



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DE PERNAMBUCO
DEPARTAMENTO DE COMPUTAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM INFORMÁTICA APLICADA

OSVALDO MARINHO DOS SANTOS NETO

**PERFORMABILIDADE DE SISTEMAS
FERROVIÁRIOS: UM ESTUDO DE CASO SOBRE
O IMPACTO DA DISPONIBILIDADE DOS
DISPOSITIVOS DE SINALIZAÇÃO E CONTROLE
DO TRÁFEGO SOBRE INDICADORES DE
DESEMPENHO DA FERROVIA**

RECIFE – PE

2025

OSVALDO MARINHO DOS SANTOS NETO

**PERFORMABILIDADE DE SISTEMAS
FERROVIÁRIOS: UM ESTUDO DE CASO SOBRE
O IMPACTO DA DISPONIBILIDADE DOS
DISPOSITIVOS DE SINALIZAÇÃO E CONTROLE
DO TRÁFEGO SOBRE INDICADORES DE
DESEMPENHO DA FERROVIA**

Dissertação submetida à Coordenação do
Programa de Pós-Graduação em Informática
Aplicada do Departamento de Computação -
Universidade Federal Rural de Pernambuco,
como parte dos requisitos necessários para
obtenção do grau de Mestre.

ORIENTADOR: Profº. Dr. Gustavo Rau de Almeida Callou

RECIFE – PE

2025

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Sistema Integrado de Bibliotecas da UFRPE
Biblioteca Central, Recife-PE, Brasil

S237p Santos Neto, Osvaldo Marinho dos.
Performabilidade de sistemas ferroviários : um estudo de caso sobre o impacto da disponibilidade dos dispositivos de sinalização e controle do tráfego sobre indicadores de desempenho da ferrovia / Osvaldo Marinho dos Santos Neto . – Recife, 2025.
44 f.: il.

Orientador(a): Gustavo Rau de Almeida Callou.
Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal Rural de Pernambuco, Programa de Pós-Graduação em Informática Aplicada, Recife, BR-PE, 2025.

Inclui referências e apêndice(s).

1. Ferroviários 2. Disponibilidade 3. Desempenho 4. Petri, Redes de I. Callou, Gustavo Rau de Almeida, orient. II. Título

CDD 004

OSVALDO MARINHO DOS SANTOS NETO

**PERFORMABILIDADE DE SISTEMAS
FERROVIÁRIOS: UM ESTUDO DE CASO SOBRE
O IMPACTO DA DISPONIBILIDADE DOS
DISPOSITIVOS DE SINALIZAÇÃO E CONTROLE
DO TRÁFEGO SOBRE INDICADORES DE
DESEMPENHO DA FERROVIA**

Dissertação submetida à Coordenação do
Programa de Pós-Graduação em Informática
Aplicada do Departamento de Computação -
Universidade Federal Rural de Pernambuco,
como parte dos requisitos necessários para
obtenção do grau de Mestre.

Aprovada em: 30 de Junho de 2025

BANCA EXAMINADORA

Prof^o. Dr. Gustavo Rau de Almeida Callou (Orientador)
Universidade Federal Rural de Pernambuco - UFRPE
Departamento de Computação - DC

Prof^o. Dr. Ermeson Carneiro de Andrade
Universidade Federal Rural de Pernambuco - UFRPE
Departamento de Computação - DC

Profº. Dr. Jamilson Ramalho Dantas
Universidade Federal de Pernambuco - UFPE
Centro de Informática - CIN

Agradecimentos

A todos que, de forma direta ou indireta, contribuíram para esta conquista, deixo aqui minha sincera gratidão. À minha querida esposa, Mayrine Sena, pelo apoio e incentivo incondicionais. À minha pequena filha, Aurora Marinho, por quem fui resiliente em diversos momentos. Aos meus familiares: Geruza Rodrigues (mãe), Maria Eliete (tia), Geny Rodrigues (tia), Gabriela Marinho e Túlio Marinho (irmãos), seu Gilmar e dona Verônica (sogra e sogra) pelo encorajamento e orações. Ao meu pai Alexandre Marinho (*in memoriam*), que não pôde felicitar-se com a conquista deste mestrado, mas acompanhou com bastante satisfação o início dessa jornada acadêmica.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Gustavo Callou, pela orientação, colaboração e profissionalismo acadêmico. Cujo compromisso com este trabalho e valiosas contribuições foram fundamentais para que esta pesquisa alcançasse o nível desejado. Agradeço não apenas pelos ensinamentos transmitidos, mas também pela confiança e incentivo ao meu crescimento pessoal, profissional e acadêmico.

Ao metrô do Recife (METROREC) pela disponibilização de arquivos, documentos e dados essenciais para a elaboração deste trabalho de pesquisa. Aos colegas de equipe (Restabelecimento de Sistemas); Everton José, Josevane Gomes e Luiz Alberto, cuja assistência prestada no ambiente de trabalho contribuiu bastante para a concretização desta dissertação. Grato aos colegas de mestrado (2018.1) Claudemir Lima, José Romilson, Leonardo Santos e Thiago Martins, cujo apoio foi de grande ajuda em minha jornada na pós-graduação.

Grato ainda aos professores do Programa de Pós-Graduação em Informática Aplicada (PPGIA) cujo estímulo à pesquisa foi de grande relevância para minha evolução acadêmica e ao secretário Eduardo Chaves, que sempre me foi solícito e prestativo em diversas ocasiões, registro minha sincera gratidão. Por fim, à Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE) pela oportunidade de desenvolver esta pesquisa em uma instituição que vem se destacando cada vez mais no cenário acadêmico nacional. Muito obrigado!

"Em algum lugar, algo incrível está
esperando para ser conhecido." (Carl Sagan)

Resumo

Sistemas ferroviários de transporte de massa são cruciais para a mobilidade urbana, oferecendo uma alternativa rápida e segura para o deslocamento de pessoas e mercadorias, além de contribuir para a redução do tráfego rodoviário e da poluição. No entanto, a eficiência e a segurança desses sistemas dependem criticamente da alta disponibilidade dos equipamentos de sinalização e controle de tráfego. Falhas nesses componentes podem causar sérios impactos operacionais, como atrasos, congestionamentos e, em casos extremos, acidentes, comprometendo a qualidade do serviço e a segurança dos usuários. Cientes dessa importância, este trabalho de pesquisa avaliou o impacto da disponibilidade dos equipamentos de sinalização e controle do tráfego de trens sobre indicadores de desempenho de sistemas ferroviários, tais como o tempo de viagem dos trens, o intervalo entre os trens, o tempo de espera do usuário na plataforma e a probabilidade de colisão entre os trens. Para essa análise, foram propostos modelos baseados em redes de Petri estocásticas, que permitem a simulação de diferentes cenários, como a variação do número de trens em operação, a inserção de novas estações e a adição de rotas alternativas de tráfego. A flexibilidade dos modelos em acomodar modificações na infraestrutura e no fluxo operacional evidencia sua aplicabilidade na análise de situações mais complexas e na antecipação de potenciais gargalos no sistema ferroviário. Estudos de caso demonstraram que a implementação de rotas alternativas elevou em mais de 15% a disponibilidade do sistema, o que representa melhorias substanciais na confiabilidade e na eficiência da operação. A utilização de redes de Petri estocásticas mostrou-se eficaz na representação de sistemas dinâmicos e complexos, oferecendo suporte relevante para decisões em projetos de modernização, ampliação e otimização de redes metroferroviárias. Estes resultados reforçam a importância de um planejamento estratégico voltado à criação de alternativas operacionais para garantir a continuidade dos serviços de transporte público de massa.

Palavras-chave: Sistemas Ferroviários, Disponibilidade, Desempenho, Redes de Petri Estocásticas.

Abstract

Mass transit railway systems are crucial for urban mobility, offering a fast and safe alternative for the movement of people and goods, in addition to contributing to the reduction of road traffic and pollution. However, the efficiency and safety of these systems critically depend on the high availability of signaling and traffic control equipment. Failures in these components can cause serious operational impacts, such as delays, congestion, and, in extreme cases, accidents, compromising service quality and user safety. Conscious of this importance, this research evaluated the impact of the availability of train signaling and traffic control equipment on railway system performance indicators, such as train travel time, headway, user waiting time on the platform, and the probability of train collision. For this analysis, models based on stochastic Petri nets were proposed, allowing the simulation of different scenarios, such as variations in the number of trains in operation, the insertion of new stations, and the addition of alternative traffic routes. The flexibility of the models in accommodating infrastructure and operational flow modifications highlights their applicability in analyzing more complex situations and anticipating potential bottlenecks in the railway system. Case studies demonstrated that the implementation of alternative routes increased system availability by more than 15%, representing substantial improvements in operational reliability and efficiency. The use of stochastic Petri nets proved effective in representing dynamic and complex systems, offering relevant support for decisions in modernization, expansion, and optimization projects of metro-rail networks. These results reinforce the importance of strategic planning aimed at creating operational alternatives to ensure the continuity of mass public transport services.

Keywords: Railway Systems, Availability, Performance, Stochastic Petri Nets.

Lista de abreviaturas e siglas

CBTU	<i>Companhia Brasileira de Trens Urbanos</i>
CCO	<i>Centro de Controle Operacional</i>
METROREC	<i>Metrô do Recife</i>
RAs	<i>Rotas Alternativas</i>
SPN	<i>Stochastic Petri Nets</i>
SSCT	<i>Sistema de Sinalização e Controle do Tráfego</i>
S&C	<i>Switches and Crossings</i>
TUEs	<i>Trens de Unidade Elétrica</i>
VLTs	<i>Veículos Leve sobre Trilhos</i>

Sumário

1	INTRODUÇÃO	11
1.1	OBJETIVOS	13
1.2	ESTRUTURA DO DOCUMENTO	13
2	ARTIGOS	14
2.1	IEEE LATIN AMERICA TRANSACTIONS	14
2.2	ANAIS DO SEMINÁRIO INTEGRADO DE SOFTWARE E HARDWARE (SEMISH)	15
2.3	DECLARAÇÃO DE AUTORIA	15
3	CONSIDERAÇÕES FINAIS	16
3.1	CONTRIBUIÇÕES	16
3.2	LIMITAÇÕES	18
3.3	TRABALHOS FUTUROS	19
	REFERÊNCIAS	21
	APÊNDICES	22
A	AVALIAÇÃO DE PERFORMABILIDADE DE SISTEMAS FERROVIÁRIOS: UM ESTUDO SOBRE O IMPACTO DA ADIÇÃO DE ROTAS ALTERNATIVAS	23
B	AVALIAÇÃO DO IMPACTO DE ROTAS ADITIVAS DE TRÁFEGO SOBRE INDICADORES DE DESEMPENHO E DISPONIBILIDADE DE SISTEMAS METROFERROVIÁRIOS	31

1 INTRODUÇÃO

As ferrovias desempenham um papel fundamental no contexto social e econômico, sendo essenciais para a rotina de transporte de passageiros e insumos em cidades e grandes centros metropolitanos. Além de encurtar distâncias, as estradas de ferro ampliam o volume de mercadorias transportadas, reduzem os custos logísticos de produtos e consolidam-se como um elemento crítico da infraestrutura urbana ([SILVEIRA, 2003](#)).

Dado esse papel de relevância, uma operação eficiente e eficaz de sistemas ferroviários exige elevado desempenho e alta disponibilidade, uma vez que a descontinuidade desses sistemas pode resultar em impactos significativos no cotidiano das regiões onde operam. Dentre os impactos, destacam-se o aumento do congestionamento rodoviário, a elevação dos tempos de deslocamento dos usuários do sistema, perdas econômicas por redução de produtividade e o incremento das emissões de gases de efeito estufa, uma vez que a indisponibilidade de tais sistemas intensifica o fluxo de veículos automotores em circulação. Dessa forma, torna-se imprescindível investir em estratégias de melhoria e otimização do sistema, promovendo a robustez e a resiliência de dispositivos, equipamentos, infraestrutura e maquinário ferroviário. Neste contexto, a utilização de modelos baseados em Redes de Petri Estocásticas revela-se como uma abordagem promissora para a análise e avaliação de indicadores de desempenho e disponibilidade de sistemas ferroviários.

As Redes de Petri Estocásticas, também conhecidas como *Stochastic Petri Nets* (*SPNs*), representam uma extensão das Redes de Petri tradicionais, ao incorporarem aspectos probabilísticos e temporais aos modelos, o que caracteriza seu comportamento estocástico. Essa formalização oferece uma base matemática sólida para a modelagem de sistemas complexos que apresentam comportamentos paralelos, nos quais múltiplas atividades ocorrem de forma simultânea; concorrentes, quando diferentes eventos representados por transições podem ser habilitados ao mesmo tempo; e não determinísticos, em que os tempos de disparo das transições são definidos por distribuições de probabilidade, geralmente exponenciais ([MACIEL, 2023](#)).

Na literatura, alguns trabalhos se destacam no que se refere à utilização de *SPNs* para avaliar o desempenho e/ou a disponibilidade de sistemas ferroviários. Dentre esses estudos, vale citar a pesquisa realizada por Febbraro ([FEBBRARO et al., 2017](#)), na qual os autores desenvolveram modelos estocásticos baseados em Redes de Petri, com o intuito

de estimar os efeitos indiretos decorrentes de falhas em uma rede ferroviária classificada como infraestrutura crítica de transporte. Em Litherland e Andrews ([LITHERLAND; ANDREWS, 2023](#)), é proposta uma estrutura de gestão de ativos para sistemas de Desvio e Cruzamentos (*Switches and Crossings - S&C*) em redes ferroviárias. Modelos baseados em redes de Petri são utilizados para representar os processos de degradação, falha, inspeção e manutenção das unidades de *S&C*.

A pesquisa realizada por Toguyéni ([TOGUYÉNI, 2021](#)) propôs uma abordagem inovadora para lidar com a fluidez do tráfego ferroviário, por meio da reformulação do paradigma de controle e automação em nós ferroviários, com foco no aumento da eficiência do tráfego a partir do uso de recursos de hardware. Utilizando redes de Petri para a síntese de controladores, o autor modelou rotas potenciais para diferentes fluxos ferroviários, resultando em um modelo de controle em malha fechada capaz de prevenir colisões. Em outro estudo, Dalapati e Paul ([DALAPATI; PAUL, 2022](#)) apresentaram uma metodologia para reprogramação de horários em sistemas ferroviários de grande escala diante de desastres. A proposta combina redes de Petri e Processos de Decisão de Markov para lidar com a incerteza dos tempos de recuperação do sistema. Avaliado com dados reais da malha ferroviária do leste da Índia, o modelo demonstrou reduções significativas nos atrasos após o reescalonamento, superando abordagens existentes.

