

ANÁLISE DE DESEMPENHO DE UM CORREDOR BRT SOB A ÓTICA DA VELOCIDADE OPERACIONAL VIA REDES DE PETRI COLORIDAS

PERFORMANCE ANALYSIS OF A BRT CORRIDOR UNDER OPERATIONAL SPEED BIAS VIA COLORED PETRI NETS

Katarini Wanini Gonçalves de Araújo* E-mail: katariniaraujo@hotmail.com

Maurício Oliveira de Andrade* E-mail: mauandrade@gmail.com

Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), Recife, PE

Resumo: Dada a importância do tempo de viagem para a competitividade e atratividade do transporte público, este trabalho visa apresentar um modelo em redes de Petri coloridas que permita a análise de desempenho de um corredor BRT, em relação à velocidade operacional. Trata-se de uma pesquisa explicativa que busca propor uma nova forma de análise a um fenômeno conhecido. O modelo foi aplicado a um trecho de um corredor BRT, na Região Metropolitana do Recife, para validação. A partir dessa análise foram identificados os pontos críticos da operação e propostas medidas, como a introdução de plataformas de embarque em nível e priorização semafórica, a fim de aumentar a velocidade e a regularidade operacional no trecho. Um modelo com essas medidas implantadas foi simulado e aponta resultados satisfatórios ao possibilitar o aumento a velocidade operacional do corredor. Como conclusão, destaca-se a efetividade da modelagem e simulação em redes de Petri para análise de desempenho de um corredor de BRT e a importância de investigar os elementos de projeto e medidas operacionais que podem contribuir para o aumento da eficiência operacional de um corredor de transporte público.

Palavras-chave: Transporte Público. BRT. Velocidade operacional. Rede de Petri. Análise de desempenho.

Abstract: Given the importance of travel time for the competitiveness and attractiveness of public transport, this work aims to present a model in colored Petri nets that allows a performance analysis of a BRT corridor related to its operational speed. It is an explanatory research that seeks to propose a new form of analysis to a known phenomenon. The model was applied to a section of a BRT corridor, in the Metropolitan Region of Recife, for validation. From this analysis, operational critical points were identified and measures were proposed, such as the introduction of level boarding platforms and traffic light priority, in order to increase the segment operational speed. A model with these implemented measures was simulated and pointed out satisfactory results when enables the increase of the corridor running speed. In conclusion, it is possible to highlight the effectiveness of modeling and simulation in Petri nets to analyze the performance of a BRT corridor and the importance of investigating the design elements and operational measures that could contribute to increase the operational efficiency of a public transportation corridor.

Keywords: Public transport. BRT. Operational speed. Petri nets. Performance analysis.

1 INTRODUÇÃO

A mobilidade tem sido uma preocupação constante nas últimas décadas devido à crescente expansão urbana e à elevação nas taxas de motorização. Esse fenômeno

tem se manifestado mais intensamente em países em desenvolvimento, onde a existência de redes de transportes urbano sobrecarregadas ou pobremente planejadas resulta em baixas velocidades operacionais e insatisfação dos usuários. Para tornar o transporte público competitivo e atrativo é essencial que esse serviço ofereça confiabilidade, segurança e rapidez.

A eficiência de um processo de transporte pode ser descrita por diversas relações entre produção e investimento, de modo que vários indicadores podem ser definidos. Em geral, o tempo é considerado um recurso básico, que pode apontar as medidas de eficiência mais relevantes (VUCHIC, 2007). Consequentemente, o tempo de viagem, por ser um fator de grande impacto na qualidade do serviço para os usuários e no custo do serviço para os operadores, aparece como uma das principais medidas de desempenho de um sistema de transporte.

O sistema Bus Rapid Transit (BRT) é considerado uma alternativa de transporte de qualidade com níveis relativamente baixos de investimentos e de impactos urbanos. Por essa razão, nos últimos anos, muitas cidades vêm implantando sistemas desse tipo. Há exemplos reconhecidos de sistemas que apresentam alto desempenho. Entretanto, Pereira et al (2013) ressaltam que cada corredor BRT tem configurações únicas e a quantidade de combinações entre elementos de projeto é praticamente infinita, por isso não é razoável esperar que o desempenho de um corredor possa ser replicado em condições distintas. Assim, a análise das dificuldades e proposição de possíveis soluções de melhoria deve ser feita caso a caso. Para tal, estudos baseados em simulação computacional podem propiciar, através da análise de cenários, soluções visando melhorar o desempenho de corredores BRT.

O sistema BRT tende a apresentar melhor desempenho em relação ao serviço de ônibus convencional, embora perceba-se, ainda, possibilidades de melhoria. Diante do problema de eficiência dos sistemas de transporte público, que resulta em uma mobilidade urbana deficiente, surge o questionamento que conduz esta pesquisa: como identificar e tratar os gargalos, em um corredor, que podem reduzir a velocidade operacional média do sistema BRT?

Para abordar a questão proposta, este trabalho visa apresentar um modelo em redes de Petri coloridas que permita realizar a análise de desempenho de um corredor BRT, em relação à velocidade operacional. Para validação, o modelo foi aplicado a um trecho de um corredor BRT na Região Metropolitana do Recife (RMR). Após a

identificação dos pontos críticos, foram propostas medidas operacionais a fim de aumentar a velocidade operacional da rede. Em seguida, foi simulado o cenário com as medidas implantadas. Por fim, a comparação do desempenho do sistema para os diferentes cenários permite definir o efeito das medidas sugeridas na eficiência operacional do corredor.

2 ANÁLISE DE DESEMPENHO EM TRANSPORTE URBANO

Esta seção apresenta a base teórica que norteia o presente estudo, como os principais conceitos sobre o sistema BRT e a importância da realização de estudos sobre a análise de desempenho dos sistemas de transporte urbano e que medidas de desempenho são mais relevantes para o estudo.

2.1 BRT

É possível definir o sistema BRT como um modo de transporte rápido de passageiros que apresenta a qualidade e a confiabilidade do transporte ferroviário e a flexibilidade do sistema de ônibus, com custos reduzidos em comparação com os custos dos transportes ferroviários (CURRIE; DELBOSC, 2011; HENSHER et al, 2014).

As características citadas, reforçadas pelo sucesso de sistemas como os de Curitiba e Bogotá, podem ser apontadas como causas do crescimento expressivo, em nível mundial, da adoção da tecnologia BRT. De acordo com BRT Centre of Excellence et al (2017), o sistema opera em 205 cidades de 45 países, das quais 65, iniciaram sua operação a partir de 2011. Observa-se, ainda, que esse crescimento está especialmente concentrado em países em desenvolvimento.

A escolha de um sistema de transporte urbano é resultado de um planejamento que deve responder às necessidades de cada área urbana. Os sistemas BRT podem apresentar configurações diferentes em cada localidade. A combinação estabelecida entre os elementos de projeto é determinante para o desempenho operacional de um BRT, dando margem a sistemas com melhor ou pior desempenho (HENSHER et al, 2014; MURRAY, 2014; PEREIRA et al, 2013).

Hidalgo (2017) ressalta que a tecnologia BRT desfrutou de um começo relativamente bom, mas problemas de qualidade de serviço têm ficado mais evidentes. Problemas como superlotação, falta de confiabilidade e elevados tempos de viagem são notórios em muitos sistemas, mesmo nos mais reconhecidos como Curitiba, Quito e Bogotá. Apesar desses obstáculos, o autor destaca que o BRT é capaz de oferecer serviços de alta capacidade, rapidez e confiabilidade, mas requer gerenciamento adequado e permanente de infraestrutura e operação.

