

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

Oswaldo 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 81.674% to 98.456%.*

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 81,674% para 98,456%.*

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 rodos 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.

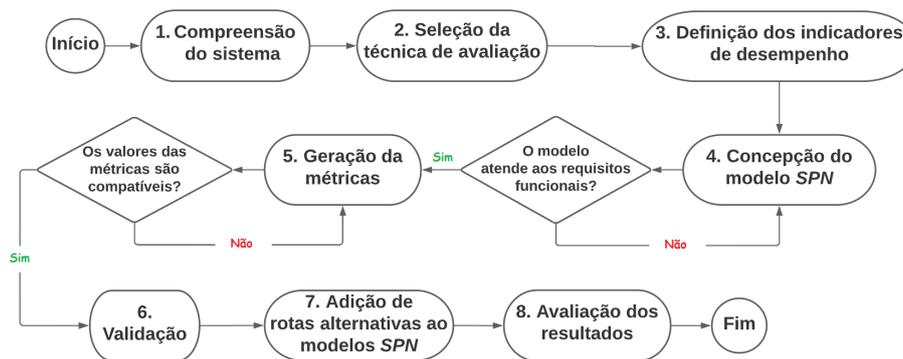


Fig. 1. Desenho da pesquisa.

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 (Metrorec). 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.

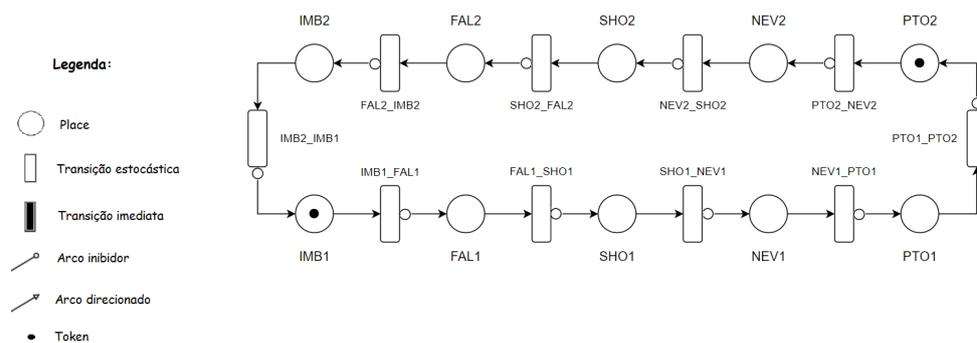


Fig. 2. Modelo de desempenho.

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:

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

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:

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

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:

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

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.

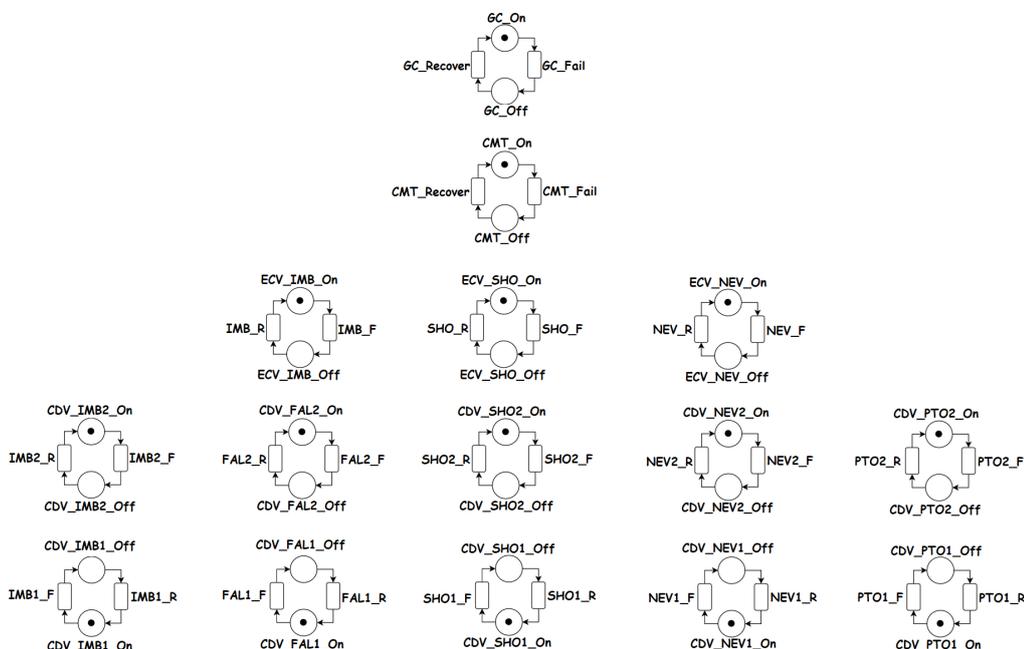


Fig. 3. Modelo de disponibilidade.

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:

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

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.