Essa dissertação de mestrado acadêmico contempla a apresentação de dois artigos, um aceito e publicado no periódico *IEEE Latin America Transactions* ([MARINHO et al., 2022](#)) e outro no Seminário Integrado de Software e Hardware (SEMISH) ([MARINHO; CALLOU, 2023](#)). Em ambos os trabalhos, são propostos modelos baseados em Redes de Petri Estocásticas para a avaliação de indicadores de desempenho e disponibilidade característicos de sistemas ferroviários. Entretanto, os estudos apresentam distinções em três aspectos principais. O primeiro diz respeito ao trecho da ferrovia adotado como estudo de caso: o artigo publicado na *IEEE Latin America Transactions* considera a Região de Domínio da estação Recife Sul, enquanto o artigo apresentado no SEMISH utiliza a Região de Domínio da estação Tancredo Neves. O segundo aspecto refere-se às métricas analisadas. Ambos os estudos avaliam o Tempo de Viagem dos trens, o Tempo de Intervalo entre os trens, o Tempo de Espera dos usuários na plataforma e a Disponibilidade do Sistema. No entanto, a Probabilidade de Colisão entre trens é considerada exclusivamente no artigo publicado no SEMISH. O terceiro aspecto está relacionado à complexidade dos

modelos *SPN* desenvolvidos. O modelo apresentado no primeiro artigo representa apenas o modo de operação em que o trem trafega sob supervisão do Sistema de Sinalização e Controle do Tráfego (SSCT). Já o modelo descrito no segundo artigo contempla dois modos operacionais distintos: o modo subordinado ao SSCT e o modo *Shunt Button*, no qual o trem opera em velocidade restrita sem estar sob a supervisão direta do SSCT.

1.1 OBJETIVOS

Este trabalho de pesquisa tem por objetivo avaliar o impacto da disponibilidade dos dispositivos que compõem o SSCT de trens sobre indicadores de desempenho de sistemas ferroviários de transporte. De uma forma mais detalhada, os objetivos deste trabalho são descritos a seguir.

- Propor modelos baseados em *SPNs* para avaliar tanto o desempenho quanto a disponibilidade do sistema, quantificando o impacto da disponibilidade dos componentes do SSCT de trens sob os indicadores de desempenho da ferrovia;
- Avaliar indicadores de desempenho e disponibilidade típicos de sistemas ferroviários através da geração de métricas, tais como: tempo de viagem, tempo de intervalo entre os trens, tempo médio de espera do usuário, disponibilidade do SSCT e probabilidade de colisão entre os trens em casos específicos de falha do SSCT;
- Identificar o número ideal de trens em operação, considerando os impactos sobre as métricas de desempenho e disponibilidade;
- Propor novas arquiteturas para o sistema ferroviário avaliado, a partir da adição de Rotas Alternativas (RAs) na malha ferroviária.

1.2 ESTRUTURA DO DOCUMENTO

O trabalho segue estruturado da seguinte forma. A Seção 2 apresenta os artigos publicados e que fundamentam este trabalho de dissertação, enfatizando suas contribuições e resultados obtidos. A Seção 3 destaca as contribuições e as limitações da pesquisa realizada, apontando direcionamentos potenciais para futuros trabalhos.

2 ARTIGOS

Esta seção apresenta os trabalhos desenvolvidos e publicados que fundamentam o objetivo principal deste trabalho. Os artigos presentes avaliam o impacto de falhas dos dispositivos do SSCT de trens sobre indicadores de desempenho e disponibilidade típicos de uma rede ferroviária de transporte de passageiros.

As subseções a seguir indicam o periódico e a conferência onde cada artigo foi publicado. Além disso, também é apresentada a referência bibliográfica para consulta rápida, seguida do resumo da pesquisa realizada em cada artigo. Ressalta-se que o artigo completo se encontra disponível nos Apêndices.

2.1 IEEE LATIN AMERICA TRANSACTIONS

MARINHO, O.; CALLOU, G.; MELO, R.; ANDRADE, E. Performability Evaluation of Railway Systems: A Study on the Impact of Adding Alternative Routes: Avaliação de Performabilidade de Sistemas Ferroviários: Um Estudo sobre o Impacto da Adição de Rotas Alternativas. IEEE Latin America Transactions, [S. l.], v. 21, n. 2, p. 270–276, 2022. <https://latamt.ieeer9.org/index.php/transactions/article/view/6770>.

Sistemas ferroviários exigem alto desempenho, disponibilidade e confiabilidade, somados a atributos como segurança e manutenibilidade, essenciais para a implementação de equipamentos de sinalização, controle e tráfego de trens. Estudos aprofundados são fundamentais para lidar com esses requisitos vitais para a qualidade dos sistemas metroferroviários. Tal artigo propõe um conjunto de modelos baseados em Redes de Petri Estocásticas para avaliar o impacto da adição de Rotas Alternativas nos indicadores de desempenho e disponibilidade em sistemas ferroviários. Métricas como tempo de viagem, intervalo entre trens e tempo de espera de passageiros nas estações foram coletadas e analisadas para estimar o impacto dessas métricas nos sistemas ferroviários. O trabalho também apresenta estudos de caso que simulam as implicações da disponibilidade de equipamentos de sinalização e controle de trens no desempenho de uma ferrovia. Além disso, demonstram a versatilidade do modelo proposto, permitindo a inserção de estações e a variação do número de trens na rede ferroviária estudada. Os resultados obtidos indicam que a disponibilidade do sistema analisado pode ser elevada de 81,674% para 98,456%.

2.2 ANAIS DO SEMINÁRIO INTEGRADO DE SOFTWARE E HARDWARE (SEMISH)

SANTOS NETO, Osvaldo M. dos; CALLOU, Gustavo R. de Almeida. Avaliação do impacto de rotas aditivas de tráfego sobre indicadores de desempenho e disponibilidade de sistemas metroferroviários. In: SEMINÁRIO INTEGRADO DE SOFTWARE E HARDWARE (SEMISH), 50. , 2023, João Pessoa/PB. Anais [...]. Porto Alegre: Sociedade Brasileira de Computação, 2023 . p. 344-355. ISSN 2595-6205. DOI: <https://doi.org/10.5753/semish.2023.230779>.

Sistemas ferroviários de trânsito de massa demandam alto desempenho e disponibilidade dos equipamentos de sinalização e controle de tráfego. Estudos são essenciais para abordar esses requisitos, que são cruciais para a otimização da qualidade desses sistemas. Tal artigo propõe um conjunto de modelos baseados em Redes de Petri Estocásticas para avaliar o impacto da implementação de rotas aditivas nos indicadores de desempenho e disponibilidade em sistemas ferroviários. Os modelos também são capazes de reproduzir dois modos de operação do trem: trafegando subordinado ao SSCT (velocidade média operacional estabelecida pelo sistema de sinalização e controle) e trafegando no modo *Shunt Button* (velocidade restrita de 10 km/h em virtude de critérios de segurança contra possíveis acidentes e colisões). Além disso, captura-se o impacto da disponibilidade dos equipamentos e dispositivos do SSCT sobre os indicadores de desempenho dos trens na ferrovia (performabilidade do sistema). Os resultados demonstram que a disponibilidade do sistema estudado aumentou de 79,033% para 97,820%.

2.3 DECLARAÇÃO DE AUTORIA

O autor desta dissertação é o principal responsável pelos trabalhos apresentados neste capítulo. Uma descrição detalhada das contribuições do autor em cada estudo encontra-se nos respectivos apêndices. Nenhum dos trabalhos incluídos neste compêndio foi ou será incorporado a outros compêndios de dissertações.

3 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho apresenta contribuições relevantes para a avaliação e otimização de sistemas ferroviários, por meio do emprego das *SPNs* como técnica de modelagem para analisar o impacto da disponibilidade de equipamentos de sinalização sobre indicadores típicos de desempenho em redes ferroviárias de transporte de passageiros.

Os estudos demonstraram um aumento substancial na disponibilidade do sistema após a introdução de RAs no fluxo de tráfego da malha ferroviária. Especificamente, o artigo publicado no *IEEE Latin America Transactions* registrou um incremento de 81,674% para 98,456%, enquanto o trabalho do SEMISH evidenciou uma elevação de 79,033% para 97,820%. Tais resultados quantitativos reforçam a aplicabilidade prática dos modelos *SPN* na avaliação de indicadores de desempenho e disponibilidade, bem como na proposição de melhorias da eficiência operacional e da confiabilidade da infraestrutura ferroviária.

Adicionalmente, a pesquisa permitiu a identificação de pontos críticos de falha no sistema ferroviário e forneceu subsídios para a otimização do tráfego de trens, ao quantificar o número ideal de Trens de Unidade Elétrica (TUEs) em operação. A versatilidade dos modelos propostos possibilita a inclusão de novas estações/plataformas e a variação do número de TUEs trafegando no sistema, ressaltando sua adaptabilidade a diversas configurações ferroviárias.

Por fim, os estudos apresentados representam um avanço significativo no campo, ao oferecerem uma abordagem baseada em modelos para avaliar e aprimorar o desempenho e a disponibilidade de sistemas ferroviários de forma não invasiva. Os resultados obtidos proporcionam orientações valiosas para operadores e planejadores/desenvolvedores de sistemas ferroviários, subsidiando decisões sobre atualizações/expansões da infraestrutura, gestão do tráfego e estratégias de manutenção, culminando em sistemas de transporte urbano mais eficientes, confiáveis e seguros.

3.1 CONTRIBUIÇÕES

Este trabalho consolida as contribuições de pesquisas realizadas e devidamente publicadas, cujo foco foi na avaliação de indicadores de desempenho e disponibilidade típicos de sistemas ferroviários de transporte de passageiros, além da proposição de melhorias no

sistema analisado. As principais contribuições são detalhadas a seguir:

- **Desenvolvimento e Proposição de Modelos em Redes de Petri Estocásticas:** Foi desenvolvido um conjunto robusto de modelos em Redes de Petri Estocásticas, permitindo a avaliação de indicadores de desempenho e disponibilidade típicos de sistemas ferroviários de transporte de passageiros. Esses modelos possibilitam a análise do sistema sem a necessidade de protótipos físicos, otimizando o processo de avaliação e capturando o impacto da disponibilidade dos equipamentos de sinalização sobre os indicadores de desempenho do trem na ferrovia (performabilidade do sistema);
- **Análise de Métricas de Desempenho e Disponibilidade:** O estudo focou na coleta e análise de métricas cruciais, como tempo de viagem, intervalo entre trens e tempo médio de espera dos passageiros nas estações/plataformas. Além disso, também foram quantificadas a disponibilidade do SSCT e a probabilidade de colisão entre os trens em caso de falhas específicas que afetem o sistema;
- **Realização de Estudos de Caso e Simulação de Cenários:** Foram conduzidos estudos de caso que simulam as implicações da disponibilidade de equipamentos do SSCT no desempenho da ferrovia. Isso demonstrou a aplicabilidade prática e a versatilidade dos modelos propostos, permitindo a inserção de novas estações/plataformas e a variação do número de TUEs na rede ferroviária avaliada;
- **Otimização do Tráfego Ferroviário e Identificação de Pontos Críticos:** O trabalho possibilitou a quantificação do número ideal de trens em operação para otimizar o tráfego ferroviário. Adicionalmente, os modelos permitiram a identificação dos equipamentos cujas falhas têm maior impacto na disponibilidade do SSCT e no desempenho da ferrovia (performabilidade do sistema), fornecendo *insights* valiosos para manutenção e planejamento da infraestrutura ferroviária;
- **Melhoria Quantitativa da Disponibilidade do Sistema e Segurança Operacional:** Os resultados obtidos demonstraram um aumento substancial na disponibilidade dos sistemas estudados (mais de 15% em ambos os casos), evidenciando a eficácia das RAs e da metodologia proposta;
- **Validação em Cenário Real:** A validação dos modelos propostos foi realizada a partir de dados reais em trechos distintos (um para cada estudo) de uma malha ferroviária real, o que confere robustez e aplicabilidade prática aos resultados obtidos.

3.2 LIMITAÇÕES

Os estudos sobre avaliação de sistemas ferroviários de transporte de passageiros, através de Redes de Petri Estocásticas, possuem algumas limitações inerentes ao escopo da pesquisa que podem ser consideradas para trabalhos futuros ou para uma compreensão mais abrangente do sistema:

- **Generalização e Validação em Diversos Cenários:** Embora os modelos propostos demonstrem versatilidade na inserção de estações e variação do número de trens, os estudos de caso foram especificamente aplicados a um ramal ferroviário real (Linha Sul do metrô de Recife). A generalização dos resultados para sistemas ferroviários com diferentes características operacionais, escalas e complexidades (e.g., malhas ferroviárias de carga, sistemas de alta velocidade com diferentes tecnologias de sinalização) demandaria validação adicional;
- **Impactos sociais e ambientais:** A pesquisa se concentra primariamente em indicadores técnicos de desempenho (tempo de viagem, intervalo entre trens, tempo médio de espera) e disponibilidade de equipamentos do SSCT. Aspectos socioeconômicos mais amplos, como o impacto ambiental da operação, o consumo de energia, o conforto dos passageiros, ou uma análise de custo-benefício detalhada da implementação das RAs propostas não foram o foco principal da modelagem;
- **Integração com Dados em Tempo Real e Manutenção Preditiva:** Os modelos utilizam dados aproximados para validação e simulação de cenários. No entanto, a integração contínua com dados operacionais (em tempo real) para otimização dinâmica, detecção proativa de falhas ou suporte a decisões de manutenção preditiva em um ambiente operacional não foi explicitamente abordada como parte da metodologia ou dos resultados;
- **Consideração de Fatores Humanos e Complexidade Operacional:** A modelagem se concentra nos aspectos técnicos/operacionais dos equipamentos do SSCT dos TUEs. Fatores humanos, como erros de operação, procedimentos de emergência complexos ou a interação entre os operadores do Centro de Controle Operacional (CCO) e os dispositivos automatizados do SSCT não são explicitamente incorporados (através de expressões de guarda, por exemplo) nos modelos de *SPN* propostos;
- **Escalabilidade dos Modelos *SPN* propostos:** Embora a ferramenta Mercury

seja utilizada para avaliação, a complexidade computacional para a análise de redes ferroviárias de grande porte, com um número significativamente maior de estações, trens e rotas de tráfego dos TUEs em operação, pode apresentar desafios práticos que não foram abordados nos estudos realizados.