Apesar da diversidade de configurações dos sistemas BRT, a literatura converge em apontar alguns fatores fundamentais para atingir um desempenho operacional satisfatório. Entre esses destacam-se: (i) segregação física do corredor; (ii) embarque em nível; (iii) pré-pagamento de tarifa; (iv) alta frequência; (v) ciclo semaforico priorizando o sistema; (vi) estações centrais, localizadas pelo menos 40m antes de interseções e distantes de 300m a 800m umas das outras e; (vii) número adequado de portas do veículo (ITDP, 2016; GUNAWAN, 2015; MURRAY, 2014; HENSHER et al, 2014; LINDAU et al, 2013; PEREIRA et al, 2013; CURRIE; DELBOSC, 2011).

Constata-se que, de modo geral, a literatura sobre o BRT indica que, embora o sistema apresente grande potencial como um sistema de transporte sustentável com alto desempenho e baixos custos, ainda há espaço para melhoria do desempenho. Nesse sentido, muitos trabalhos utilizam modelos de simulação para analisar o desempenho operacional de sistemas BRT, entre eles: Kathuria et al (2017), Godavarthi et al (2014), Lin et al (2014) e Pereira et al (2013). Esses estudos demonstram que a simulação é uma ferramenta adequada para recriar um ambiente de estudo detalhado do desempenho operacional de corredores BRT.

2.2 Simulação e Análise de desempenho

O Manual de capacidade e qualidade do serviço de transporte público (TRB, 2013) estabelece medidas de desempenho para medir a qualidade do serviço de transporte público dos pontos de vista do passageiro e do operador. O manual inclui, ainda, técnicas para calcular a capacidade e outras características operacionais dos diversos modos de transporte coletivo, além de estações e terminais.

Ao modelar a qualidade percebida de sistemas BRT no Chile, Colômbia e México, a partir de pesquisas de satisfação feitas pelos órgãos gestores de cada sistema, Allen et al (2017) demonstraram que os fatores mais importantes para os usuários são frequência, velocidade e confiabilidade. TRB (2013) destaca a importância da velocidade dos sistemas de transporte urbano ao atestar que, do ponto de vista dos usuários, o tempo de viagem interfere fortemente na escolha modal do passageiro, pois um menor tempo de deslocamento significa mais tempo para outras atividades e representa ganhos em bem estar.

Melhorias na qualidade do serviço de transporte público não beneficiam apenas os usuários. Freitas e Dos Reis (2013) ressaltam o interesse das empresas operadoras de serviços de transporte público por ônibus em aumentar o nível de qualidade ofertado aos usuários, diante do problema da evasão de demanda. O estudo propõe um modelo de avaliação do serviço baseado em cinco critérios básicos: veículos, vias e paradas, atendimento, tempo e custo.

Sob a perspectiva dos operadores, o tempo de viagem afeta diretamente os custos da operação, ao determinar a frota necessária para operar uma linha (TRB, 2013). A redução do tempo de viagem contribuiria para uma melhor utilização dos veículos, que poderiam realizar mais viagens, reduzindo dos custos para os operadores. O estudo conduzido por Riechi et al (2017) comprovou, através do uso de simulação estocástica, que o aumento da utilização média dos ônibus resultaria em redução no custo médio de operação e manutenção por quilômetro.

De forma mais ampla, Haddad et al (2015) e Abrantes e Wardman (2011) consideram que uma redução nos tempos de deslocamentos diários dos trabalhadores representaria um ganho na sua produtividade econômica. Esse aumento de produtividade impacta na economia local e regional, podendo causar mudanças em fatores como renda regional, produção das empresas, demanda por fatores primários e preço final dos produtos.

Pereira et al (2013) destacam que, em sistemas como o BRT, a velocidade operacional consta entre as principais medidas de desempenho. Quedas acentuadas na velocidade são fortes indicativos de que um corredor BRT atingiu seu limite de capacidade. ITDP (2016) aponta que todas as características físicas e operacionais de um corredor BRT refletem na velocidade operacional. Além disso, TRB (2013) ressalta que a análise do desempenho dos sistemas de transporte público, no que se

refere à velocidade operacional média, é essencial para medir o impacto dos tratamentos preferenciais e estratégias operacionais.

Tun et al (2017) reiteram que a velocidade operacional é a principal medida de desempenho de um sistema de transporte urbano ao considerar que outros fatores fundamentais para a qualidade do serviço, como confiabilidade, frequência e conforto, são influenciados por ela. Ao aumentar a velocidade, a frota pode realizar mais ciclos por hora, aumentando a frequência do serviço e reduzindo tempo de espera e as filas. Um aumento na frequência, por sua vez, aumenta a capacidade do sistema e reduz a densidade de passageiros, gerando viagens mais confortáveis.

Muitas pesquisas abordam a questão da velocidade operacional no transporte público, nesse sentido, os estudos sobre sistemas BRT têm sido amplamente disseminados. Gunawan (2015), por exemplo, estudou até que ponto o desempenho do BRT é afetado pela interferência do tráfego misto. Para isso, foi adotada uma abordagem empírica, registrando e comparando os dados do tempo de viagem entre estações, nos trechos onde há e onde não há interferência do tráfego misto, em onze corredores BRT TransJakarta. Cubillos e Munizaga (2017) conduziram um estudo em Santiago, que desenvolve um modelo econométrico para analisar o tempo de viagem dos serviços de transporte por ônibus, utilizando dados do sistema de trânsito para identificar variáveis explicativas para o tempo de cruzeiro.

Ferramentas de simulação são empregadas na maioria dos estudos relacionados à velocidade operacional. Pereira et al (2013), por exemplo, investigaram o desempenho de um corredor BRT com uma faixa por sentido e sem ultrapassagem, em termos de capacidade e velocidade operacional. Essa análise foi baseada em microsimulação computacional através do *EMBARQ BRT Simulator*, desenvolvido para representar o desempenho de sistemas de BRT sob uma variedade de configurações físicas e operacionais.

Também usando microsimulação, Kathuria et al (2017) avaliaram o desempenho operacional de sistemas BRT da Índia, em relação à variabilidade dos tempos de viagem, utilizando os dados de GPS dos veículos para avaliar os efeitos do grau de prioridade dos coletivos no corredor sobre seu desempenho. Enquanto Lopez et al (2011) utilizaram um modelo de simulação em redes de Petri para analisar o desempenho do BRT Transmilenio, de Bogotá. Analisou-se as interações entre

passageiros, veículos e infraestrutura com o objetivo de encontrar uma forma de suprir a demanda de pico no menor tempo possível.

Diante do exposto, é possível constatar a importância de estudos relacionados à velocidade operacional, pois esta representa um fator essencial para que o desempenho de um serviço de transporte público seja considerado satisfatório. Justifica-se, então, a seleção da velocidade operacional como medida de desempenho para a presente análise. Observa-se que ferramentas de modelagem que permitam prever como o sistema reagiria a possíveis intervenções são muito importantes para a realização deste estudo.

Ortúzar e Willumsen (2011) ressaltam que o uso de ferramentas de simulação é fundamental para testar planos alternativos para os possíveis valores futuros das variáveis em sistemas complexos demais, para que esses testes sejam realizados no sistema real. Os modelos podem oferecer uma ampla contribuição para o planejamento do serviço de transporte, em termos de identificação das dificuldades e seleção de maneiras sólidas de abordá-las.

Conceitualmente, simulação é uma técnica que permite reproduzir o funcionamento de um sistema, com o auxílio de um modelo, e testar hipóteses sobre o valor das variáveis analisadas. As conclusões da simulação são usadas, então, para melhorar o desempenho dos sistemas. Esse procedimento é especialmente indicado para modelos dinâmicos, que são usados de um período de tempo ao período seguinte, captando as mudanças ocorridas nesse intervalo. No caso de sistemas que incorporam elementos aleatórios, a simulação é denominada simulação estocástica (SILVA et al, 2010).

