal é ligar os subúrbios ao centro da cidade, incluindo, dentro deste parâmetro, numerosos pontos de parada (estações) que procuram satisfazer a procura de passageiros.



Figura 2: Modelo baseline para um STUMP.

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 [6]. Esta seção visa mostrar o impacto que as falhas podem acarretar ao desempenho do STUMP.

De acordo com [6], 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 deste artigo, 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 [21], sendo representado pela Figura 3.

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, 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 [17], 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 3, onde a taxa de sobrevivência da falha é 1 menos a probabilidade da falha.

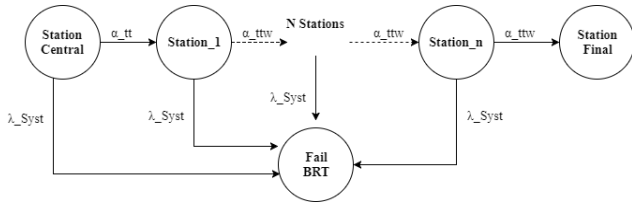


Figura 3: Modelo CTMC para avaliação de Performabilidade no STUMP.

$$PerfBRT(t) = 1 - P\{Fail\_BRT(t)\} \quad (3)$$

O Modelo pode ser resolvido por um sistema de Equações 4, conforme apresentado abaixo:

$$\begin{cases} \Pi(t) = (\pi_i(t)), \\ \sum_{i=1}^n \pi_i(t) = 1, \\ \Pi(0) = \Pi_{Sc}(0) = 1, \\ \frac{\partial \Pi(t)}{\partial t} = \Pi(t)Q, \end{cases} \quad (4)$$

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 4, a qual representa que no estado estacionário a soma das probabilidades dos estados absorventes será 1.

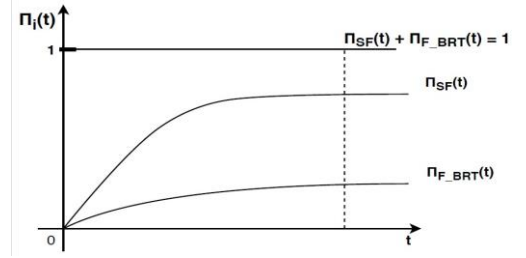


Figura 4 – Probabilidades associadas aos estados absorventes.

Na Figura 3, 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 5.

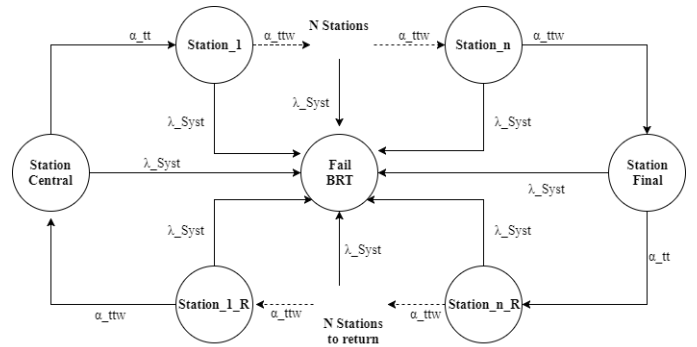


Figura 5 – Modelo CTMT para avaliação de Performabilidade do Sistema de BRT, considerando viagens contínuas.

#### IV. ESTUDO DE CASO

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 [16]. As expressões algébricas foram usadas para calcular a confiabilidade do Sistema BRT e consequentemente o tempo de falha do veículo. Neste caso, os dados para composição do sistema foram obtidos no site da empresa, Volvo [18], 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.

A Tabela 1 descreve os tempos de viagem para cinco intervalos diferentes em uma rota específica [16]. 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 1 – TEMPO DE VIAGEM DE UM SISTEMA BRT, POR [16].

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 6, foram utilizadas as taxas de deslocamentos apresentadas na Tabela 2 [16], 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 2 – 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

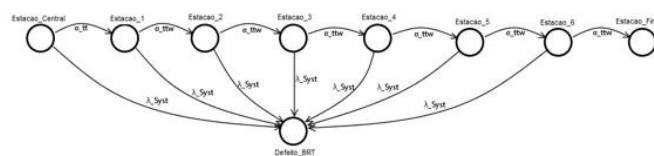


Figura 6: Modelo CTMC para avaliação de performabilidade no Sistema BRT.

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 Infraestrutura, que é dada por  $FuncaoEstrutural = (Caminho) \times (Estacao/2/8)$ . Neste processo, ainda se faz

necessário conhecer os valores das estações, que podem ser obtidos a partir de  $FuncaoEstrutural = (Acesso\_veicula/3) \times (Acesso\_Estacao/2)$ .

Para dados de entrada dos modelos, são expostos na Tabela 3, obtidos a partir de referências publicadas:

Assim, considerando o modelo RBD [21], o bloco  $Acesso\_Estacao$  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 devem estar funcionando num universo de 8, em composição com o caminho (Caminho) [21], sendo respectivamente, 119,9999 h e 0,9999 h. Nesta perspectiva, o Modelo RBD que representa o Sistema BRT [21], 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.

TABELA 3 – DADOS DE ENTRADA DO MODELO.

Componente	Tempo Médio para Falhar (MTTF) (h)	Tempo Médio para Reparo (MTTR) (2)	Fonte
Veículo	7000 120 (6)	2	[18]
Caminho	acidentes por mês)	1	[19]
Porta de Acesso	40000	10	[20]

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 7, dos dados de entrada mostrados na Tabela 3 e na Tabela 2, os resultados são mostrados na Figura 59.