3.3 TRABALHOS FUTUROS

Com base nas limitações dos estudos apresentados, os trabalhos futuros podem explorar as seguintes direções:

- **Expansão e Generalização dos Modelos:** Ampliar os modelos de Redes de Petri Estocásticas para incluir outros tipos de falhas e eventos, como falhas de via (trilhos ou talas danificadas, depressão no lastro/sublastro, roubo de cabos de retorno de tração) e condições climáticas adversas, a fim de aumentar a robustez e a aplicabilidade dos modelos a diferentes cenários pertinentes à rotina ferroviária. Além disso, investigar a aplicação dos modelos propostos a outras linhas metroferroviárias, com diferentes características operacionais e infraestruturais, para validar a generalização da abordagem;
- **Integração com Dados em Tempo Real:** Desenvolver mecanismos para integrar os modelos com dados em tempo real provenientes dos sistemas de sinalização e controle ferroviário, permitindo uma avaliação dinâmica do desempenho e da disponibilidade, e possibilitando a tomada de decisões proativas para otimização do tráfego;
- **Otimização Multi-Objetivo:** Explorar abordagens de otimização multi-objetivo para balancear diferentes métricas de desempenho (tempo de viagem e intervalo entre trens com o tempo de chegada dos passageiros nas estações/plataformas, por exemplo) com a disponibilidade do sistema e o custo operacional, buscando soluções que maximizem a eficiência e a resiliência do sistema ferroviário;
- **Análise de Segurança e Resiliência Cibernética:** Aprofundar a análise de segurança dos sistemas ferroviários, considerando não apenas falhas de equipamentos, mas também ataques cibernéticos e vulnerabilidades de *hardware/software*, além de propor estratégias para aumentar a resiliência cibernética da infraestrutura dos dispositivos e equipamentos de sinalização e controle do tráfego de trens;

- **Interface Gráfica e Ferramentas de Apoio à Decisão:** Desenvolver uma interface gráfica amigável para os modelos propostos, facilitando a interação de operadores e planejadores ferroviários, criar ferramentas de apoio à decisão que permitam simular diferentes cenários e avaliar o impacto de intervenções das equipes de manutenção (através do tempo médio de recuperação de equipamentos, por exemplo) no sistema;
- **Estudo de Impacto Ambiental e Sustentabilidade:** Investigar o impacto ambiental das operações ferroviárias e como as otimizações propostas podem contribuir para a redução do consumo de energia e das emissões de carbono, promovendo um transporte menos poluente e sustentável.

Referências

- DALAPATI, P.; PAUL, K. Multi-agent-based dynamic railway scheduling and optimization: a coloured petri-net model. **Advances in Computational Intelligence**, Springer, v. 2, n. 4, p. 27, 2022. ISSN 2730-7808. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s43674-022-00039-7>>.
- FEBBRARO, A. D.; GIGLIO, D.; SACCO, N. On analyzing the vulnerabilities of a railway network with petri nets. **Transportation Research Procedia**, v. 27, p. 553–560, 2017. ISSN 2352-1465. 20th EURO Working Group on Transportation Meeting, EWGT 2017, 4–6 September 2017, Budapest, Hungary.
- LITHERLAND, J.; ANDREWS, J. A petri net asset management framework for railway switches and crossings. **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit**, SAGE Publications, v. 237, n. 3, p. 322–334, 2023. ISSN 2041-3017.
- MACIEL, P. R. M. **Performance, Reliability, and Availability Evaluation of Computational Systems, Volume 2: Reliability, Availability Modeling, Measuring, and Data Analysis**. Boca Raton, FL: CRC Press, 2023. ISBN 978-1032306407. Disponível em: <<https://www.routledge.com/Performance-Reliability-and-Availability-Evaluation-of-Computational-Systems-Volume-2-Reliability-Availability-Modeling-Measuring-and-Data-Analysis/Maciel/p/book/9781032306421>>.
- MARINHO, O.; CALLOU, G. Avaliação do impacto de rotas aditivas de tráfego sobre indicadores de desempenho e disponibilidade de sistemas metroferroviários. In: **Anais do L Seminário Integrado de Software e Hardware**. Porto Alegre, RS, Brasil: SBC, 2023. p. 344–355. ISSN 2595-6205. Disponível em: <<https://sol.sbc.org.br/index.php/semish/article/view/25086>>.
- MARINHO, O.; CALLOU, G.; MELO, R.; ANDRADE, E. Performability evaluation of railway systems: A study on the impact of adding alternative routes / avaliação de performabilidade de sistemas ferroviários: Um estudo sobre o impacto da adição de rotas alternativas. **IEEE Latin America Transactions**, v. 21, n. 2, p. 270–276, 2022. Disponível em: <<https://latamt.ieee9.org/index.php/transactions/article/view/6770>>.
- SILVEIRA, M. R. **A importância geoeconômica das estradas de ferro no Brasil**. xxii, 453 p. Tese (Tese (Doutorado)) — Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Ciências e Tecnologia, Presidente Prudente, Presidente Prudente, SP, 2003. Orientador: Armen Mamigonian. Financiamento: FAPESP. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/11449/101439>>.
- TOGUYÉNI, A. Synthesis of petri nets based controllers for the automation of train routing in a railway node. In: **Proceedings of the 20th International Conference on Modelling and Applied Simulation**. [S.l.: s.n.], 2021. p. 176–185. ISBN 978-88-85741-61-4. ISSN 2724-0037. Originally submitted to IMAACA 2021.

APÊNDICES

APÊNDICE A – AVALIAÇÃO DE PERFORMABILIDADE DE SISTEMAS FERROVIÁRIOS: UM ESTUDO SOBRE O IMPACTO DA ADIÇÃO DE ROTAS ALTERNATIVAS

MARINHO, O.; CALLOU, G.; MELO, R.; ANDRADE, E. Performability Evaluation of Railway Systems: A Study on the Impact of Adding Alternative Routes: Avaliação de Performabilidade de Sistemas Ferroviários: Um Estudo sobre o Impacto da Adição de Rotas Alternativas. IEEE Latin America Transactions, [S. l.], v. 21, n. 2, p. 270–276, 2022. <https://latamt.ieee9.org/index.php/transactions/article/view/6770>.

Contribuição do autor: O autor foi responsável pela estruturação da metodologia adotada, desenvolvimento dos modelos propostos, geração das métricas avaliadas, execução dos estudos de caso aplicados, levantamento dos dados técnicos utilizados, criação das imagens e tabelas exibidas, elaboração dos gráficos formatados para os resultados obtidos e edição do texto dissertativo, original e de caráter acadêmico-científico.

Performability Evaluation of Railway Systems: A Study on the Impact of Adding Alternative Routes

Osvaldo Marinho , Gustavo Callou , Rodemarck Melo  and Ermeson Andrade 

Abstract—Railway systems require high performance, availability and reliability, in addition to safety and maintainability as attributes for the implementation of equipment responsible for signaling, control, and traffic of trains on the railway. Studies are necessary to deal with these essential requirements for the quality of rail systems. This article proposes a set of models in stochastic Petri nets to evaluate the impact of adding alternative routes on performance and availability indicators in railway systems. Metrics such as travel time, the interval between trains, and passenger waiting time at stations were collected and analyzed to estimate the impact of such metrics on railway systems. This work also presents case studies that simulate the implications of the availability of signaling and train control equipment on the performance of a railway and demonstrate the versatility of the proposed model in allowing the insertion of stations and varying the number of trains in the studied railway network. The results obtained demonstrate that the availability of the studied system can be increased from 81,674% to 98,456%.

Index Terms—Performance Evaluation, Availability, Railway Systems.

I. INTRODUÇÃO

As ferrovias têm implicações de natureza social e econômica que associadas à rotina de transporte de passageiros e insumos nas cidades e grandes centros urbanos são de fundamental importância. Além disso, é importante frisar que, além de encurtar distâncias, as “estradas de ferro” aumentam o volume de mercadorias, baixando o preço de produtos e exercendo um papel importante como elemento necessário à infraestrutura das cidades [1]. Todavia, sabe-se que esses sistemas demandam alto desempenho e disponibilidade. Nesse contexto, esse trabalho propõe modelos em redes de Petri estocásticas para avaliar o desempenho e a disponibilidade de sistemas ferroviários de transporte. Tais propriedades possibilitam a avaliação da ferrovia sem a necessidade de criação de protótipos ou intervenção nos equipamentos de sinalização e controle dos trens.

O principal objetivo deste trabalho é avaliar o impacto da disponibilidade dos sistemas de sinalização ferroviários sobre o desempenho dos trens na ferrovia. Para atingir este objetivo, foram propostos modelos em redes de Petri (RdP) estocástica, também conhecida como *stochastic Petri nets* (SPN). Além de computar a métrica que determina o tempo de intervalo entre os trens em operação num dado instante, por exemplo, a SPN permite avaliar como a adição de rotas alternativas (RAs) impacta o desempenho da operação dos trens.

Osvaldo Marinho, Gustavo Callou, Rodemarck Melo and Ermeson Andrade are from the Computing Department, Universidade Federal Rural de Pernambuco - UFRPE, Recife, PE, 52171-900 Brazil e-mail:osvaldo.santosnt@ufrpe.br

Para avaliar os modelos propostos, foi selecionado um ramal ferroviário (Linha Sul) do metrô da cidade de Recife, capital do estado de Pernambuco - Brasil, como objeto de estudo. A Linha Sul é um dos 3 ramais operados pelo Metrorec, empresa subordinada à Companhia Brasileira de Trens Urbanos (CBTU). Vale ressaltar que a CBTU é uma empresa pública de transporte urbano que opera no sistema de transporte de passageiros. O sistema de trens urbanos do Recife é composto por 3 ramais ferroviários, sendo dois eletrificados (Linhas Sul e Centro) e um operado por veículos leves sobre trilhos - VLT (Linha Diesel). A extensão total é de 71 km, abrangendo os municípios de Recife, Jaboatão dos Guararapes, Camaragibe e Cabo de Santo Agostinho. A ferrovia conta com 37 estações e transporta aproximadamente 400 mil passageiros por dia [2].

Além das contribuições já apresentadas, os modelos propostos permitem a identificação dos equipamentos cujas falhas mais impactam na disponibilidade da ferrovia. Fora isso, também é possível quantificar o número ideal de Trens Unidade Elétrica (TUEs) em operação a fim de se otimizar o tráfego ferroviário. Dessa forma, este trabalho possibilita a otimização de métricas como: tempo de viagem, intervalo entre trens e tempo de espera do passageiro na estação.

O artigo segue estruturado conforme a seguinte organização. A Seção II apresenta o referencial teórico, retratando as informações necessárias para uma melhor compreensão desse trabalho. A Seção III mostra trabalhos relacionados com avaliação de sistemas ferroviários. A Seção IV apresenta a metodologia utilizada para avaliar o desempenho e a disponibilidade de sistemas ferroviários. A Seção V apresenta os modelos propostos. A Seção VI compreende os estudos de caso. Por fim, a Seção VII conclui o trabalho e apresenta futuros direcionamentos da pesquisa.

II. REFERENCIAL TEÓRICO

A. Linha Sul - Metrorec

A Linha Sul do metrô do Recife é um trecho de 14 km, composto por 12 estações: RECS, JOAS, PAZ, IMB, FAL, SHO, NEV, PTO, LAR, GUA, PRZ e CAJ. A distribuição dos equipamentos de sinalização é composta por 3 estações mestre (RECS, NEV e CAJ) e 8 estações satélite (RECS, JOAS, IMB, SHO, NEV, LAR, PRZ e CAJ). Vale ressaltar que o critério adotado para selecionar uma estação como “satélite” ou “mestre” dependerá exclusivamente dos equipamentos de sinalização e controle a ela associados, não possuindo relação alguma com o total de estações ou plataformas da ferrovia. Estações mestre tem uma sala com: Gerenciador de Comunicação (GC), Painel de Controle Local (PCL), Controlador de Movimento do Trem/ Multiplexado (CMT/MUX) e Eletrônica de

Circuito de Via (ECV). Os Aparelhos de Mudança de Via (AMV) e Sinais (SIN) comunicam-se com o gabinete do CMT/MUX. Já o Circuito de Via (CDV) comunica-se com as estações através dos ECVs. Os circuitos de via estão dispostos ao longo da ferrovia, possibilitando que o CMT/MUX gerencie a velocidade e localização dos trens [3]. A Figura 1 ilustra a topologia de comunicação. Nessa figura existe uma simetria entre os 3 domínios da linha sul, ou seja, permitindo a fragmentação do sistema e análise em separado.

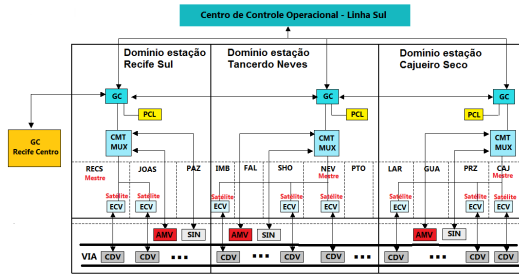


Fig. 1. Arquitetura dos equipamentos de sinalização Alstom - Linha Sul do metrô do Recife [3].

B. Avaliação de Desempenho e Disponibilidade

No que tange às técnicas de avaliação de desempenho e disponibilidade de sistemas, as redes de Petri (RdP) destacam-se por permitir a representação de sistemas a partir de uma forte base matemática, permitindo a modelagem de sistemas paralelos, concorrentes, assíncronos e não determinísticos [4]. Essas redes foram desenvolvidas por Carl Adam Petri e são formadas por elementos ativos (transições) e passivos (lugares ou *places*). Esses elementos são conectados por arcos direcionados. Já as *SPNs*, que são uma extensão das RdP, passam a ter a possibilidade de associar tempo às transições. Sendo assim, existe a transição estocástica, onde um tempo é associado para reproduzir o período de execução de uma ação. Além disso, existe a transição imediata, que tem o tempo = 0. Por último, tem-se o arco inibidor, que só permite o "disparo" de uma transição quando não há *tokens* no lugar a ele associado. A Figura 2 mostra os elementos das *SPNs*.



Fig. 2. Elementos de uma *SPN*.

Esse trabalho faz uso das *SPNs* para computar o desempenho dos trens na ferrovia e também a disponibilidade dos equipamentos de sinalização e controle do tráfego ferroviário. Uma vez que os indicadores de desempenho avaliados mensuram valores associados a intervalos de tempo, a "lei de Little" foi adotada para a geração das métricas de interesse. A partir da Equação 1, Little afirma que o número médio de longo prazo (L) de "clientes" em um sistema em regime estacionário é igual a taxa média efetiva de chegada a longo prazo (λ) multiplicada pelo tempo médio (W) que um cliente gasta no sistema [5].

$$L = \lambda W \quad (1)$$

III. TRABALHOS RELACIONADOS

Esta seção apresenta trabalhos sobre avaliação de sistemas ferroviários. Em Zimmermann et al. [6], um modelo *SPN* que avalia o impacto das falhas de links de comunicação sobre o desempenho do sistema europeu de controle contínuo de trens foi proposto. Os autores consideraram os dados reais de falhas do sistema, no entanto, não destacaram a influência da disponibilidade sobre os indicadores de desempenho. Em Wang and Bai [7] foi avaliado o desempenho do tráfego de trens em arquiteturas de bloco móvel (*moving block- MB*) do sistema europeu de controle de trens baseado em comunicação (*Communication Based Train Control - CBTC*). Para alcançar tal objetivo, foi utilizado um algoritmo de otimização quântica (*Quantum Optimization Algorithm - QOA*) a fim de melhorar os métodos de pesquisa. Essa pesquisa não realizou um estudo focado na otimização do sistema e, assim, não fez um estudo sobre adição de RA.