No presente estudo, analisa-se a velocidade operacional do sistema BRT ao longo de um trecho de um corredor, visando manter o tempo de viagem dos usuários dentro do padrão esperado pelo projeto e pelo conceito da tecnologia adotada. Esses tempos são aleatórios e a situação se altera no decorrer do tempo, portanto, trata-se de um problema que deve ser analisado por meio de modelos de simulação estocástica. Entre os modelos adequados para a análise de sistemas dinâmicos que apresentam comportamento estocástico, destaca-se a modelagem em redes de Petri.

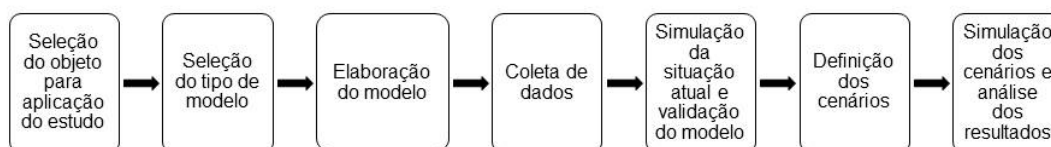
3 METODOLOGIA

Este trabalho pode ser classificado como uma pesquisa explicativa. Uma vez que, dado o problema recorrente de ineficiência dos sistemas de transporte público urbano, esta pesquisa se propõe a analisar, por meio de um modelo de simulação, como determinadas variáveis afetam o desempenho de um corredor BRT, em relação à velocidade operacional.

Para a realização dessa análise, foi utilizada a modelagem e simulação em redes de Petri. A escolha dessa ferramenta se justifica porque permite a análise de sistemas dinâmicos com variáveis estocásticas. Além disso, a pesquisa bibliográfica mostrou que o uso das redes de Petri para análise de sistemas de dinâmicos de eventos discretos é bastante adequado, embora, não haja muitos trabalhos que apliquem essa ferramenta para análise de desempenho de transporte público.

Três operações de pesquisa foram empregadas para o desenvolvimento deste trabalho: pesquisa bibliográfica, estudo de campo e pesquisa experimental. A pesquisa bibliográfica consistiu no levantamento de referências teóricas sobre os temas relevantes para a pesquisa como os conceitos e os elementos do sistema BRT e os métodos aplicados para análise de desempenho dos transportes públicos. No estudo de campo foram coletadas informações sobre a operação atual do corredor analisado. Por fim, a pesquisa experimental, com a delimitação de uma linha de BRT que percorre o corredor para ser objeto de estudo e sua modelagem e simulação visando analisar as relações de causa e efeito entre as variáveis e o objeto de estudo. A Figura 1 resume os procedimentos seguidos.

Figura 1 – Procedimentos metodológicos



3.1 Seleção do objeto de estudo e descrição do problema modelado

Dois corredores BRT operam na RMR: o Corredor Norte-Sul e o Corredor Leste-Oeste. Ambos resultam de investimentos em mobilidade urbana para a Copa

do Mundo de 2014. Os BRTs fazem parte de um sistema de transporte metropolitano integrado, embora não tenham sido implantados integralmente. Em diversos pontos, ainda apresentam problemas como falta de faixa exclusiva.

De acordo com IBGE (2015), a RMR é formada por 14 municípios que concentram 42% da população de Pernambuco, o que a torna a quinta região metropolitana mais populosa do Brasil. Sua população é de 3,8 milhões de habitantes, dos quais aproximadamente 25% vivem nas seis cidades servidas pelo Corredor Norte-Sul (Ilha de Itamaracá, Itapissuma, Igarassu, Abreu e Lima, Paulista e Olinda). Os municípios de Paulista e Olinda se destacam por serem os mais populosos entre os municípios ao Norte do Recife e por terem um alto nível de integração com a capital.

No que se refere ao transporte urbano, a RMR é atendida pelo Sistema de Transporte Público de Passageiros da Região Metropolitana do Recife (STPP/RMR), composto pelo Sistema Estrutural Integrado (SEI) e pelo Sistema de Transporte Complementar Metropolitano (STCM). O STPP/RMR transporta em média 2,07 milhões de passageiros/dia, dos quais 65% são usuários do SEI (GRANDE RECIFE, 2013). Os corredores de BRT são parte do SEI, uma rede composta por linhas de BRT, ônibus e metrô integradas por terminais fechados, que permitem que o usuário viaje por toda a rede pagando apenas uma tarifa independentemente do tempo de viagem.

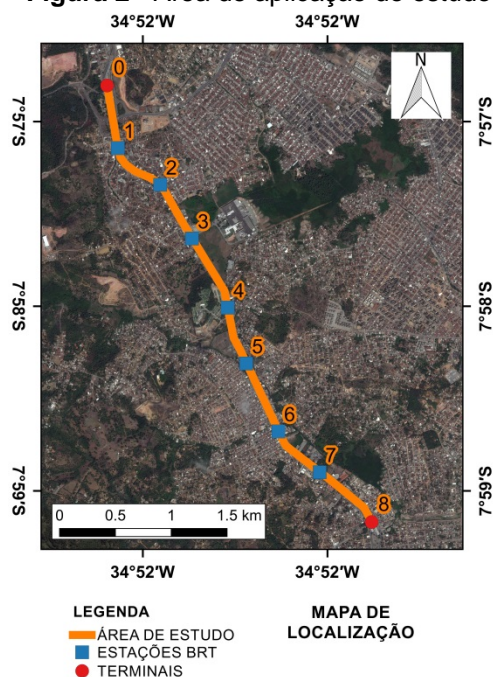
De acordo com Grande Recife (2017), o Corredor Norte-Sul, que liga a região norte da RMR ao centro do Recife, opera com seis linhas e 25 estações, tendo três terminais integrados (TI), e atendendo uma demanda de 66 mil usuários/ dia. Nesse corredor foi selecionado um trecho com 4,80 km de extensão, entre os municípios de Paulista e Olinda, que se aproxima da proposta original do sistema BRT, como mostra o Quadro 1.

Quadro 1 - Caracterização da área de estudo

Extensão total	4,80 km
Número de estações intermediárias	7
Segregação física do corredor	Sim
Embarque e desembarque em nível	Apenas nas estações intermediárias
Pré-pagamento de tarifa	Sim
Intervalo da linha no pico	6 minutos
Semáforo	Sem priorização- entre as estações 5 e 6
Outras interferências	12 retornos e 5 travessias de pedestre sem semáforos

O trecho em estudo encontra-se entre dois terminais de integração, o TI Pelópidas Silveira e o TI da PE-015, e conta com sete estações intermediárias. Os terminais são fechados com integração tarifária e são acessados majoritariamente através de linhas alimentadoras. Entre as linhas que tem como ponto inicial o TI Pelópidas Silveira, foi selecionada a linha Pelópidas/PCR, que apresenta maior demanda e maior frequência de viagens. A Figura 2 mostra a área de estudo.

Figura 2 - Área de aplicação do estudo



O objetivo do estudo é analisar se a velocidade média operacional no trecho estudado é maior ou igual a 25 km/h, que é o padrão estabelecido por ITDP (2016) para que um sistema BRT seja considerado de qualidade adequada. Além disso, foi verificado se a velocidade atinge a média de 26,32 km/h correspondente ao que foi previsto para este segmento no projeto original (MAIA MELO ENGENHARIA, 2013). Para isso é necessário levar em consideração as características do corredor, descritas nesta seção. O modelo aponta também, os pontos críticos operacionais e que efeitos mudanças realizadas nesses pontos teriam sobre a velocidade operacional.