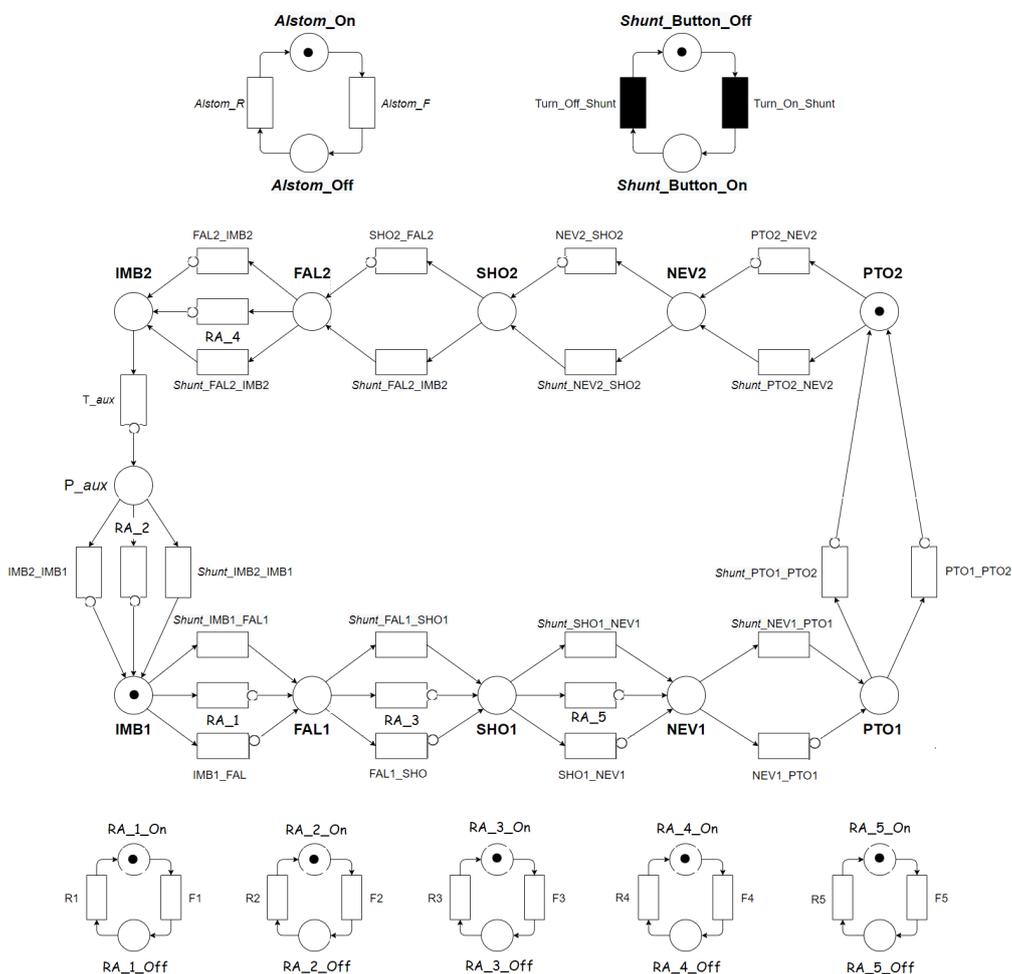


Fig. 4. Modelo de performabilidade.

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.

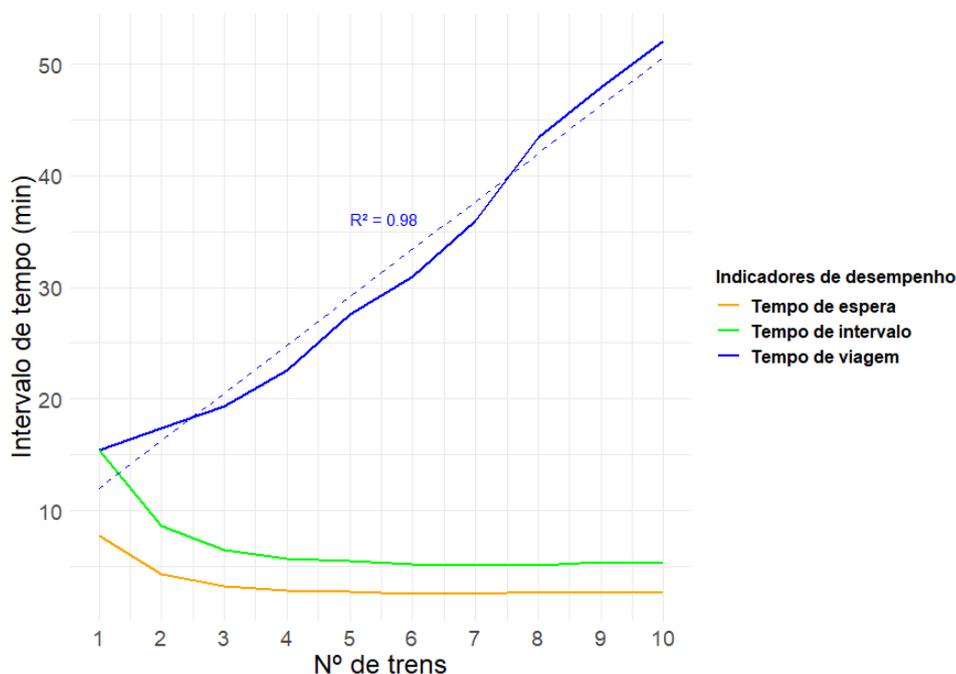


Fig. 5. Indicadores de desempenho vs Nº de trens.

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/?wpdmpromo=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.