Hai et al. [8] quantificaram a disponibilidade de sistemas ferroviários através da confiabilidade e precisão das informações de sincronização de tempo em equipamentos vitais, tais como o relógio mestre (*master clock*) da ferrovia. Esse trabalho fez uso de modelos de *fail over* para propor modelos *SPN* que analisam a rede. Em Songwiroj et al. [9] foi apresentado um modelo *CPN* a partir de "blocos de construção" que são submodelos predefinidos de desempenho e que reproduzem equipamentos de alto nível da ferrovia. Por exemplo, bloco de construção das estações de trem, bloco de construção da malha ferroviária, etc. Esses trabalhos fizeram uso de dados reais do sistema, contudo as pesquisas focaram na avaliação qualitativa dos resultados.

Saideh et al. [10] avaliaram o desempenho de sistemas ferroviários de alta velocidade (*High Speed Railway - HSR*) mediante diferentes técnicas de *Multi-Carrier Modulation - MCM*, que são consideradas um dos principais "blocos de construção" dos sistemas de comunicação de trens no continente europeu. A técnica adotada permite a avaliação de diferentes cenários no sistema de comunicação, tais como: escassez de espectro, comunicação assíncrona e parâmetros de ruído no canal.

Wu and Liu [11] propuseram um modelo *CPN* que identifica caminhos ("rotas") que podem gerar situações de risco. A estratégia adotada pelos autores permite uma análise da segurança de tráfego de trens, mas não possibilita a simulação de cenários onde o sistema possa ser otimizado quanto ao desempenho e a disponibilidade. Já em Daohua et al. [12] foi proposta uma *CPN* que avalia os aspectos de segurança do sistema de controle de trem chinês. Esse artigo avaliou diferentes cenários, levou em consideração a operação dos trens e a disponibilidade de componentes do sistema. Contudo, não foi o foco do trabalho a avaliação do impacto da variação da disponibilidade sobre o desempenho do sistema.

IV. METODOLOGIA

A Figura 3 apresenta a metodologia adotada para avaliar o desempenho e a disponibilidade de sistemas ferroviários. A primeira etapa da metodologia corresponde ao entendimento dos aspectos lógicos e funcionais do sistema avaliado. Nessa

fase o pesquisador já deve ter estabelecido o objetivo da avaliação, pois ele influenciará nas decisões de projeto das seções a seguir [13].

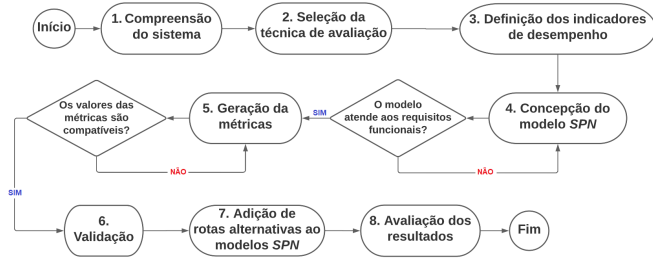


Fig. 3. Desenho da pesquisa.

A etapa seguinte é a de seleção da técnica de avaliação, que se caracteriza pela definição do método de avaliação de sistemas que será adotado. É válido salientar que de acordo com as circunstâncias de tempo e recursos disponíveis, a escolha de um ou mais métodos podem possibilitar uma melhor representação do sistema analisado [14]. A técnica de avaliação adotada nesse artigo corresponde às *SPNs*, com foco na análise quantitativa que avalia o desempenho através de indicadores como tempo de resposta ou capacidade.

A terceira etapa corresponde a definição dos indicadores de desempenho. A definição dos indicadores pode mudar conforme o método de avaliação selecionado. Por exemplo, como o objetivo principal desse artigo é avaliar o impacto da adição de RAs no desempenho de sistemas ferroviários de transporte de passageiros, foram definidos 3 índices básicos que são inerentes a tais sistemas: (i) **Viagem**: representa o tempo médio necessário para o trem percorrer todas as plataformas das estações; (ii) **Intervalo**: diz respeito ao tempo médio necessário para o trem chegar em uma determinada plataforma da estação; (iii) **Embarque**: traduz o tempo médio necessário para o usuário embarcar em um trem que chegou na plataforma de uma determinada estação.

Uma vez concluídas as fases de compreensão do sistema, seleção da técnica de avaliação e definição dos indicadores de desempenho, pode-se dar início ao processo de modelagem do sistema. Nessa etapa, ocorrerá a concepção do modelo de rede de Petri proposto. Nessa fase é preciso ainda delimitar alguns conceitos importantes sobre o sistema que será modelado [15]. Durante a concepção do modelo *SPN* foram delimitados os seguintes conceitos:

- **Escopo do modelo**: define a representação do tráfego de trens (modelo de desempenho) e dos equipamentos de sinalização e controle ferroviário (modelo de disponibilidade).
- **Grau de complexidade**: estabelece as propriedades e atributos lógico operacionais implementados no modelo proposto.
- **Fragmentação do sistema**: delimita o sistema, ou sub-sistema, que será modelado.

A partir dos indicadores de desempenho são estabelecidas as métricas que serão adotadas nos modelos. Então, essa fase corresponde a esta atividade que, além de computar parâmetros

de performance de sistemas ferroviários de transporte de passageiros, possibilita que o modelo proposto possa ser validado. A fase seguinte corresponde a validação e tem como objetivo o de validar o modelo proposto anteriormente. Essa validação ocorre mediante a comparação dos valores computados pelo modelo *SPN* com os fornecidos pela CBTU - Metretec. Além disso, um intervalo matemático de confiança, obtido através de simulação estacionária do modelo, autentica os valores obtidos nas simulações executadas nos diversos cenários.

A etapa seguinte corresponde a fase de adição de RAs aos modelos. Sendo assim, a partir do modelo de performabilidade (desempenho associado à disponibilidade) e das métricas definidas, o impacto da adição de RAs no sistema ferroviário pode ser avaliado. Todo processo de modelagem, geração de métricas e análise dos cenários (variação do número de TUEs e RAs) foi realizado utilizando a ferramenta Stars [16] que faz uso do Mercury [17] como ambiente de avaliação. Uma vez adicionadas as rotas alternativas propostas por esse artigo, os modelos que reproduzem os aspectos de falha e operação das RAs também passam a impactar as métricas de desempenho e disponibilidade geradas. Após a validação do modelo, é chegada a etapa de avaliação de cenários. Nessa fase, serão avaliados diferentes cenários, tais como: modelos sem a adição de rotas alternativas e com a adição de uma a seis RAs.

V. MODELOS

A. Modelo de Desempenho

Esta seção apresenta o modelo de desempenho proposto para reproduzir o funcionamento da circulação dos trens unidade elétrica através dos CDVs pertencentes ao domínio da estação RECS. De acordo com a Figura 1, esse fragmento da ferrovia possui 6 CDVs que representam as plataformas das estações RECS, JOAS e PAZ. Cada estação possui 2 plataformas (uma em cada via) e só permite a chegada de um TUE por vez.

A Figura 4 ilustra o modelo de desempenho proposto para representar esse fragmento da ferrovia. Partindo da plataforma 1 da estação RECS (*place* RECS1), o TUE (representado por um *token*) desloca-se, no sentido do arco direcionado, para a próxima plataforma (*place* JOAS1) através do "disparo" da transição RECS1_JOAS1. Vale destacar que essa transição somente pode ser disparada se não houver trem ocupando a plataforma seguinte (*token* em JOAS1). Em seguida, a transição JOAS1_PAZ1 fica habilitada para ser disparada. O disparo dessa transição reproduz a movimentação do trem de JOAS1 para PAZ1. A estação PAZ1 representa o final da via 1. Dessa forma, o TUE converge para a plataforma PAZ2 com o disparo da transição PAZ1_PAZ2. Sendo assim, o trem pode retornar à "estação inicial", finalizando uma "viagem completa" ao chegar na plataforma RECS1. Posteriormente, um novo ciclo de operação pode ser iniciado. É importante frisar que o critério de impossibilidade da ocupação de um mesmo CDV por mais de um TUE é modelado pelo arco inibidor presente entre cada transição e a estação seguinte.

Medições foram realizadas para possibilitar a obtenção do tempo de cada viagem do trem de uma estação para a outra. Essa medição pode ser realizada por instrumentos que

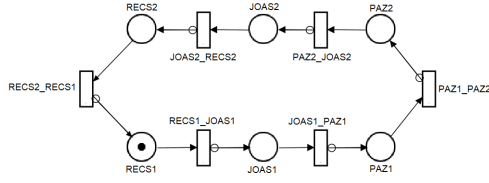


Fig. 4. Modelo de desempenho - Domínio da região RECS.

medem o intervalo de tempo que um TUE leva para sair de RECS1 e chegar em JOAS1, por exemplo. Uma outra possibilidade de se obter tais informações é através da consulta dos dados técnicos registrados pela empresa operadora do sistema (CBTU - Metrorc). De posse dos dados compartilhados pela empresa, a Tabela I, que fornece os dados de velocidade média operacional (VMO) do trem, distância (ΔS) entre as plataformas das estações e os valores de intervalo de tempo (Δt) associados a cada transição estocástica do modelo de desempenho foi gerada. A Tabela I ainda possibilita a determinação do tempo médio (T_m), que traduz a média aritmética dos Δt . Assim sendo, $T_m = 1,548$ minutos.

TABELA I
DADOS DE DISTÂNCIA, VELOCIDADE E TEMPO.

Trecho	ΔS (m)	VMO (km/h)	Transição	Δt (min)
RECS a JOAS	1284,974	48	RECS1_JOAS1	1,606
JOAS a PAZ	1486,586	48	JOAS1_PAZ1	1,858
PAZ a PAZ	200	10	PAZ1_PAZ2	1,2
PAZ a JOAS	1284,974	48	PAZ2_JOAS2	1,606
JOAS a RECS	1486,586	49	JOAS2_RECS2	1,82
RECS a RECS	200	10	RECS2_RECS1	1,2

1) *Métricas de Desempenho*: Esse trabalho adota as seguintes métricas:

- **TEMPO DE VIAGEM**: estima o tempo necessário para o trem passar por todas as plataformas das estações da ferrovia. A expressão gerada para calcular essa métrica tem como base a lei de Little - Equação 1. Além disso, é importante definir que a sintaxe utilizada pelo Mercury para representar uma plataforma (*place*) segue o seguinte formalismo: $\#Place1$, $\#Place2$, $\#Place3$, etc). Portanto, o tempo médio (W) necessário para um TUE passar por todas as plataformas ($\#RECS1$, $\#JOAS1$, $\#PAZ1$, etc) do sistema é dado por:

$$T.Viagem = ((E\{\#RECS1\}) + (E\{\#JOAS1\}) + (E\{\#PAZ1\}) + (E\{\#PAZ2\}) + (E\{\#JOAS2\}) + (E\{\#RECS2\}))/ (E\{\#RECS1\}/T_m) \quad (2)$$

- **INTERVALO ENTRE TRENS**: computa o “tempo esperado” entre os trens (*tokens*) presentes na ferrovia. A métrica gerada considera o tempo médio gasto pelo cliente (T.Viagem) dividido pela probabilidade de haver ao menos um trem em alguma plataforma da ferrovia (somatório das esperanças das plataformas da ferrovia). Portanto, o tempo de intervalo entre trens é:

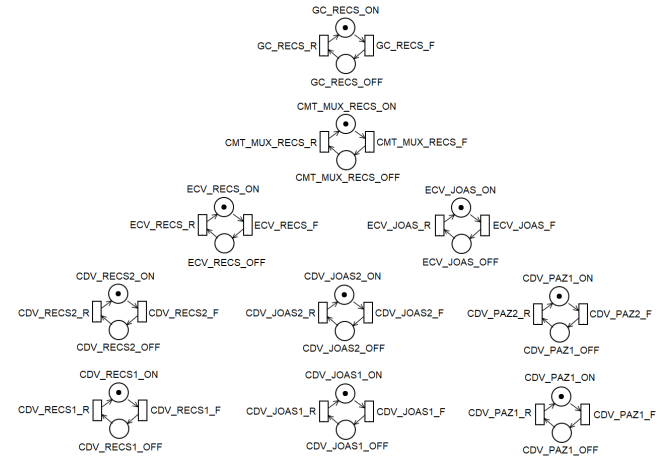
$$T.Intervalo = (((E\{\#RECS1\}) + (E\{\#JOAS1\}) + (E\{\#PAZ1\}) + (E\{\#PAZ2\}) + (E\{\#JOAS2\}) + (E\{\#RECS2\}))/ (E\{\#RECS1\}/T_m))/((E\{\#RECS1\}) + (E\{\#JOAS1\}) + (E\{\#PAZ1\}) + (E\{\#PAZ2\}) + (E\{\#JOAS2\}) + (E\{\#RECS2\})) \quad (3)$$

- **TEMPO DE ESPERA**: considera a esperança de haver um trem em uma das vias do sistema. Considerando o modelo SPN proposto possui duas vias (saída e retorno), o tempo de espera do usuário na plataforma será a metade do tempo de intervalo:

$$T.Espera = (((E\{\#RECS1\}) + (E\{\#JOAS1\}) + (E\{\#PAZ1\}) + (E\{\#PAZ2\}) + (E\{\#JOAS2\}) + (E\{\#RECS2\}))/ (E\{\#RECS1\}/T_m))/((E\{\#RECS1\}) + (E\{\#JOAS1\}) + (E\{\#PAZ1\}) + (E\{\#PAZ2\}) + (E\{\#JOAS2\}) + (E\{\#RECS2\}))/2 \quad (4)$$

B. Modelo de Disponibilidade

Esta seção apresenta o modelo proposto para computar a disponibilidade dos equipamentos de sinalização e controle dos trens no domínio RECS - Figura 1. Por se tratar de uma arquitetura com hierarquia, a falha de um dispositivo superior pode gerar a indisponibilidade dos equipamentos inferiores a ele associados. A Figura 5 demonstra o modelo de disponibilidade que representa as propriedades do funcionamento lógico-operacional dos equipamentos *Alstom* do sistema analisado. As informações dos tempos médios de falha e recuperação dos dispositivos foram coletadas por meio de um *software* de gestão da manutenção utilizada pela empresa operadora do sistema estudado. O *software* em questão, gerencia os tempos de abertura de uma solicitação de serviço (SS) e de encerramento da mesma, permitindo assim que os tempos médios de falha e recuperação possam ser coletados.

Fig. 5. Modelo de disponibilidade dos equipamentos de sinalização *Alstom* - Domínio da região RECS.