3.2 Construção do modelo

O instrumento escolhido para a modelagem são as redes de Petri (RdP) por sua adaptabilidade e fácil experimentação. O tempo de viagem é a variável de

interesse e o modelo deve mostrar em que medida (i) tipo de operação de embarque e desembarque; (ii) grau de prioridade nas interseções e; (iii) número de portas disponíveis para o acesso ao veículo, influenciam o desempenho operacional do BRT, em relação ao tempo de viagem.

As subseções seguintes apresentam os principais conceitos de redes de Petri, a escolha das configurações operacionais analisadas e a elaboração do modelo de simulação do sistema em RdP.

3.2.1 Redes de Petri

Ng et al (2013) indicam que muitos modelos podem simular o comportamento de um sistema de transporte no tempo e no espaço para prever seus estados e analisar seu desempenho. Esses modelos incluem conceitos de pesquisa operacional como teoria das filas, teoria dos grafos, redes neurais, entre outros. A técnica de modelagem em redes de Petri se destaca por ser uma ferramenta matemática, que habilita o sistema a ser regido por um conjunto de equações, fornecendo, assim, um meio para análise de sistema. Conseqüentemente, as redes de Petri permitem uma análise mais aprofundada, em relação às técnicas de análise de redes tradicionais, como PERT e CPM, e possibilitam a simulação dos processos.

A abordagem em redes de Petri é caracterizada por sua generalidade e capacidade de modelagem de diversos tipos de sistemas, que podem possuir estados distribuídos, paralelos, determinísticos, estocásticos, discretos e contínuos. A análise de uma rede de Petri permite avaliar a estrutura e o comportamento dinâmico do sistema modelado e sua representação gráfica permite a visualização dos processos e comunicação entre eles (PETRI, 1966; MURATA, 1989; YEN, 2006; NG et al, 2013; RIBEIRO et al, 2015).

Uma rede de transporte urbano pode ser considerada um sistema de eventos discretos (SED), uma vez que se trata de um conjunto de elementos (pessoas, veículos, estruturas físicas) em interação segundo eventos (chegadas e partidas) que apresentam caráter discreto no tempo. É possível encontrar diversas aplicações de simulação de SEDs em redes de Petri, em setores como produção industrial, prestação de serviços, informática e telecomunicações.

Em relação a trânsito e transporte urbano, nos últimos 20 anos as redes de Petri (RdP) têm sido aplicadas principalmente em coordenação semafórica e programação operacional de linhas de transporte metroviário. Tais estudos demonstram sua habilidade em fornecer uma representação visual das redes e um equilíbrio entre poder de modelagem e capacidade de análise (TZES et al, 1996; DI FEBBRARO; SACONE, 1998; DI FEBBRARO; SACCO, 2004; DI FEBBRARO; GIGLIO; SACCO, 2001, 2016; HUANG et al, 2006; NG et al, 2013; YAMADA et al, 2013; WANG et al, 2016; GIGLIO; SACCO, 2016).

Ao longo do tempo, surgiram algumas adaptações das redes de Petri, que influem apenas na conveniência para o modelador, e não no poder de modelagem da ferramenta. As redes de Petri coloridas (CPN, Colored Petri Nets) são uma extensão que apresenta uma linguagem gráfica de modelagem para a construção de modelos e análise das propriedades de sistemas de eventos discretos (MURATA, 1989).

As CPNs incluem o conceito de tempo, tornando possível simular o tempo de execução das atividades no sistema. Além disso, as CPNs podem ser aplicadas para análise de desempenho baseada em simulação, investigação das medidas de desempenho como atrasos, tempo de processamento e comprimento de filas. Os modelos CPN apresentam a vantagem de poder ser estruturados em módulos baseados em um mecanismo de estrutura hierárquica, fator importante para a modelagem de sistemas de grande porte (JENSEN, 2007).

Durante a pesquisa de literatura não foram encontrados trabalhos que abordassem a aplicação da modelagem em redes de Petri para análise de desempenho de sistemas de transporte por ônibus. Apesar disso, a literatura prova a compatibilidade das RdP com a análise de desempenho de sistemas dinâmicos a eventos discretos, caso dos sistemas de transporte urbano. As vantagens do uso de RdP para esse fim incluem sua representação gráfica simples, sendo extremamente efetivo na troca de informações entre profissionais de áreas diferentes, como entre o modelador e os gestores de transporte.

3.2.2 Variáveis analisadas

Ressalta-se que a proposta deste estudo é analisar a velocidade operacional do trecho. De acordo com ITDP (2016), a velocidade operacional corresponde à

distância de viagem total dividida pelo tempo de viagem total. Portanto, a variável modelada será o tempo de viagem no corredor. TRB (2013) define como componentes do tempo de viagem: (i) tempo de aceleração, tempo gasto para chegar à velocidade de cruzeiro; (ii) tempo em velocidade constante, intermediário entre aceleração e desaceleração; (iii) tempo de desaceleração, tempo gasto reduzindo a velocidade até parar na estação; e (iv) tempo de permanência, tempo que o veículo permanece parado na estação, que inclui abertura das portas, embarque e desembarque de passageiros e fechamento das portas.

A partir da revisão da literatura sobre o desempenho operacional dos sistemas BRT é possível definir alguns elementos que exercem influência sobre o tempo de viagem. Definem-se, então, como variáveis controladas no modelo proposto: (i) o tipo de operação de embarque e desembarque; (ii) o grau de prioridade nas interseções e; (iii) o número de portas disponíveis para o acesso ao veículo.

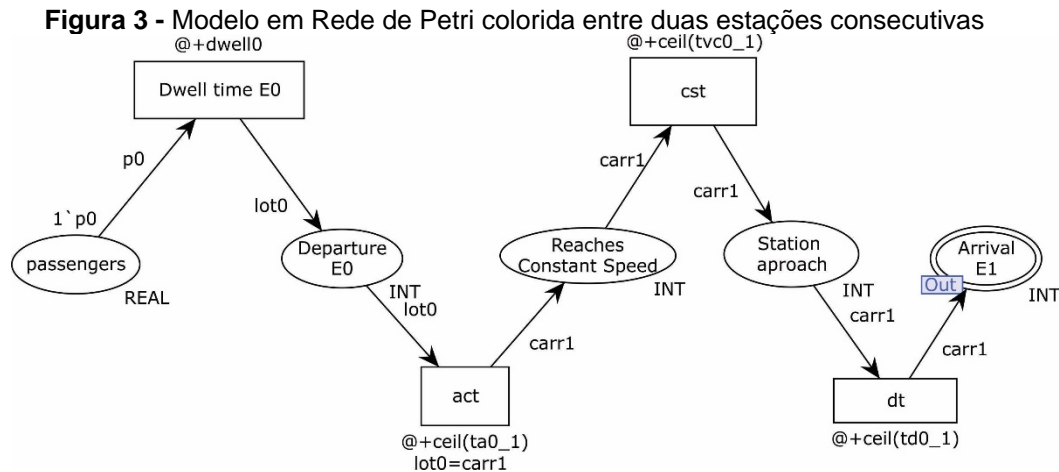
Para realização da análise foram concebidos dois cenários. O cenário 1 corresponde à situação atual: os ônibus são articulados, têm capacidade para 146 passageiros, possuem quatro portas do lado esquerdo, com piso nivelado às plataformas das estações. Nos terminais integrados, as operações de embarque e desembarque ocorrem por meio de três portas localizadas no lado direito dos veículos, com dois degraus. O cenário 2 simula a adoção de medidas operacionais, que modificam o valor das variáveis controladas, visando reduzir o tempo de viagem no corredor.