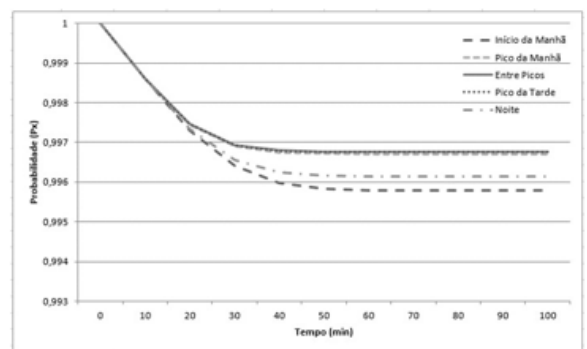


Figura 7 – Performabilidade para o Sistema BRT

É possível perceber na Figura 7 que a performabilidade permanece aproximadamente em 0,99 (dois nove) 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 5, que considera o Sistema BRT com um sistema de ida e volta da Estação Central até a Estação Final. Os resultados apresentados na Figura 8 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.

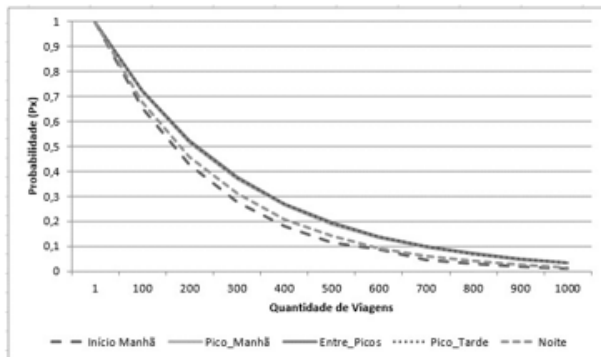


Figura 8 – Performabilidade do sistema considerando o deslocamento constante.

A Figura 8 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.

## V. CONCLUSÕES

Este artigo aborda os fatores fundamentais envolvidos em Sistemas de Transporte de Média Prioridade - STUMP, empregando modelos CTMC como um meio para promover a análise do sistema e melhorar o processo de planejamento, particularmente em relação à probabilidade de chegada, confiabilidade e desempenho. Os modelos permitem uma função matemática para calcular as probabilidades de uma arquitetura correspondente. A performabilidade é mais impactada pelo tempo de viagem do que pela ocorrência da falha. Para estudos futuros, outras métricas como capacidade, disponibilidade e sistema de fluxo podem ser adicionados. Outro fator que deve ser considerado é o acúmulo de viagens, que afeta a confiabilidade do sistema, reduzindo o tempo de falha em cada viagem, o que poderia trazer resultados mais profundos para os sistemas estudados. Em uma perspectiva futura, os fatores de custo podem ser estudados e aproveitados para garantir melhores perspectivas para o planejamento de STUMP.

## AGRADECIMENTOS

Ao Instituto Federal de Pernambuco – IFPE – Campus Recife e ao Centro de Informática – Cin/Universidade Federal de Pernambuco-UFPE, pelo apoio no desenvolvimento da pesquisa.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICA

- [1] VUCHIC, V. R. *Urban transit systems and technology*. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2007.
- [2] 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.
- [3] INGVARSDON, 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.
- [4] Yadan Yan, Zhiyuan Liu, and Yiming Bie. Performance evaluation of bus routes using automatic vehicle location data. *Journal of Transportation Engineering*, 142(8):04016029, 2016.
- [5] Way Kuo and Ming J Zuo. Optimal reliability modeling: principles and applications. John Wiley & Sons, 2003.
- [6] John F Meyer. Performability: a retrospective and some pointers to the future. *Performance evaluation*, 14(3):139–156, 1992.
- [7] Boudewijn R Haverkort. Performability modelling: techniques and tools. John Wiley & Sons Inc, 2001.
- [8] Andrew L Reibman. Modeling the effect of reliability on performance. *Reliability, IEEE Transactions on*, 39(3):314–320, 1990.
- [9] Patrick O'Connor and Andre Kleyner. Practical reliability engineering. John Wiley & Sons, 2011.
- [10] Michael K. Molloy. Performance analysis using stochastic petri nets. *Computers, IEEE Transactions on*, 100(9):913–917, 1982.
- [11] Gunter Bolch, Stefan Greiner, Hermann de Meer, and Kishor S Trivedi. Queueing networks and Markov chains: modeling and performance evaluation with computer science applications. John Wiley & Sons, 2006.
- [12] Paulo Maciel, Kishor S. Trivedi, Rivalino Matias, and Dong Seong Kim. Dependability modeling. In *Performance and Dependability in Service Computing: Concepts, Techniques and Research Directions*. IGI Global, Hershey, 2011.
- [13] Roderick Diaz. Characteristics of bus rapid transit for decision-making. Federal Transit Administration, 2004.
- [14] Lloyd Wright. Bus rapid transit. Sustainable transport: a sourcebook for policy-makers in developing cities. Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit (GTZ), 2002.
- [15] Taotao Deng and John D Nelson. Bus rapid transit implementation in beijing: An evaluation of performance and impacts. *Research in Transportation Economics*, 39(1):108–113, 2013.
- [16] Yueying Huo, Jinhua Zhao, Wenquan Li, and Xiaojian Hu. Measuring bus service reliability: An example of bus rapid transit in changzhou. *Journal of Public Transportation*, 17(2):6, 2014.
- [17] 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.
- [18] Volvo Construction Equipment. Protecao da disponibilidade mecanica de desempenho. Technical report, 2013.
- [19] 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.
- [20] GROUP, M. A. Pedestrian Gates - MPH 112. [S.l.], 2013.
- [21] Dantas, Renata Cristine de Sá Pedrosa. "Modelos de desempenho, confiabilidade e disponibilidade para o planejamento de sistemas de transporte público." (2019).