1) *Métricas de Disponibilidade*: avalia a probabilidade (P) do ambiente estar funcionando em um determinado instante de tempo. Para cada dispositivo modelado haverá um submodelo em SPN que o representa, como ilustrado na Figura 5. Portanto, para o sistema analisado a disponibilidade do sistema (D.Sist) é dada por:

$$D.Sist = \{(\#GC_RECS_ON = 1) \text{ AND } (\#CMT_MUX_RECS_ON = 1) \text{ AND } (\#ECV_RECS_ON = 1) \text{ AND } (\#ECV_JOAS_ON = 1) \text{ AND } (\#CDV_RECS1_ON = 1) \text{ AND } (\#CDV_RECS2_ON = 1) \text{ AND } (\#CDV_JOAS1_ON = 1) \text{ AND } (\#CDV_JOAS2_ON = 1) \text{ AND } (\#CDV_PAZ1_ON = 1) \text{ AND } (\#CDV_PAZ2_ON = 1)\} \quad (5)$$

C. Modelo de Performabilidade

O modelo de performabilidade provém da combinação dos modelos de desempenho e de disponibilidade, através do relacionamento estabelecido por expressões de guarda e arcos inibidores que reproduzem a comunicação lógica dos equipamentos de sinalização *Alstom* com a ferrovia, respeitando os requisitos de funcionamento do tráfego operacional de trens.

A Figura 6 além de ilustrar a hierarquia dos dispositivos *Alstom* dentro do modelo proposto (do mais crítico - acima, para o menos vital - abaixo), apresenta como as RAs são adicionadas ao longo da ferrovia, sendo cada rota implementada paralelamente ao CDV que pretende "reforçar". A primeira rota alternativa, por exemplo, só é ativada quando o CDV da plataforma 1 de Recife Sul apresenta falha (*token no place* "CDV_RECS1_OFF") e AMV da RA 1 estiver em operação (*token no place* "RA_1_ON"), ou seja: "(CDV_RECS1_OFF=1)AND(RA_1_ON=1)".

VI. ESTUDOS DE CASO E RESULTADOS

Esta seção apresenta um estudo que mostra a aplicabilidade dos modelos propostos. Rotas alternativas (RAs) também são ilustradas a fim de otimizar a performabilidade. Os estudos ainda consideram a variação do número de TUEs.

A. Estudo I: Avaliação do Sistema sem RAs

Inicialmente esse estudo retrata a aplicabilidade do modelo ilustrado na Figura 4. Esse cenário, sem rotas alternativas, é capaz de reproduzir a operação do sistema sem o impacto das falhas dos equipamentos de sinalização ferroviária. Sendo assim, os valores obtidos representam o "resultado ótimo". A Tabela II apresenta os resultados obtidos para os tempos de viagem, de intervalo entre trens e de espera na plataforma. Essa tabela apresenta ainda os intervalos de confiança (IC) para cada métrica e os compara com os valores de Δt para os intervalos de viagem, intervalo entre trens e espera na plataforma, obtidos através da aplicação da fórmula de velocidade média ($VM = \Delta S / \Delta t$) para os dados fornecidos pela Tabela I.

Uma vez que o Δt viagem representa o somatório dos intervalos de tempo entre as plataformas das estações (9,290 minutos), pode-se calcular o tempo de intervalo entre trens através da divisão do tempo de viagem pelo número de TUEs em operação. Já o Δt espera, resulta da divisão do tempo de intervalo pelo número de vias. Portanto, para um cenário com 3 TUEs por exemplo, tem-se: Δt Viagem = 9,290 minutos; Δt Intervalo = $9,290/3 = 3,096$ minutos e Δt Espera = $3,096/2 = 1,548$ minutos. A mesma metodologia segue para os demais cenários apresentados pela Tabela II.

É importante ressaltar que a Tabela III mostra tanto os resultados obtidos através do modelo SPN proposto como, também, os valores computados através das equações anteriormente explicadas. Pode-se observar que todos os valores computados via equação se encontram dentro do intervalo de confiança dos resultados obtidos através do modelo SPN. Por exemplo, os valores para δt Intervalo, que representam o tempo de intervalo entre os trens computado via equação,

TABELA II
RESULTADOS DAS MÉTRICAS DE DESEMPENHO. ΔT
VIAG.=9,29.

N TUEs	T.Viag(m)[IC]	T.Interv.(m)[IC]	Δt Interv.	T.Esp.(m)[IC]	Δt Esp.
1	9,22[9,01;9,32]	9,22[9,01;9,32]	9,29	4,61[4,51;4,76]	4,65
2	9,25[9,11;9,34]	4,63[4,55;4,76]	4,65	2,31[2,23;2,49]	2,32
3	9,28[9,20;9,41]	3,09[3,01;3,20]	3,10	1,55[1,53;1,65]	1,55
4	9,30[9,13;9,37]	2,33[2,21;2,41]	2,32	1,16[1,10;1,21]	1,16
5	9,32[9,27;9,33]	1,87[1,82;1,97]	1,86	0,94[0,91;1,06]	0,93
Médias:	9,28[9,15;9,35]	4,23[4,12;4,33]	4,24	2,11[2,06;2,23]	2,12

encontram-se dentro do intervalo obtido pelo modelo na coluna *T.Intervalo*, validando assim o modelo SPN proposto.

Sobre a disponibilidade do sistema sem RAs, sabe-se que o mesmo é considerado operacional se todos os equipamentos também estiverem operacionais. Esse comportamento foi representado no modelo da Figura 5 e pela métrica 5. Os tempos médios de falha e recuperação, dados necessários para se calcular a disponibilidade de cada dispositivo, foram computados a partir dos dados gerados pelo *software* de gestão da manutenção da empresa operadora do sistema. O resultado da disponibilidade do sistema obtido foi de 81,674%.

Após avaliar o desempenho e a disponibilidade do sistema ferroviário sem RAs separadamente, é importante também realizar a análise desses sistemas em conjunto. Em outras palavras, vamos quantificar o impacto da disponibilidade no desempenho. Esses resultados são obtidos pela avaliação do modelo apresentado na Figura 6.

A Tabela III exibe os resultados das avaliações de performabilidade de três indicadores de desempenho (T.Viagem, T.Intervalo trens e T.Espera) em 6 cenários distintos (variação do número de TUEs). Comparando-se as Tabelas II e III, observa-se a avaliação de 1 cenário a mais. Isso ocorre porque o modelo de desempenho (Figura 4) pode atingir "deadlock" no cenário com 6 TUEs (ponto de "saturação"), inviabilizando a sua avaliação."

Já o modelo SPN proposto na Figura 6, possibilita o disparo de algumas transições, as relacionadas aos submodelos de disponibilidade dos equipamentos de sinalização e controle do trem (sistema *Alstom* - Figura 1). Os resultados apresentados na Tabela III, demonstram que o modelo de performabilidade permite a avaliação de um cenário saturado.

TABELA III
RESULTADOS - MODELO DE PERFORMABILIDADE SEM
RAs.

N TUEs	T.Viagem(min)[IC]	T.Intervalo trens(min)[IC]	T.Espera(min)[IC]
1	10,73[10,62; 10,84]	10,73[10,62; 10,84]	5,37[5,23; 5,41]
2	11,01[10,90; 11,10]	5,51[5,48; 5,67]	2,75[2,63; 2,86]
3	11,32[11,30; 11,40]	3,77[3,71; 3,78]	1,89[1,81; 2,90]
4	11,51[11,45; 11,57]	2,88[2,79; 3,89]	1,44[1,31; 1,46]
5	11,57[11,52; 11,64]	2,31[2,30; 2,46]	1,17[1,12; 1,23]
6	11,59[11,41; 11,65]	1,93[1,81; 2,06]	0,97[0,84; 1,01]
Médias:	11,29[11,20; 11,37]	4,52[4,45; 4,78]	2,26[2,16; 2,48]

B. Estudo II: Avaliação do Sistema com RAs

Esse estudo computa as implicações da adição de RAs, paralelas aos CDVs da malha ferroviária, sobre o desempenho

VII. CONCLUSÃO

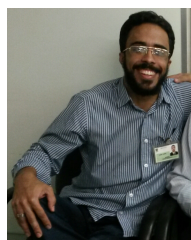
Esse artigo propôs um modelo em *SPN* que permite avaliar a disponibilidade de sistemas de sinalização e controle de trens associada à avaliação do desempenho de trens no sistema. Os resultados obtidos demonstraram a aplicabilidade dos modelos propostos para avaliar cenários com variações no número de TUEs e na quantidade de rotas alternativas. Além de possibilitar a elaboração de estratégias de otimização do tráfego dos trens, o modelo também computa o impacto da disponibilidade no desempenho. As informações, dados e resultados obtidos, além de quantificar os impactos da implementação de novos dispositivos sobre as métricas avaliadas, possibilitam dar insumos aos projetistas de tais sistemas ferroviários para melhorar as métricas de interesse. Sobre os futuros direcionamentos dessa pesquisa, pretende-se avaliar, por exemplo, os CDVs que mais impactam sobre a disponibilidade do sistema. Além disso, também iremos avaliar outros sistemas ferroviários a partir dos modelos *SPN* propostos, bastando ajustar os parâmetros de entrada e algumas particularidades que possam existir.

AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer à FACEPE e ao CNPq pelo apoio financeiro à essa pesquisa. Agradecimentos também à CBTU pelo apoio ao trabalho.

REFERÊNCIAS

- [1] M. Silveira, "A importância geoeconômica das estradas de ferro no Brasil," in *Tese (Doutorado) — Universidade Estadual Paulista (UNESP)*, p. 4, 2003.
- [2] C. Metrorec, "Sistemas CBTU." <https://www.cbtu.gov.br/index.php/pt/sistemas-cbtu/recife>, 2021. [Online; accessed 22-Agosto-2021].
- [3] Alstom, *Alstom - Railway Signaling Systems*. Superintendência de Trens Urbanos do Recife - STUREC. Gerencia de Sistemas Fixos e Via Permanente - GOSIP, 2007.
- [4] P. Maciel, R. Lins, and P. Cunha, "Escola de computação, campinas," in *Introdução às Redes de Petri e Aplicações*, p. 4, Julho 1996.
- [5] D. Simchi-Levi and M. A. Trick, "Introduction to little's law as viewed on its 50th anniversary," in *Operations Research*, vol. 5, p. 223, 2013.
- [6] A. Zimmermann and G. Hommel, "A train control system case study in model-based real time system design," in *Proceedings International Parallel and Distributed Processing Symposium*, pp. 8 pp., 2003.
- [7] F. Wang and Z. Bai, "Research for urban rail transit train regulation based on time petri nets," in *2010 International Conference on Computer and Communication Technologies in Agriculture Engineering*, vol. 2, pp. 461–465, 2010.
- [8] N. Hai, C.-Z. Zhang, Y. Yu, and Y. Tang, "Reliability analysis of clock source of railway time synchronization network based on spn," in *2019 International Conference on Intelligent Transportation, Big Data Smart City (ICITBS)*, pp. 45–48, 2019.
- [9] N. Songwiroj, W. Vatanawood, and S. Vanit-Anunchai, "Railway network modeling using building block of timed coloured petri nets," in *2018 IEEE 4th International Conference on Computer and Communications (ICCC)*, pp. 528–533, 2018.
- [10] M. Saideh, Y. Alsaba, I. Dayoub, and M. Berbineau, "Performance evaluation of multi-carrier modulation techniques in high speed railway environment with impulsive noise," in *2019 IEEE 2nd 5G World Forum (5GWF)*, pp. 243–248, 2019.
- [11] D. Wu and J. Liu, "An approach to safety analysis of train control systems with coloured petri nets," in *2021 40th Chinese Control Conference (CCC)*, pp. 4744–4750, 2021.
- [12] D. Wu, D. Lu, and T. Tang, "Qualitative and quantitative safety evaluation of train control systems (ctcs) with stochastic colored petri nets," *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, pp. 1–16, 2021.
- [13] A. Lopes, "Universidade federal rural de pernambuco," in *Metodologia de Análise de Desempenho de Sistemas de Transporte Público*, (Recife), pp. 18–20, 2019.
- [14] G. Callou, P. Maciel, E. Tavares, E. Andrade, B. Nogueira, C. Araújo, and P. Cunha, "Energy consumption and execution time estimation of embedded system applications," *Microprocessors and Microsystems*, vol. 35, no. 4, pp. 426–440, 2011.
- [15] M. S. Obaidat and N. A. Boudriga, "Fundamentals of performance evaluation of computer and telecommunication systems," in *John Wiley and Sons*, pp. 47–49, 2010.
- [16] W. de Souza Leonardo and G. Callou, "Stars: um ambiente integrado para avaliação de disponibilidade, custo e consumo de energia de sistemas," *Revista Brasileira de Computação Aplicada*, vol. 13, pp. 10–21, set. 2021.
- [17] B. Silva, R. Matos, G. Callou, J. Figueiredo, D. Oliveira, J. Ferreira, J. Dantas, A. Lobo, V. Alves, and P. Maciel, "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*, 2015.



Osvaldo Santos Neto é bacharel em sistemas de informação pela Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE) e mestrando no programa de pós-graduação em Informática Aplicada (PPGIA) pela mesma instituição. Atualmente, exerce o cargo de técnico industrial na Superintendência de Trens Urbanos do Recife (STU-REC), trabalhando com o restabelecimento de sistemas de sinalização, controle e supervisão de tráfego ferroviário.



Gustavo Callou possui graduação em Ciência da Computação pela Universidade Católica de Pernambuco (2005), mestrado (2009) e doutorado (2013) em Ciências da Computação, ambos pela Universidade Federal de Pernambuco. Entre 2010 e 2011, fez doutorado sanduíche na Universidade de Wuppertal (Alemanha). Atualmente, é professor do Departamento de Computação da Universidade Federal Rural de Pernambuco. Tem experiência na área de Ciência da Computação, com ênfase em Avaliação de Desempenho e Otimização de sistemas, atuando principalmente nos seguintes temas: Modelagem de Desempenho e Dependabilidade, Computação em Nuvem, Data Centers e Sustentabilidade.



Rodemarck Santos Júnior é graduando em Ciência da Computação pela Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE) e bolsista de iniciação científica pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq).



Ermeson Andrade possui graduação em Ciência da Computação pela Universidade Católica de Pernambuco (2006), mestrado (2009) e doutorado (2014) em Ciências da Computação, ambos pela Universidade Federal de Pernambuco. Entre 2010 e 2011, fez doutorado sanduíche na Universidade de Duke (Estados Unidos). Atualmente, é professor adjunto da Universidade Federal Rural de Pernambuco. Tem experiência na área de Ciência da Computação, com ênfase em Engenharia de Software e Avaliação de Desempenho, atuando principalmente nos seguintes temas: Modelagem de Desempenho e Dependabilidade, Avaliação de Modelos, Teste e Qualidade de Software.

APÊNDICE B – AVALIAÇÃO DO IMPACTO DE ROTAS ADITIVAS DE TRÁFEGO SOBRE INDICADORES DE DESEMPENHO E DISPONIBILIDADE DE SISTEMAS METROFERROVIÁRIOS

SANTOS NETO, Osvaldo M. dos; CALLOU, Gustavo R. de Almeida. Avaliação do impacto de rotas aditivas de tráfego sobre indicadores de desempenho e disponibilidade de sistemas metroferroviários. In: SEMINÁRIO INTEGRADO DE SOFTWARE E HARDWARE (SEMISH), 50. , 2023, João Pessoa/PB. Anais [...]. Porto Alegre: Sociedade Brasileira de Computação, 2023 . p. 344-355. ISSN 2595-6205. DOI: <https://doi.org/10.5753/semish.2023.230779>.