3.2.3 Elaboração do modelo de simulação

O tempo de viagem, para cada cenário, foi analisado por meio da simulação em redes de Petri coloridas temporizadas, utilizando o software CPN Tools (AIS Group, 2015). O modelo é hierárquico e formado por módulos correspondentes a cada conjunto de duas estações consecutivas (E_{ij}), conforme Figura 3. As estações são numeradas de 0 a 8, a partir do TI Pelópidas Silveira até o TI da PE-015.

Para as variáveis, o software retorna valores aleatórios de acordo com a distribuição de probabilidade predefinida. Essa distribuição corresponde ao resultado da fase de análise estatística dos dados coletados em campo. Assim, foram predefinidas as distribuições de probabilidade referentes ao tempo de permanência,

atribuído à transição “*dwell time*”. Assim como, às transições “*act*”, “*cst*” e “*dt*” são atribuídas respectivamente as distribuições de probabilidade dos tempos de aceleração, velocidade constante e desaceleração entre duas estações i e j . Dessa forma, o lugar “*Arrival*” para cada estação E_{i+1} resulta no tempo decorrido desde a chegada do veículo à estação E_i .



3.3 Coleta de dados

Para dar andamento aos testes de hipóteses no modelo construído, a coleta de dados aconteceu de duas maneiras: pesquisa bibliográfica e pesquisa de campo. A pesquisa da literatura teve como objetivo modelar as possibilidades de melhoria em relação aos tempos de viagem para o cenário 2. Para isso, considera-se o que foi visto na seção 2, que enumera fatores essenciais para que o sistema BRT atinja um desempenho operacional satisfatório.

Já a coleta de dados em campo visa verificar o tempo médio de viagem para o cenário atual. Na ocasião, os pesquisadores realizaram viagens entre 6h e 9h da manhã em três dias úteis consecutivos, verificando que o horário mais crítico é entre 6:25 e 7:25. Foram realizadas medidas dos tempos de permanência em cada estação (tp_i), e tempos de aceleração (ta_{i_j}), velocidade constante (tvc_{i_j}) e desaceleração (td_{i_j}) para cada conjunto de duas estações consecutivas i e j .

Os dados coletados para o cenário 1, foram analisados pelo software SPSS (IBM Corp, 2015) para a realização do teste de normalidade e verificação da distribuição de probabilidade que define essas variáveis. Para o cenário 2, considerou-

se que os dados seguem a mesma distribuição de probabilidade do cenário 1, mudando apenas os valores.

3.4 Análise dos resultados

A simulação do modelo gerou como resultados, os tempos médios de viagem entre estações com grau de confiança de 95%. A validade do modelo foi testada comparando-se os resultados obtidos para a simulação do cenário 1 com os dados reais obtidos em campo.

Após comprovada a efetividade do modelo, seguiu-se a análise dos resultados para cada situação proposta. A velocidade média foi calculada como a distância entre as estações dividida pelo tempo de viagem entre elas. Com isso, foi possível comparar as velocidades resultantes com aquela prevista no projeto do corredor Norte-Sul, e ainda, com as velocidades consideradas adequadas para serviços de BRT de acordo com o manual do ITDP (2016), acima de 25 km/h.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Resultados da análise estatística

Os testes de normalidade de Kolmogorov-Smirnov demonstraram que os dados coletados em campo seguem uma distribuição normal, conforme Tabela 1. Além disso, alguns valores apresentaram variâncias significativas, o que pode ser resultado da forma de operação do serviço. Isto porque, durante o horário de pico a demanda de passageiros oscila, afetando os tempos de permanência; e, ainda, o modo como cada motorista dirige influencia nas variações dos tempos de aceleração, velocidade constante e desaceleração em cada viagem.

Tabela 1 - Resultados da análise estatística

Variável	Kolmogorov-Smirnov		Estatísticas descritivas		
	Estatística	Significância	Média	Desvio Padrão	Variância
tp ₀	0,260	0,200	135,0000	75,5932	5.714,3333
ta _{0_1}	0,260	0,200	28,0000	7,2111	52,0000
tvc _{0_1}	0,260	0,200	23,0000	6,9282	48,0000
td _{0_1}	0,260	0,200	3,3333	1,5275	2,3333
tp ₁	0,260	0,200	17,0000	2,6457	7,000
ta _{1_2}	0,260	0,200	11,0000	3,6056	13,0000
tvc _{1_2}	0,260	0,200	42,3333	4,9329	24,3333
td _{1_2}	0,260	0,200	8,3333	4,0415	16,3333
tp ₂	0,260	0,200	16,3333	1,1547	1,3333
ta _{2_3}	0,260	0,200	11,3333	3,2146	10,3333
tvc _{2_3}	0,260	0,200	31,6667	1,5275	2,3333
td _{2_3}	0,260	0,200	8,3333	2,0817	4,3333
tp ₃	0,260	0,200	15,3333	2,0817	4,3333
ta _{3_4}	0,260	0,200	12,6667	3,0551	9,3333
tvc _{3_4}	0,260	0,200	56,0000	5,2915	28,0000
td _{3_4}	0,260	0,200	7,0000	2,6458	7,0000
tp ₄	0,260	0,200	18,6667	3,5119	12,3333
ta _{4_5}	0,260	0,200	11,6667	2,5166	6,3333
tvc _{4_5}	0,260	0,200	35,0000	4,3589	19,0000
td _{4_5}	0,260	0,200	9,6667	0,5774	0,3333
tp ₅	0,260	0,200	28,0000	14,0000	196,0000
ta _{5_6}	0,260	0,200	11,3333	3,5119	12,3333
tvc _{5_6}	0,260	0,200	37,0000	4,5826	21,0000
td _{5_6}	0,260	0,200	35,6667	20,5508	422,3333
tp ₆	0,260	0,200	21,3333	4,1633	17,3333
ta _{6_7}	0,260	0,200	12,0000	4,0000	16,0000
tvc _{6_7}	0,260	0,200	38,6667	3,0551	9,3333
td _{6_7}	0,260	0,200	8,6667	2,0817	4,3333
tp ₇	0,260	0,200	14,0000	1,7321	3,0000
ta _{7_8}	0,260	0,200	11,3333	3,2146	10,3333
tvc _{7_8}	0,260	0,200	32,0000	1,7321	3,0000
td _{7_8}	0,260	0,200	40,0000	17,3205	300,0000

4.2 Obtenção da solução

Esta fase consiste em realizar experimentos sobre o modelo construído, e utilizar as informações resultantes para propor soluções ao problema detectado. Para este fim, recorreu-se à simulação do modelo, cujos resultados apontam onde os tempos de viagem são maiores. Após a análise estatística dos dados de campo, foram inseridos no modelo a média e variância para cada variável. Em seguida foram realizadas sucessivas simulações para o cenário 1, cujos resultados são mostrados na Tabela 2.