Contribuição do autor: O autor foi responsável pela estruturação da metodologia adotada, desenvolvimento dos modelos propostos, geração das métricas avaliadas, execução dos estudos de caso aplicados, levantamento dos dados técnicos utilizados, criação das imagens e tabelas exibidas, elaboração dos gráficos formatados para os resultados obtidos e edição do texto dissertativo, original e de caráter acadêmico-científico.

Avaliação do impacto de rotas aditivas de tráfego sobre indicadores de desempenho e disponibilidade de sistemas metroferroviários.

Osvaldo M. dos Santos Neto¹, Gustavo R. de Almeida Callou¹

¹Depto. de Computação – Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE)
CEP – 52171-900 – Recife – PE – Brasil

{osvaldo.santosnt, gustavo.callou}@ufrpe.br

Abstract. *Mass transit railway systems require high performance and availability of equipment responsible for signaling and traffic control on the railway. Studies are needed to address these requirements, which are essential for optimizing the quality of these systems. This article proposes a set of models using stochastic Petri nets to evaluate the impact of implementing additive routes on the performance and availability of railway systems. The models are also capable of capturing the impact of signaling equipment availability on train performance indicators on the railway. The results demonstrate that the availability of the studied system can be increased from 79.033% to 97.820%.*

Resumo. *Sistemas metro-ferroviários de transportes requerem um alto desempenho e disponibilidade dos equipamentos responsáveis pela sinalização e controle do tráfego na ferrovia. Estudos são necessários para lidar com esses requisitos, tão essenciais para a otimização da qualidade desses sistemas. Este artigo propõe um conjunto de modelos em redes de Petri estocásticas para avaliar o impacto da implementação de rotas aditivas no desempenho e na disponibilidade de sistemas ferroviários. Os modelos ainda são capazes de capturar o impacto da disponibilidade dos equipamentos de sinalização sobre indicadores de desempenho do trem na ferrovia. Os resultados demonstram que a disponibilidade do sistema estudado pode ser aumentada de 79,033% para 97,820%.*

1. Introdução e referencial teórico

As ferrovias têm implicações de natureza social e econômica que associadas à rotina de transporte de passageiros e insumos nas cidades e grandes centros urbanos são de fundamental importância. É importante frisar que, além de encurtar distâncias, as “estradas de ferro” aumentam o volume de mercadorias, baixando o preço de produtos e exercendo um papel importante como elemento necessário à infraestrutura das cidades [Silveira 2003]. O tempo de indisponibilidade dos trens em uma ferrovia pode ter um impacto significativo no sistema geral de transporte público, bem como nas pessoas e empresas que dependem dele.

Alguns dos impactos potenciais da paralisação de um sistema metroferroviário são: 1) aumento do congestionamento do tráfego; muitas pessoas que normalmente usam esse meio de transporte precisam recorrer a outras opções, como carros particulares ou ônibus. Isso pode resultar em um aumento significativo no tráfego, congestionamentos e

atrasos generalizados. 2) aumento dos tempos de viagem; os passageiros podem enfrentar tempos de viagem mais longos, menos previsíveis e mais susceptíveis a incidentes. 3) custos econômicos; muitas pessoas podem enfrentar dificuldades para chegar ao trabalho, o que pode resultar em perda de produtividade e impactar negativamente as empresas. Além disso, sistemas de transporte, como o metrô e o trem, são considerados uma opção mais sustentável em comparação com o uso de veículos particulares. Quando esses sistemas são paralisados, mais pessoas podem optar por usar seus carros, o que resulta em um aumento nas emissões de gases de efeito estufa e na poluição do ar. Portanto, é essencial tomar medidas para minimizar a indisponibilidade desses sistemas, como investir em manutenção e atualizações, implementar sistemas de *backup* robustos e trabalhar para resolver problemas rapidamente.

Considerando a importância do desenvolvimento de soluções que otimizem esses sistemas, esse trabalho de pesquisa tem o objetivo principal de propor modelos em redes de Petri estocásticas (*SPN - Stochastic Petri Nets*) capazes de avaliar o impacto da implementação de rotas aditivas (RA) de tráfego sobre os indicadores de desempenho típicos de uma ferrovia. Vale frisar que os modelos permitem o cálculo de métricas tais como, tempo de viagem, tempo de intervalo entre trens e tempo de espera do usuário na plataforma. Além disso, as *SPNs* possibilitam a avaliação da disponibilidade do sistema de sinalização e controle sobre o desempenho do trem e estimam a probabilidade de colisão entre trens. Cada RA é formada por um conjunto de aparelhos de mudança de via que realizam o deslocamento do trem de uma via para outra sem que o contato dos rodapés com os trilhos seja desfeito. Além de desviar veículos com segurança e velocidade compatível, os aparelhos de mudança de via aumentam a flexibilidade no traçado da malha ferroviária, além de ser o único elemento móvel da ferrovia [DNIT 2015].

As redes de Petri (RdP) destacam-se por possibilitar a representação de sistemas a partir de uma forte base matemática, permitindo a modelagem de sistemas paralelos, concorrentes, assíncronos e não determinísticos [Maciel et al. 1996]. Essas redes foram desenvolvidas por Carl Adam Petri e são formadas por elementos ativos (transições - representadas por um retângulo, podem ser estocásticas ou imediatas) e passivos (*places* - representadas por um círculo). Esses elementos são conectados por arcos direcionados. As *SPNs* são uma extensão das RdP e passam a ter a possibilidade de associar tempo às transições. Sendo assim, existe a transição estocástica, onde um tempo é associado para reproduzir o período de execução de uma ação. Além disso, existe a transição imediata, que tem o tempo = 0. Por último, tem-se o arco inibidor, que só permite o “disparo” de uma transição quando não há *tokens* (ilustrados por um ponto em negrito) no lugar a ele associado.

Para avaliar os modelos propostos, foi selecionado um ramal ferroviário (Linha Sul) do metrô da cidade de Recife, capital do estado de Pernambuco - Brasil, como objeto de estudo. O sistema de trens urbanos do Recife é composto por 3 ramais ferroviários, sendo dois eletrificados (Linhas Sul e Centro) e um operado por veículos leves sobre trilhos (Linha Diesel). A extensão total é de 71 km, abrangendo os municípios de Recife, Jaboatão dos Guararapes, Camaragibe e Cabo de Santo Agostinho. A ferrovia conta com 37 estações e transporta aproximadamente 400 mil passageiros por dia [CBTU 2021]. O artigo segue estruturado conforme a seguinte organização. A Seção 2 exibe os trabalhos relacionados com avaliação de sistemas ferroviários. A Seção 3 apresenta a metodologia

utilizada para avaliar o desempenho e a disponibilidade de sistemas ferroviários. A Seção 4 mostra os modelos propostos para analisar sistemas ferroviários. A Seção 5 ilustra a aplicabilidade da metodologia e dos modelos a partir de estudos de caso. Por fim, a Seção 6 conclui o trabalho e apresenta os futuros direcionamentos da pesquisa.

2. Trabalhos relacionados

Esta seção apresenta trabalhos sobre avaliação de sistemas ferroviários. Em Songwiroj *et al.* [Songwiroj et al. 2018] foi apresentado um modelo em rede de Petri colorida (*coloured Petri nets* - *CPN*) a partir de “blocos de construção” que são submodelos predefinidos de desempenho e que reproduzem equipamentos de alto nível da ferrovia. Por exemplo, bloco de construção das estações de trem e bloco de construção da malha ferroviária. Esses trabalhos fizeram uso de dados reais do sistema, contudo as pesquisas focaram na avaliação qualitativa dos resultados. Hai *et al.* [Hai et al. 2019] quantificaram a disponibilidade de sistemas ferroviários através da confiabilidade e precisão das informações de sincronização de tempo em equipamentos vitais, tais como o relógio mestre (*master clock*) da ferrovia. Esse trabalho fez uso de modelos de *fail over* para propor modelos *SPN* que analisam a rede.

Saideh *et al.* [Saideh et al. 2019] avaliaram o desempenho de sistemas ferroviários de alta velocidade (*High Speed Railway* - *HSR*) mediante diferentes técnicas de *Multi-Carrier Modulation* - *MCM*, que são consideradas um dos principais “blocos de construção” dos sistemas de comunicação de trens no continente europeu. A técnica adotada permite a avaliação de diferentes cenários no sistema de comunicação, tais como: escassez de espectro, comunicação assíncrona e parâmetros de ruído no canal. Wu and Liu [Wu and Liu 2021] propuseram um modelo *CPN* que identifica caminhos (rotas) que podem gerar situações de risco. A estratégia adotada pelos autores permite uma análise da segurança de tráfego de trens, mas não possibilita a simulação de cenários onde o sistema possa ser otimizado quanto ao desempenho e a disponibilidade.

No trabalho de pesquisa realizado por Yilmazer *et al.* [Yilmazer and Karakose 2022], um novo método de monitoramento das condições e detecção de falhas na ferrovia foi proposto. Os autores utilizaram uma rede neural do tipo *YOLOv4* para realizar a detecção de falhas em trechos da ferrovia, tais como comutação entre vias e passagem de nível. Os resultados das métricas de desempenho e disponibilidade avaliadas mostraram que o modelo pode detectar corretamente as regiões que mais falham com 96,8% de precisão. Pode-se perceber que, além do trabalho apresentado por Daohua *et al.* [Wu et al. 2021] e Yilmazer *et al.* [Yilmazer and Karakose 2022], esse artigo é o único que trabalha com avaliação de desempenho e disponibilidade conjuntamente. Vale ressaltar que esse artigo tem como fator de contribuição diferencial, a proposição de modelos *SPN* que são capazes de avaliar o impacto da adição de rotas aditivas (RAs) sobre os indicadores de desempenho e da disponibilidade do sistema, além de estimar a probabilidade de colisão entre trens em cenários determinados.

3. Metodologia

A Figura 1 apresenta a metodologia adotada para avaliar o desempenho e a disponibilidade de sistemas ferroviários. A primeira etapa da metodologia corresponde ao entendimento dos aspectos lógicos e funcionais do sistema avaliado. Nessa fase o pesquisador já

deve ter estabelecido o objetivo da avaliação, pois ele influenciará nas decisões de projeto das seções a seguir [Lopes 2019]. A etapa seguinte é a de seleção da técnica de avaliação, que se caracteriza pela definição do método de avaliação de sistemas que será adotado. É válido salientar que de acordo com as circunstâncias de tempo e recursos disponíveis, a escolha de um ou mais métodos podem possibilitar uma melhor representação do sistema analisado. A técnica de avaliação adotada nesse artigo corresponde às *SPNs*, com foco na análise quantitativa que avalia o desempenho através de indicadores como tempo de resposta ou capacidade. A terceira etapa corresponde a definição dos indicadores de desempenho.

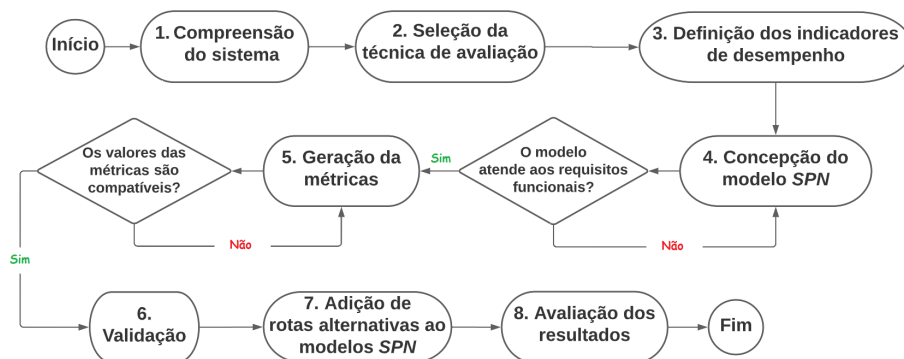


Fig. 1. Desenho da pesquisa.

A definição dos indicadores pode mudar conforme o método de avaliação selecionado. Por exemplo, como o objetivo principal desse artigo é avaliar o impacto da adição de RAs no desempenho e disponibilidade de sistemas ferroviários de transporte de passageiros, foram definidos 3 indicadores básicos que são inerentes a tais sistemas: (i) Tempo de Viagem, representa o tempo médio necessário para o trem percorrer todas as plataformas das estações; (ii) Tempo de intervalo entre trens; (iii) Embarque, tempo médio necessário para o usuário embarcar em um trem; (iv) Disponibilidade, disponibilidade dos dispositivos de sinalização e controle do tráfego de trens.

Uma vez concluídas as fases de compreensão do sistema, seleção da técnica de avaliação e definição dos indicadores de desempenho, pode-se dar início ao processo de modelagem do sistema. Nessa etapa, ocorrerá a concepção do modelo em rede de Petri. A partir dos indicadores de desempenho são estabelecidas as métricas que serão adotadas nos modelos. Então, essa fase corresponde a esta atividade que, além de computar parâmetros de performance de sistemas ferroviários de transporte de passageiros, possibilita que o modelo proposto possa ser validado. A fase seguinte corresponde a validação e tem como objetivo o de validar o modelo proposto anteriormente. Essa validação ocorre mediante a comparação dos valores computados pelo modelo *SPN* com os fornecidos pela empresa operadora do sistema (Metrôrec). Além disso, um intervalo matemático de confiança, obtido através de simulação estacionária do modelo, autentica os valores obtidos nas simulações executadas nos diversos cenários.

A etapa seguinte corresponde a fase de adição de RAs aos modelos. Sendo assim, a partir do modelo de performabilidade (desempenho associado à disponibilidade) e das métricas definidas, o impacto da adição de RAs no sistema ferroviário pode ser avaliado. Todo processo de modelagem, geração de métricas e análise dos cenários (variação do

número de trens e RAs) foi realizado utilizando a ferramenta *Mercury* [MoDCS 2023] como ambiente de avaliação. Uma vez adicionadas as rotas aditivas propostas por esse artigo, os modelos que reproduzem os aspectos de falha e operação das RAs também passam a impactar as métricas de desempenho e disponibilidade geradas. Após a validação do modelo, é chegada a etapa de avaliação de cenários. Nessa fase, serão avaliados diferentes cenários, tais como: modelos sem a adição de rotas aditivas e com a adição de uma a seis RAs.