Tabela 2 - Resultados da Simulação para o cenário 1

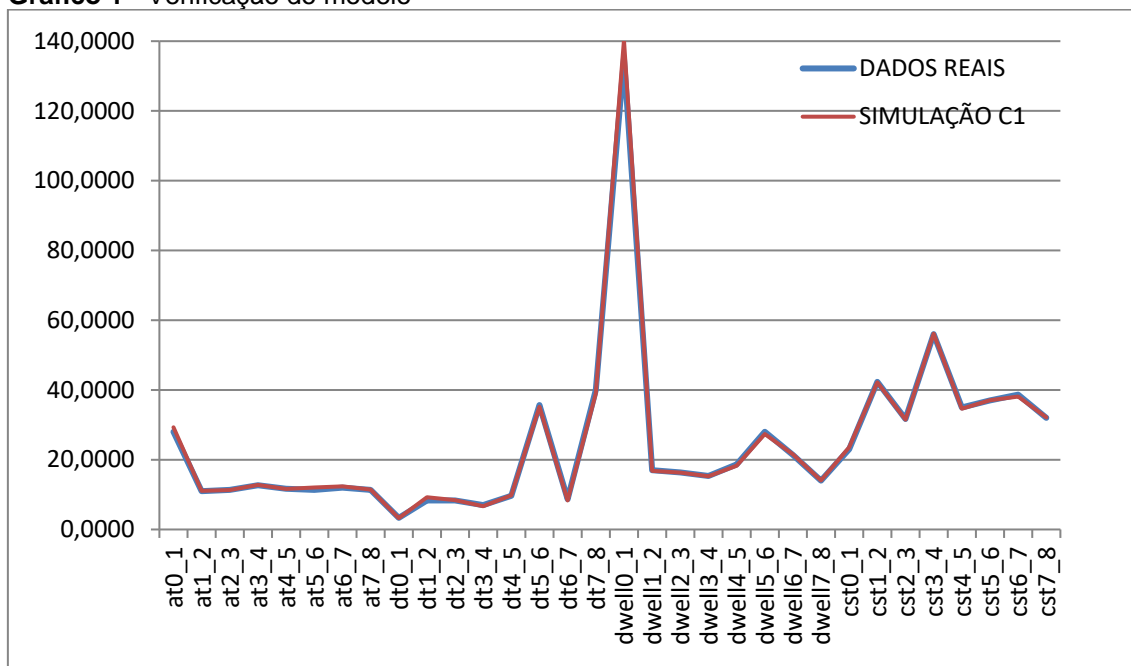
Variável	Média	Desvio Padrão	Variância	Variável	Média	Desvio Padrão	Variância
ta _{0_1}	29,3100	7,3673	54,2767	tp ₀	140,2600	72,5596	5264,9014
ta _{1_2}	11,0600	3,3176	11,0065	tp ₁	16,7900	2,6220	6,8746
ta _{2_3}	11,3100	3,3203	11,0241	tp ₂	16,3300	1,3108	1,7183
ta _{3_4}	12,7600	3,1402	9,8610	tp ₃	15,2700	2,1313	4,5425
ta _{4_5}	11,6300	2,4273	5,8920	tp ₄	18,2600	3,7244	13,8711
ta _{5_6}	12,0400	3,4958	12,2206	tp ₅	27,3800	11,6894	136,6420
ta _{6_7}	12,3400	3,7985	14,4287	tp ₆	21,5500	3,7101	13,7652
ta _{7_8}	11,4600	3,2642	10,6549	tp ₇	14,0700	1,8491	3,4193
td _{0_1}	3,2500	1,8715	3,5025	tvc _{0_1}	23,5500	6,2351	38,8763
td _{1_2}	9,2300	3,6814	13,5526	tvc _{1_2}	42,1800	4,3679	19,0784
td _{2_3}	8,4200	1,9959	3,9834	tvc _{2_3}	31,5000	1,4805	2,1919
td _{3_4}	6,6700	2,6364	6,9506	tvc _{3_4}	56,1500	5,1176	26,1894
td _{4_5}	9,7800	0,7189	0,5168	tvc _{4_5}	34,6300	4,4487	19,7910
td _{5_6}	35,1500	17,9811	323,3207	tvc _{5_6}	37,0600	4,2422	17,9964
td _{6_7}	8,3200	1,8306	3,3511	tvc _{6_7}	38,1200	3,0692	9,4198
td _{7_8}	38,9600	18,5363	343,5943	tvc _{7_8}	32,1300	1,7619	3,1041

O tempo médio de deslocamento no trecho total, de 4,80 km de extensão, é de 13,28 minutos, para um intervalo de confiança de 95%, esta média varia entre 13,00 minutos e 13,56 minutos. Esses tempos de viagem correspondem a uma velocidade operacional média de 21,68 km/h, classificada como abaixo do padrão segundo ITDP (2016). No trecho em análise, o projeto original do corredor Norte-Sul (MAIA MELO ENGENHARIA, 2013) previa uma velocidade operacional média de 26,32 km/h, que corresponderia a um tempo médio de viagem de 10,94 minutos. Os resultados demonstram que a operação atinge 82% da velocidade programada em projeto.

4.3 Teste do modelo e da solução obtida

Antes de propor medidas para otimizar os tempos de viagem é necessário testar a consistência do modelo, comparando-se as médias dos dados gerados na simulação com as médias dos dados reais das pesquisas de campo. O resultado apresentado no Gráfico 1 mostra a efetividade do modelo em representar o comportamento das variáveis do sistema.

Gráfico 1 - Verificação do modelo



4.4 Proposição de ações para otimização do sistema

A análise dos resultados da simulação para o cenário 1 permite constatar que o principal ponto crítico é o tempo de permanência na estação 0 (tp_0), que corresponde a 17,60% do tempo total de viagem. TRB (2013) indica que essa variável é afetada pelo volume de embarques e desembarques, número de portas disponíveis para a operação, método de pagamento de passagem, nivelamento do piso do veículo e nível de lotação. Nessa estação os embarques ocorrem por três portas à direita do veículo e com dois degraus. Credita-se a isso grande parte do elevado tempo de permanência, visto que diversos autores, como Hensher et al (2014) e Lindau et al (2013), destacam o embarque em nível como um dos principais elementos operacionais do sistema BRT.

Com base nessas definições, propõe-se que as operações de embarque e desembarque de passageiros na E0 aconteçam de forma similar ao que ocorre nas estações intermediárias: acesso através das quatro portas pelo lado esquerdo do veículo e piso da estação nivelado com o veículo. Baseado nessas premissas, a estimativa do tempo de permanência na E0 para o cenário 2 foi feita a partir da metodologia do TRB (2013), que estabelece um valor padrão de embarque por

passageiro de 1,75 segundos para situações de embarque em nível e pagamento antecipado da tarifa. O cálculo é dado pela equação 1:

$$tp_i = t_{af} + p_{e,i} \cdot t_e + p_{d,i} \cdot t_d$$

(1)

Onde:

tp_i é o tempo de permanência na estação i ;

t_{af} é o tempo de abertura e fechamento das portas, cujo valor padrão mínimo é 2s;

$p_{e,i}$ é a quantidade de passageiros embarcados na estação i na porta mais carregada;

t_e é o tempo de embarque por passageiro;

$p_{d,i}$ é a quantidade de passageiros que desembarcam na estação i na porta mais carregada;

t_d é o tempo de desembarque por passageiro.

A estação E_0 é o ponto de partida da linha analisada e, portanto, não há desembarque. O número médio de embarques obtido por meio de contagens em campo é de 130,36. TRB (2013) indica que, para um veículo com quatro portas, 35% dos embarques acontecem na porta mais carregada. Considerando esse valor e os valores padrão t_e , calculou-se $tp_0 = 83,62$ s. A metodologia prevê, ainda, um valor médio para o desvio padrão do tempo de permanência $DP = 0,60$ (variância=0,36).

Os tempos de aceleração entre as estações 0 e 1 (ta_{0_1}) e de desaceleração entre as estações 5 e 6 (td_{5_6}) e 7 e 8 (td_{7_8}) também apresentaram resultados altos em comparação com os tempos médios obtidos para as demais estações. No caso de ta_{0_1} e td_{7_8} , isso pode ser atribuído a manobras e a baixas velocidades operacionais dentro dos terminais de integração, portanto, não deverão ser alterados neste cenário. No caso de td_{5_6} , a estação 6 é a estação intermediária de maior movimento e situa-se logo depois de um semáforo. Frequentemente, durante as pesquisas de campo foi identificada a formação de *bunching* nessa estação, o que possivelmente causou o alto tempo de desaceleração.