4. Modelos

4.1. Modelo de desempenho

Esta seção apresenta o modelo *SPN* proposto para reproduzir o deslocamento dos trens (*tokens*) entre as plataformas (*places*) pertencentes ao domínio da estação Tancredo Neves. O sentido de direção da movimentação dos trens, bem como alguns critérios básicos de segurança da operação de tráfego foram modelados através da utilização de arcos direcionados e inibidores. A Figura 2 ilustra um trem posicionado na plataforma 1 da estação Imbiribeira com sentido de deslocamento definido pelo arco direcionado, ou seja: irá se deslocar de IMB1 para FAL1. Contudo, o trem só seguirá em frente se a plataforma seguinte estiver desocupada (sem *token* no *place* FAL1). Deve-se dar uma certa relevância a essa característica, uma vez que o trem não pode avançar em direção de uma plataforma ocupada porque esse evento representaria uma colisão entre trens (mais de um *token* no mesmo *place*). Justamente para inibir a possibilidade de colisão entre trens, os arcos inibidores estão presentes em todos os trechos (transições estocásticas) que ilustram os circuitos de via (CDVs - segmentos da ferrovia) entre as plataformas do trecho modelado.

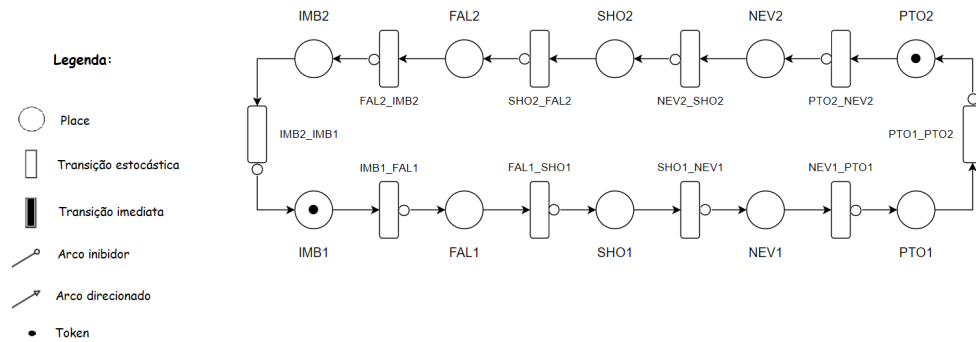


Fig. 2. Modelo de desempenho.

Sobre os aspectos de funcionamento operacional da Figura 2, tem-se que o trem localizado na plataforma IMB1 só pode seguir viagem para FAL1 se a mesma estiver desocupada, satisfazendo os requisitos de segurança que permitem o disparo da transição IMB1_FAL1. O disparo dessa transição irá consumir o *token* de IMB1 e gerar um *token* em FAL1, simulando o deslocamento do trem entre as plataformas. A mesma lógica de funcionamento operacional ocorre para as demais plataformas da ferrovia. Instrumentos que mensuram o intervalo de tempo que o trem precisa para ir de uma estação para outra foram utilizados para alimentar a base de dados dos modelos propostos.

4.1.1. Métricas de desempenho

Tempo de viagem: estima o tempo necessário para o trem passar por todas as plataformas das estações da ferrovia. A expressão gerada para calcular essa métrica tem como base a lei de *Little*. Além disso, é importante definir que a sintaxe utilizada pelo Mercury para representar uma plataforma (*place*) segue o seguinte formalismo: *#Place1*, *#Place2*, *#Place3*. Portanto, o tempo médio necessário para um trem passar por todas as plataformas do sistema é dado por:

$$\begin{aligned} \text{T.Viagem} = & (((E\{\#IMB1\}) + (E\{\#FAL1\}) + (E\{\#SHO1\}) + (E\{\#NEV1\}) + (E\{\#PTO1\}) \\ & + (E\{\#IMB2\}) + (E\{\#FAL2\}) + (E\{\#SHO2\}) + (E\{\#NEV2\}) + (E\{\#PTO2\}) \\ & + (E\{\#P_aux\}))/((E\{\#IMB2\}/0.0001))) \end{aligned} \quad (1)$$

Intervalo entre trens: calcula o intervalo de tempo entre os trens em operação na ferrovia. A métrica gerada considera o tempo médio gasto pelo cliente (T.Viagem) dividido pela probabilidade de haver ao menos um trem em alguma plataforma da ferrovia (somatório das esperanças das plataformas da ferrovia). Portanto, o tempo de intervalo entre trens é:

$$\begin{aligned} \text{T.Intervalo} = & ((((((E\{\#IMB1\}) + (E\{\#FAL1\}) + (E\{\#SHO1\}) + (E\{\#NEV1\}) + (E\{\#PTO1\}) \\ & + (E\{\#IMB2\}) + (E\{\#FAL2\}) + (E\{\#SHO2\}) + (E\{\#NEV2\}) + (E\{\#PTO2\}) \\ & + (E\{\#P_aux\}))/((E\{\#IMB2\}/0.0001)))))/((E\{\#IMB1\}) + (E\{\#FAL1\}) \\ & + (E\{\#SHO1\}) + (E\{\#NEV1\}) + (E\{\#PTO1\}) + (E\{\#IMB2\}) + (E\{\#FAL2\}) \\ & + (E\{\#SHO2\}) + (E\{\#NEV2\}) + (E\{\#PTO2\}) + (E\{\#P_aux\}))) \end{aligned} \quad (2)$$

Tempo de espera: computa a possibilidade de haver um trem em uma das vias do sistema. Considerando o modelo *SPN* proposto possui duas vias (saída e retorno), o tempo de espera do usuário na plataforma será a metade do tempo de intervalo:

$$\begin{aligned} \text{T.Espera} = & ((((((E\{\#IMB1\}) + (E\{\#FAL1\}) + (E\{\#SHO1\}) + (E\{\#NEV1\}) + (E\{\#PTO1\}) \\ & + (E\{\#IMB2\}) + (E\{\#FAL2\}) + (E\{\#SHO2\}) + (E\{\#NEV2\}) + (E\{\#PTO2\}) \\ & + (E\{\#P_aux\}))/((E\{\#IMB2\}/0.0001)))))/((E\{\#IMB1\}) + (E\{\#FAL1\}) \\ & + (E\{\#SHO1\}) + (E\{\#NEV1\}) + (E\{\#PTO1\}) + (E\{\#IMB2\}) + (E\{\#FAL2\}) \\ & + (E\{\#SHO2\}) + (E\{\#NEV2\}) + (E\{\#PTO2\}) + (E\{\#P_aux\}))))/2 \end{aligned} \quad (3)$$

4.2. Modelo de disponibilidade

Esta seção apresenta o modelo proposto para avaliar a disponibilidade dos equipamentos de sinalização e controle do tráfego de trens (sistema *Alstom*) na região de domínio da estação Tancredo Neves. Por se tratar de uma arquitetura com hierarquia, a falha de um dispositivo superior acarretará na indisponibilidade dos equipamentos inferiores a ele associados. Por exemplo: uma falha no gerenciador de comunicação (GC) provocaria a indisponibilidade de todos os dispositivos abaixo dele - Figura 3. Estes aspectos funcionais foram representados através de expressões de guarda que reproduzem as propriedades do funcionamento lógico-operacional de cada equipamento. Já uma falha da eletrônica do circuito de via da estação Imbiribeira (ECV_IMB), causaria a indisponibilidade dos circuitos de via (CDVs) sob seu domínio. Ou seja, CDV_IMB1, CDV_IMB2, CDV_FAL1 e

CDV_FAL2. As informações dos tempos médios de falha e recuperação dos dispositivos foram coletadas por meio de um *software* de gestão da manutenção utilizada pela empresa operadora do sistema estudado.

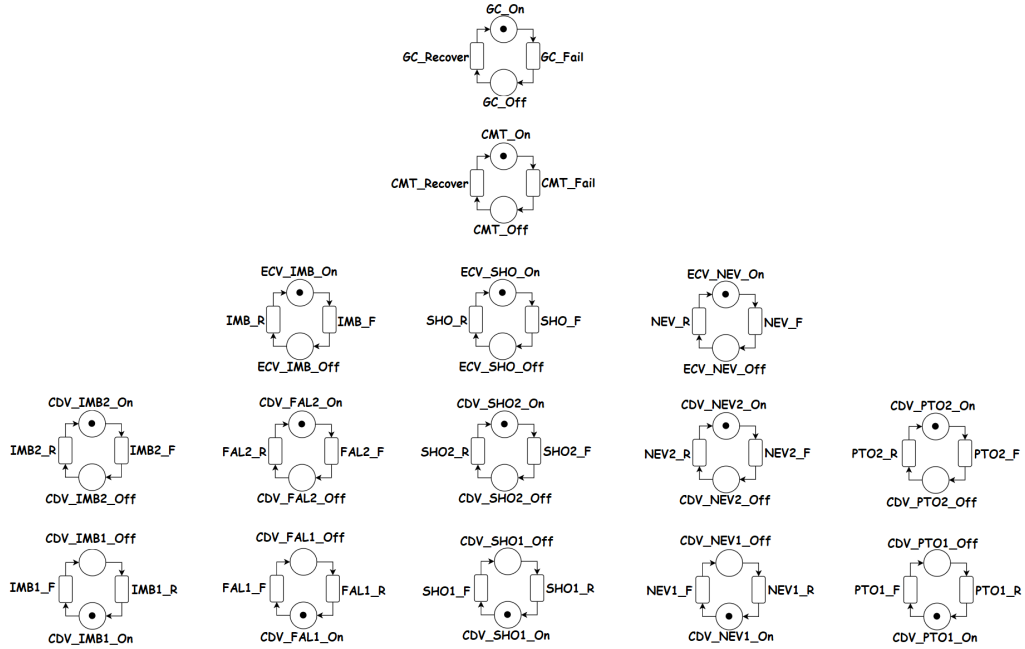


Fig. 3. Modelo de disponibilidade.

As características lógico-operacionais de cada dispositivo *Alstom*, demonstrando as condições de funcionamento e disponibilidade, podem ser analisadas através do aspecto formal das expressões de guarda. Por exemplo, todos os equipamentos abaixo do GC precisam que ele esteja disponível para funcionarem, ou seja: $(\#GC_On=1)$. Já o circuito de via da plataforma 1 de Imbiribeira, depende da eletrônica do circuito de via de Imbiribeira, do controlador de movimentação do trem (CMT) e do gerenciador de comunicação. Dessa forma, para que CDV_IMB1 esteja disponível, é necessário que $(\#GC_On=1)AND(\#CMT_On=1)AND(\#ECV_IMB_On=1)$.

4.2.1. Métricas de disponibilidade

A métrica formulada para o cálculo da disponibilidade do sistema de sinalização e controle dos trens (Disp. *Alstom*) considera que todos os equipamentos precisam estar em pleno estado operacional, ou seja disponível ($\#Equipamento_On=1$, *token* ocupando o *place* com terminação *_On*). Dessa forma, tem-se que a disponibilidade do sistema é:

$$\begin{aligned}
 \text{Disp. Alstom} = P\{ & (\#GC_NEV_ON = 1)AND(\#CMT_NEV_ON = 1)AND(\#ECV_IMB_ON = 1) \\
 & AND(\#ECV_SHO_ON = 1)AND(\#ECV_NEV_ON = 1)AND(\#CDV_IMB1_ON = 1) \\
 & AND(\#CDV_IMB2_ON = 1)AND(\#CDV_FAL1_ON = 1)AND(\#CDV_FAL2_ON = 1) \\
 & AND(\#CDV_SHO1_ON = 1)AND(\#CDV_SHO2_ON = 1)AND(\#CDV_NEV1_ON = 1) \\
 & AND(\#CDV_NEV2_ON = 1)AND(\#CDV_PTO1_ON = 1)AND(\#CDV_PTO2_ON = 1) \}
 \end{aligned} \quad (4)$$

4.3. Modelo de performabilidade

Uma vez desenvolvidos os modelos de desempenho e disponibilidade, é chegada a fase de modelagem da performabilidade do sistema. Resultado da integração das *SPNs* das Figuras 2 e 3, o modelo de performabilidade permite a avaliação do impacto da disponibilidade do sistema *Alstom* sobre os indicadores de desempenho analisados e a implementação das rotas aditivas sem prejuízo os requisitos de segurança e controle do tráfego. A Figura 4 ilustra a associação entre o desempenho (circulação dos trens) e a disponibilidade do sistema de sinalização e controle do tráfego (equipamentos *Alstom*). As transições do submodelo *Alstom* são alimentadas com dados resultantes do modelo de disponibilidade (Figura 3). É importante frisar que a disponibilidade do sistema *Alstom* varia de acordo com o número de RAs implementadas.

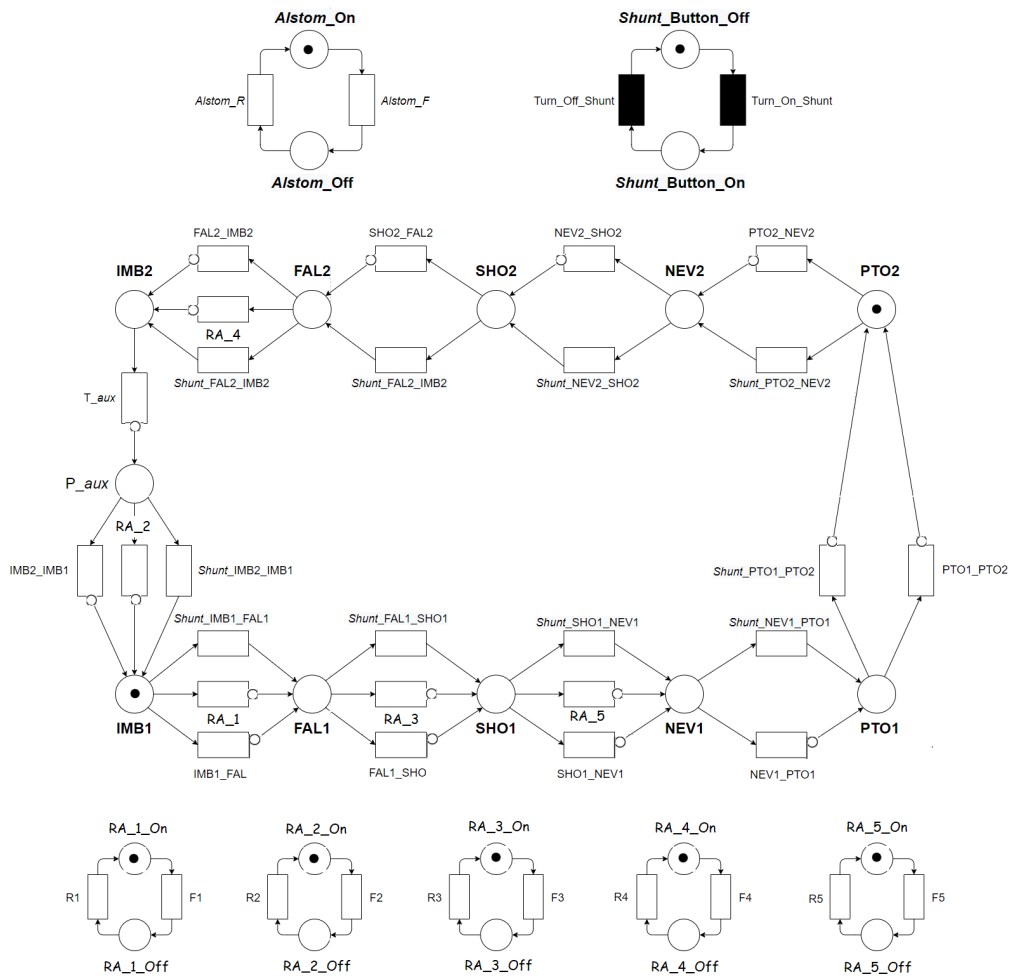


Fig. 4. Modelo de performabilidade.