De acordo com TRB (2013) *Bunching* ou agrupamento ocorre quando dois ou mais veículos chegam simultaneamente a uma estação. Nesse caso, esse fenômeno pode ser explicado pela localização da E6 em relação ao semáforo, pois quando as

estações estão localizadas logo após uma interseção, a retenção do veículo no semáforo pode fazer com que outros se aproximem, gerando atrasos quando o ônibus que chega depois tem que ficar esperando o primeiro realizar as operações de embarque e desembarque. Portanto, para o cenário 2, propõe-se que haja prioridade para o transporte coletivo no ciclo semaforico, desse modo, estima-se que o tempo de desaceleração entre as estações 5 e 6 seja igual à média dos tempos de desaceleração médios obtidos para as demais estações. Permanecendo a variância inalterada: $td_{5,6} = 7,625$.

Os novos valores para $tp_{0,1}$ e $td_{5,6}$ foram, então, inseridos no modelo CPN para simulação, cujos resultados são mostrados na Tabela 3.

Tabela 3 - Resultados da simulação para o cenário 2

Variável	Média	Desvio Padrão	Variância	Variável	Média	Desvio Padrão	Variância
ta0_1	27,8100	7,7950	60,7615	tp0	83,6100	0,7233	0,5231
ta1_2	10,8900	3,5388	12,5231	tp1	16,9200	2,8201	7,9531
ta2_3	11,2700	2,8599	8,1789	tp2	16,3400	1,1390	1,2974
ta3_4	12,6300	2,5132	6,3163	tp3	15,2700	2,1549	4,6435
ta4_5	11,6000	2,4536	6,0202	tp4	18,3700	3,4660	12,0132
ta5_6	11,5300	3,6665	13,4435	tp5	29,3200	14,4382	208,4622
ta6_7	11,4600	4,0711	16,5741	tp6	21,8000	4,0477	16,3838
ta7_8	11,5300	3,3438	11,1809	tp7	13,9000	1,7203	2,9596
td0_1	3,3300	1,4568	2,1223	tvc0_1	23,2800	6,4386	41,4562
td1_2	8,5600	4,2813	18,3297	tvc1_2	42,8500	4,2364	17,9470
td2_3	8,2400	1,9443	3,7802	tvc2_3	31,7000	1,7321	3,0000
td3_4	7,1900	2,9326	8,5999	tvc3_4	55,4500	4,7723	22,7753
td4_5	9,7900	0,6559	0,4302	tvc4_5	34,7900	4,7040	22,1272
td5_6	12,5600	15,1420	229,2792	tvc5_6	35,5200	46,8067	21,9087
td6_7	8,5600	2,2217	4,9358	tvc6_7	38,5200	3,0301	9,1814
td7_8	38,4400	16,7732	281,3398	tvc7_8	32,0600	1,7281	2,9863

O cenário com a implementação das medidas propostas apresenta tempo médio de deslocamento no trecho total de 11,92 minutos, para um intervalo de confiança de 95%, essa média varia entre 11,81 minutos e 12,03 minutos. Esses tempos de viagem correspondem a uma velocidade operacional média de 24,16 km/h (92% da velocidade definida em projeto).

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O BRT surgiu como uma forma de melhorar a eficiência dos sistemas de transporte público, questão que tem sido bastante discutida tanto pela academia como pela sociedade em geral. Apesar de apresentar melhor desempenho em relação ao serviço de ônibus convencional, estudos sobre o BRT mostram que é possível melhorar sua operação. Nesse contexto, o objetivo principal deste trabalho é apresentar um modelo em redes de Petri coloridas que permita analisar o desempenho de um corredor BRT, em relação à velocidade operacional.

O modelo proposto foi aplicado a um trecho de um corredor BRT na RMR para verificação de sua efetividade. Os resultados indicam que o modelo de simulação é capaz de representar apropriadamente o comportamento do sistema. E, portanto, pode ser utilizado para testar modificações operacionais ou físicas, sem a necessidade de interferir no sistema real.

O trecho analisado é considerado, entre os corredores em operação na RMR, o mais próximo à configuração ideal de um BRT e apresenta desempenho parcialmente satisfatório com velocidade operacional média de 21,68 km/h no horário de pico. Apesar disso, alguns ajustes ainda são necessários para melhorar sua operação. A partir dos resultados obtidos pode-se concluir que, as medidas propostas poderiam efetivamente reduzir o tempo de viagem neste corredor, aumentando a velocidade operacional em 11,44%.

O *BRT Standard* (ITPD, 2016), um guia para avaliação de corredores BRT, que se baseia nas melhores práticas, indica que sistemas considerados de alta qualidade alcançam velocidades operacionais médias acima de 25 km/h. Portanto, a velocidade operacional atingida no trecho em análise com a adoção de plataformas de embarque e desembarque em nível nos terminais e prioridade semaforica para os coletivos, 24,16 km/h, estaria muito próxima desse padrão.

Este trabalho destaca a efetividade da modelagem e simulação em redes de Petri para análise de desempenho de um corredor de BRT. Ressalta-se, ainda, a importância de investigar os elementos de projeto e medidas operacionais que poderiam contribuir para o aumento da eficiência dos sistemas de transporte público, em relação à velocidade operacional média, por se tratar de um dos principais indicadores de qualidade.

Para trabalhos futuros pretende-se ampliar a área de estudo atingindo segmentos onde o tráfego do BRT sofre fortes interferências do tráfego geral.

Adicionalmente, propõe-se analisar outros aspectos de projeto que poderiam contribuir para o aumento na velocidade operacional, como o espaçamento entre as estações e a presença de interferências no corredor como faixas de pedestre e retornos para carros.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Fundação de Amparo à Ciência e Tecnologia do Estado de Pernambuco (FACEPE) sem a qual a realização desta pesquisa não seria possível.

REFERÊNCIAS

ABRANTES, Pedro; WARDMAN, Mark. Meta-analysis of UK values of travel time: An update. **Transportation Research Part A: Policy and Practice**, v. 45, n. 1, p. 1-17, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2010.08.003>

AIIS Group. **CPN Tools for Windows v. 4.0.1**. Eindhoven, 2015.

ALLEN, Jaime; MUÑOZ, Juan Carlos; ORTÚZAR, Juan de Diós. Modelling Perceived Service Quality in Latin-American BRT-type systems. **Thredbo International Conference Series on Competition and Ownership in Land Passenger Transport**, Estolcomo, 2017.

ARENALES, Marcos; ARMENTANO, Vinícius; MORABITO, Reinaldo; YANASSE, Horacio. **Pesquisa operacional: para cursos de engenharia**. 2 ed. Rio de Janeiro: Elsevier Brasil, 2015. <https://doi.org/10.1590/0101-7438.2015.035.03.0509>

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

CUBILLOS, Ricardo; MUNIZAGA, Marcela. Bus travel time model for different bus priority schemes using massive data for the city of Santiago. **Thredbo International Conference Series on Competition and Ownership in Land Passenger Transport, Estolcomo**, 2017.

CURRIE, Graham; DELBOSC, Alexa. Understanding bus rapid transit route ridership drivers: An empirical study of Australian BRT systems. **Transport Policy**, v. 18, n. 5, p. 755-764, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2011.03.003>

DI FEBBRARO, Angela; GIGLIO, Davide; SACCO, Nicola. A deterministic and stochastic Petri net model for traffic-responsive signaling control in urban areas. **IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems**, v. 17, n. 2, p. 510-524, 2016. <https://doi.org/10.1109/TITS.2015.2478602>

DI FEBBRARO, Angela; GIGLIO, Davide; SACCO, Nicola. Modular representation of urban traffic systems based on hybrid Petri nets. In: **IEEE Proceedings on Intelligent Transportation Systems**, p. 866-871, 2001.

DI FEBBRARO, Angela; SACCO, Nicola. On modelling urban transportation networks via hybrid Petri nets. **Control engineering practice**, v. 12, n. 10, p. 1225-1239, 2004.
<https://doi.org/10.1016/j.conengprac.2004.04.008>

DIFEBBRARO, Angela; SACONE, Simona. Hybrid Petri Nets for the Performance Analysis of Transportation Systems. **Proceedings of the 37th IEEE Conference on Decision & Control**, n. 37, p. 3232-3237, 1998.

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

GODAVARTHI, Gautam Raj; CHALUMURI, Ravi Sekhar; VELMURUGUN, Senathipathi. Measuring the performance of bus rapid-transit corridors based on volume by capacity ratio. **Journal of Transportation Engineering**, v. 140, n. 10, p. 04014049, 2014.
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)TE.1943-5436.0000698](https://doi.org/10.1061/(ASCE)TE.1943-5436.0000698)

GRANDE RECIFE. **BRT via livre**. Disponível em
<<http://www.granderecife.pe.gov.br/web/grande-recife/brt-via-livre>> Acesso em 25 jun. 2017.

GRANDE RECIFE. **Caracterização do STPP/RMR**: Anexo 1 do Edital de Licitação da Concorrência N° 002/2013. 2013. Disponível em:
<http://www.granderecife.pe.gov.br/c/document_library/get_file?uuid=eedf1472-0fdd-48fd-acec-87dcbde5409e&groupId=1726912>. Acesso em: 29 abril 2017.

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

HADDAD, E. A., HEWINGS, G. J. D, PORSSE, A. P., VAN LEEUWEN, E. S., VIEIRA, R. S. The Underground Economy: Tracking the Higher-order Economic Impacts of the São Paulo Subway System. **Transportation Research Part A: Policy and Practice**, v. 73, p. 18–30, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2014.12.011>

HENSHER, David A.; LI, Zheng; MULLEY, Corinne. Drivers of bus rapid transit systems—Influences on patronage and service frequency. **Research in Transportation Economics**, v. 48, p. 159-165, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.retrec.2014.09.038>

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

HUANG, Yi-Sheng; CHUNG, Ta-Hsiang; LIN, Jenn-Huei. A Timed Coloured Petri Net Supervisor for Urban Traffic Networks. **IMACS Multiconference on "Computational Engineering in Systems Applications"(CESA)**, p. 2151-2156, 2006.

IBGE. **Estimativas da população residente nos municípios brasileiros com data de referência em 1º de julho de 2015**. Disponível em:
<http://ftp.ibge.gov.br/Estimativas_de_Populacao/Estimativas_2015/estimativa_2015_TCU_20160211.pdf>. Acesso em: 06 abr. 2017.

IBM Corp. **IBM SPSS statistics for windows**, Version 23.0. Armonk, NY, 2015.

ITDP. **The BRT Standard**: 2016 edition. Institute for Transportation and Development Policy, 2016.

JENSEN, Kurt; KRISTENSEN, Lars Michael; WELLS, Lisa. Coloured Petri Nets and CPN Tools for modelling and validation of concurrent systems. **International Journal on Software Tools for Technology Transfer**, n. 9, p. 213-254, 2007.

KATHURIA, Ankit; PARIDA, M.; SEKHAR, Ch Ravi. Route performance evaluation of a closed bus rapid transit system using GPS data. **Current Science**, v. 112, n. 8, p. 1642-1652, 2017. <https://doi.org/10.18520/cs/v112/i08/1642-1652>

LIN, Peiqun; ZHANG, Ning; XU, Jianmin; WANG, Yu. Combinatorial Optimization for the Guangzhou, China, Bus Rapid Transit System: Multiple Bus Substops and Docking Bays. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**, n. 2418, p. 30-38, 2014. <https://doi.org/10.1007/s10878-013-9600-5>

LINDAU, Luís Antônio; PETZHOLD, Guillermo Sant'Anna; SILVA, Cristina Albuquerque Moreira; FACCHINI, Daniela. BRT e Corredores Prioritários para Ônibus: panorama no continente americano. In: CONGRESSO DE PESQUISA E ENSINO EM TRANSPORTES, 26., 2013. **Anais...** ANPET, 2013.

LOPEZ, D. F.; TRIANA, A. M.; CHAMORRO, H. R. Simulation model of public transportation system using multiagent approach by means of petri nets: Bogotá study case. In: LATIN AMERICAN AND IEEE COLOMBIAN CONFERENCE ON AUTOMATIC CONTROL AND INDUSTRY APPLICATIONS (LARC), 9., 2011. **Anais...** 2011. p. 1-6.

MAIA MELO ENGENHARIA. Grande Recife Consórcio de Transporte. **Projeto de transporte público de passageiros do corredor Norte-Sul**: Plano de operações e serviços, caracterização dos veículos, sistema de arrecadação. Recife: 2013.

MURATA, Tadao. Petri Nets: Properties, Analysis and Applications. **Proceedings of the IEEE**. v.77, n. 4, p. 541-580, 1989. <https://doi.org/10.1109/5.24143>

MURRAY, Dónal. **Bus Rapid Transit for the 21st Century**. 2. ed. Dónal Murray, 2014.

NG, Kok Mun; REAZ, Mamun Bin Ibne; ALI, Mohd Alauddin Mohd. A Review on the Application of Petri Nets in Modeling, Analysis, and Control of UrbanTraffic. **IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems**, v. 14, n. 2, p. 858-870, 2013. <https://doi.org/10.1109/TITS.2013.2246153>

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

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

PETRI, Carl Adam. **Communication with automata**. Alemanha: Bonn University, 1966.

RIBEIRO, Cesar; LISBOA, Adriano Chaves; MAIA, Carlos Andrey; SALDANHA, Rodney R.. On using Petri nets to model and simulate process with uncertainty. **1st Pan-American Congress on Computational Mechanics – PANACM**, Buenos Aires, 2015.

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

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

TUN, Thet Hein; GUARDA, Pablo; RAMOS, Camila; HIDALGO, Dario. Understanding Bus Rapid Transit (BRT) Performance: Examining the Relationship between Speed and BRT Design Indicators. **Thredbo International Conference Series on Competition and Ownership in Land Passenger Transport**, Estolcomo, 2017.

TZES, Anthony; KIM, Seongho; MCSHANE, William R.. Applications of Petri Networks to Transportation Network Modeling. **IEEE Transactions On Vehicular Technology**, v. 45, n. 2, p. 391-400, 1996. <https://doi.org/10.1109/25.492914>

VUCHIC, Vukan R. **Urban transit systems and technology**. John Wiley & Sons, 2007.

WANG, Pengling; MA, Lei; GOVERDE, Rob M. P.; WANG, Rescheduling trains using Petri nets and heuristic search. **IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems**, v. 17, n. 3, p. 726-735, 2016. <https://doi.org/10.1109/TITS.2015.2481091>

YAMADA, Cinthia K.; SILVA, Marcelo F. M.; MIYAGI, Paulo E.; JUNQUEIRA, Fabrício. Modelagem da rede de trens urbanos em rede de petri utilizando o google maps. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE AUTOMAÇÃO INTELIGENTE, 11., 2013. **Anais...** Fortaleza, 2013.

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



Artigo recebido em: 23/09/2017 e aceito para publicação em 20/05/2018
DOI: <http://dx.doi.org/10.14488/1676-1901.v18i3.3012>