Sobre a lógica operacional da Figura 4 tem-se o seguinte: a presença de um *token* em *Alstom_On* representa o funcionamento dos equipamentos de sinalização e controle do tráfego. Os tempos médios de falha (*Alstom_F*) e recuperação (*Alstom_R*) baseiam-se nos resultados do modelo de disponibilidade (Figura 3). Quando ocorre uma falha do sistema *Alstom*, o condutor do trem deve acionar o botão de manobra (*shunt button*) rapidamente, fazendo o trem seguir com velocidade restrita por questões de segurança.

Portanto, quando $\#Alstom_Off=1$, o botão de manobra pode ser imediatamente ligado ($\#Shunt_Button_On=1$). Enquanto o botão de manobra estiver acionado, o trem irá se deslocar com velocidade restrita. Dessa maneira, o trem que se encontra na plataforma PTO2 seguirá pela transição ($Shunt_PTO2_NEV2$), uma vez que a rota normal (transição PTO2_NEV2) estará indisponível em virtude da falha do sistema *Alstom*.

Já o trem que se encontra em IMB1, em caso de ocorrência de falha do sistema *Alstom*, utilizará a rota aditiva 1 (transição RA_1) para seguir, pois pode-se observar na Figura 4 que um submodelo foi criado para representar os novos dispositivos implementados para cada RA inserida no sistema. Vale salientar que uma rota aditiva é capaz de manter a mesma velocidade de uma rota em condições normais e respeitando as normas de controle e segurança do sistema. Observa-se ainda que, quando o trem trafega com o *shunt* acionado, haverá risco de colisão entre os trens em operação (nota-se que as transições estocásticas *shunt* não possuem arco inibidor).

5. Estudos de caso e resultados

5.1. Estudo de caso I - Desempenho

O primeiro estudo de caso realizado retrata a circulação dos trens em um circuito ferroviário cíclico, aquele onde o trem retorna ao ponto de partida para configurar uma viagem completa. O modelo proposto pela Figura 2, além de reproduzir o tráfego dos trens, possibilita a validação matemática dos resultados obtidos através de simulação estacionária dos diferentes cenários avaliados. A Figura 5 ilustra o impacto da variação do número de trens nos indicadores de desempenho avaliados. Pode-se verificar uma linha de tendência (azul pontilhada) do tempo de viagem. Sabe-se que uma linha de tendência é mais confiável quando sua Valor de R^2 está em ou perto de 1.

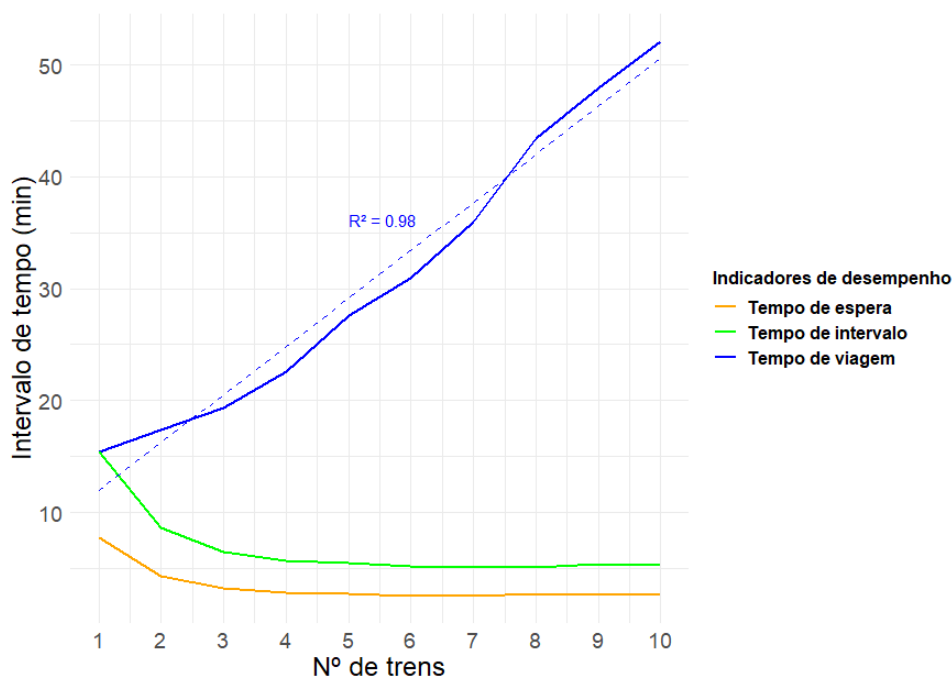


Fig. 5. Indicadores de desempenho vs Nº de trens.

A Tabela 1 apresenta os valores dos resultados obtidos via simulação estacionária do modelo *SPN* em diferentes cenários - variação de 1 a 10 trens.

Tabela 1. Resultado das avaliações dos indicadores de desempenho do trem.

Nº EUTs	Viagem	[I.C]	Intervalo	[I.C]	Espera	[I.C]
1	15,455	[15,300 ; 15,609]	15,455	[15,341 ; 15,583]	7,728	[7,651 ; 7,778]
2	17,333	[17,211 ; 17,501]	8,666	[8,535 ; 8,722]	4,333	[4,200 ; 4,371]
3	19,368	[19,168 ; 19,511]	6,456	[6,410 ; 6,519]	3,228	[3,192 ; 3,257]
4	22,558	[22,395 ; 22,777]	5,639	[5,590 ; 5,694]	2,820	[2,790 ; 2,840]
5	27,596	[27,320 ; 27,871]	5,519	[5,467 ; 5,573]	2,760	[2,732 ; 2,787]
6	30,977	[30,744 ; 31,199]	5,163	[5,111 ; 5,202]	2,581	[2,555 ; 5,600]
7	35,907	[35,647 ; 36,264]	5,130	[5,086 ; 5,177]	2,565	[2,541 ; 2,584]
8	43,425	[43,008 ; 43,766]	5,428	[5,391 ; 5,482]	2,714	[2,688 ; 2,733]
9	47,932	[47,552 ; 47,971]	5,326	[5,277 ; 5,375]	2,663	[2,636 ; 2,689]
10	52,067	[51,666 ; 52,414]	5,207	[5,188 ; 5,239]	2,603	[2,587 ; 2,612]
Média:	31,262		6,799		3,399	

Ainda sobre a Figura 5, verifica-se um ritmo médio de crescimento do tempo de viagem na ordem de 4,068 minutos. Já o indicador de desempenho que computa o intervalo entre os trens apresentou um decréscimo de 1,139 minutos em média. Por fim, o tempo de espera do usuário na plataforma diminuiu aproximadamente meio minuto (34,14 segundos em média) para cada trem injetado no sistema.

5.2. Estudo de caso II - Disponibilidade

Computa a probabilidade dos dispositivos de sinalização e controle da ferrovia estarem em plenas condições funcionais. A *SPN* ilustrada pela Figura 3 possibilita a avaliação da disponibilidade de cada dispositivo de sinalização e de todo o sistema de sinalização da região de domínio da estação Tancredo Neves. Destaca-se na Figura 4 a implementação das RAs. Vale ressaltar que para cada cenário (de 0 a 10 rotas aditivas) a disponibilidade do sistema *Alstom* será impactada pela adição destes dispositivos.

A Tabela 2 apresenta os resultados da avaliação de disponibilidade para cada situação. Pode-se verificar que o impacto da adição de cada RA é da ordem de 1,879% (em média) na disponibilidade do sistema *Alstom* - Figura 3. Vale frisar que, no modelo de performabilidade, a sub-rede que representa o sistema *Alstom* receberá os valores dos tempos médios de falha e recuperação compatíveis com os resultados obtidos para cada cenário simulado. Dessa forma, o modelo proposto permite a obtenção da disponibilidade do sistema de sinalização e controle de trens para cada rota aditiva adicionada sem a necessidade de intervenção física na arquitetura do sistema (prototipação).

Tabela 2. Disponibilidade do sistema para cada cenário avaliado.

Nº ARs	Availability (%)	[I.C]
0	79,033	[78,244 ; 79,821]
1	80,251	[79,666 ; 81,001]
2	82,596	[81,986 ; 83,125]
3	84,098	[83,522 ; 84,901]
4	84,915	[84,187 ; 85,333]
5	88,726	[87,999 ; 89,211]
6	89,823	[88,931 ; 90,500]
7	93,930	[92,990 ; 94,669]
8	95,535	[94,689 ; 96,388]
9	96,918	[96,012 ; 97,887]
10	97,820	[96,999 ; 98,422]

5.3. Estudo de caso III - Performabilidade

Avalia o impacto da disponibilidade do sistema de sinalização e controle sobre os indicadores de desempenho do trem e calcula a probabilidade (%) de haver colisão entre trens quando há uma falha do sistema *Alstom* e utilização do botão que ignora o sistema de sinalização e controle (*Shunt Button*) - ver Figura 4. O estudo de caso realizado ainda avaliou cenários diversos, onde foram obtidos resultados que reproduzem situações como a variação de trens (0 a 10) e a adição de rotas aditivas (1 a 10). Para cada cenário (de 0 a 10 RAs) foram avaliadas 10 situações (de 1 a 10 trens). A Tabela 3 reúne os resultados das médias dos indicadores de desempenho e das médias da probabilidade de colisão entre trens. Após análise dos resultados da Tabela 3, pode-se verificar que, após a adição da primeira rota aditiva, o tempo de viagem foi otimizado a uma taxa média de 3,783% por cada AR adicionada, o que representa uma diminuição de 1,493 para cada AR implementada.

Tabela 3. Média dos indicadores de desempenho para cada cenário avaliado.

Nº RAs	Viagem (min)	Intervalo (min)	Espera (min)	Prob. Colisão (%)
0	46,520	10,208	5,104	19,117
1	44,907	9,826	4,913	17,793
2	43,218	9,361	4,681	13,436
3	41,425	9,061	4,530	12,125
4	40,400	8,790	4,395	11,033
5	38,002	8,235	4,118	6,630
6	36,954	8,017	4,009	5,856
7	34,202	7,424	3,712	5,194
8	33,186	7,212	3,606	3,026
9	32,328	7,053	3,526	1,049
10	31,589	6,912	3,456	0,792

Já o tempo de intervalo, no caso de 5 ARs por exemplo, sofre um decréscimo de aproximadamente 2 minutos, uma melhoria de 19,328% em relação ao cenário sem rotas aditivas. Não menos importante, o tempo de espera do usuário na plataforma diminuiu de 5,104 para 3,456 minutos (0 AR e 10 ARs), ou seja, uma otimização com taxa média de 32,288%. Em última análise, pode-se verificar na Tabela 3 que a probabilidade de haver colisão entre trens parte de um valor igual a 19,177% (cenário sem RAs), segue diminuindo a um ritmo constate de 24.464% até chegar a uma taxa inferior a 1% (cenário com 10 ARs), uma diminuição no risco de colisão de 95,857%.

6. Conclusão

Esse artigo propôs um modelo em *SPN* que permite avaliar a disponibilidade de sistemas de sinalização e controle do tráfego de trens em uma ferrovia associada à avaliação de indicadores de desempenho de trens no sistema. Os resultados obtidos demonstraram a aplicabilidade dos modelos propostos para avaliar cenários com variações no número de trens e na quantidade de rotas aditivas. Além de possibilitar a elaboração de estratégias de otimização do tráfego dos trens, o modelo também computa o impacto da disponibilidade no desempenho e a probabilidade de colisão entre trens. As informações, dados e resultados obtidos, além de quantificar os impactos da implementação de novos dispositivos sobre as métricas avaliadas, possibilitam dar insumos aos projetistas de tais sistemas para melhorar as métricas de interesse, detectar pontos críticos no sistema e elaborar novas estratégias de manutenção.

Sobre os futuros direcionamentos dessa pesquisa, pretende-se avaliar, por exemplo, os CDVs que mais impactam sobre a disponibilidade do sistema, estimar o número de usuários aguardando o trem nas plataformas das estações e propor novas metodologias de abordagem em cenários críticos. Além disso, a versatilidade dos modelos permitem avaliar outros sistemas ferroviários a partir das *SPN* já modeladas, bastando ajustar os parâmetros de entrada e algumas particularidades pertinentes para cada malha ferroviária selecionada.

Agradecimentos

Os autores gostariam de agradecer à Fundação de Amparo a Ciência e Tecnologia do Estado de Pernambuco (FACEPE), ao Conselho Nacional de Pesquisas (CNPq) e à Companhia Brasileira de Trens Urbanos, através da a Superintendência de Trens Urbanos do Recife (CBTU, STU-REC) pelo apoio a esta pesquisa.

Referências

- CBTU (2021). Companhia Brasileira de Trens Urbanos - Malha ferroviária do Recife. <https://www.cbtu.gov.br/index.php/pt/sistemas-cbtu/recife>. [Online; accessed 22-Agosto-2021].
- DNIT (2015). *Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, ISF - 215: Projeto de Superestrutura da Via Permanente - Aparelhos de Mudança de Via - AMV*.
- Hai, N., Zhang, C.-Z., Yu, Y., and Tang, Y. (2019). Reliability analysis of clock source of railway time synchronization network based on spn. pages 45–48.
- Lopes, A. (2019). Universidade federal rural de pernambuco (ufrpe). In *Metodologia de Análise de Desempenho de Sistemas de Transporte Público*, pages 18–20, Recife.
- Maciel, P., Lins, R., and Cunha, P. (1996). *Escola de Computação, Campinas*.
- MoDCS (2023). Research Group - MoDCS. <https://www.modcs.org/?wpdmp=mercury-5-0-2>. [Online; accessed 22-Agosto-2022].
- Saideh, M., Alsaba, Y., Dayoub, I., and Berbineau, M. (2019). Performance evaluation of multi-carrier modulation techniques in high speed railway environment with impulsive noise. pages 243–248.
- Silveira, M. R. (2003). A importância geoeconômica das estradas de ferro no brasil.
- Songwiroj, N., Vatanawood, W., and Vanit-Anunchai, S. (2018). Railway network modeling using building block of timed coloured petri nets. pages 528–533.
- Wu, D. and Liu, J. (2021). An approach to safety analysis of train control systems with coloured petri nets. pages 4744–4750.
- Wu, D., Lu, D., and Tang, T. (2021). Qualitative and quantitative safety evaluation of train control systems (ctcs) with stochastic colored petri nets. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, pages 1–16.
- Yilmazer, M. and Karakose, M. (2022). Railway condition monitoring and fault detection based on yolov4. In *2022 International Conference on Innovation and Intelligence for Informatics, Computing, and Technologies (3ICT)*, pages 439–443.