

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

Oswaldo 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.

Oswaldo 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 Movimentação do Trem/ Multiplexado (CMT/MUX) e Eletrônica de

Circuito de Via (ECV). Os Aparelhos de Mudança de Via (AMV) e Sinaleiros (SIN) comunicam-se com o gabinete do CMT/MUX. Já o Circuito de Via (CDV) comunica-se com as estações satélites 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.

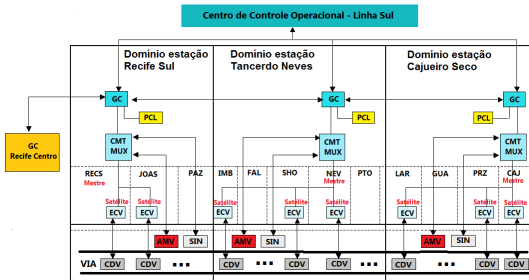


Fig. 1. Arquitetura dos equipamentos de sinalização Alstom - Linha Sul do metrô do Recife [3].

### 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 à 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 ( $\lambda$ ) 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].

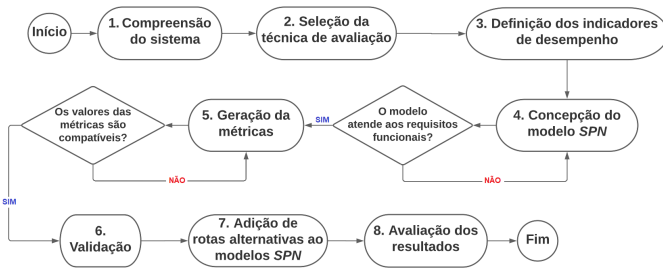


Fig. 3. Desenho da pesquisa.

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 - 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 performatividade (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 elétrico 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

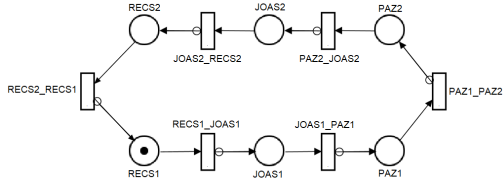


Fig. 4. Modelo de desempenho - Domínio da região RECS.

mediram 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 - Metrorec). De posse dos dados compartilhados pela empresa, a Tabela I, que fornece os dados de velocidade média operacional (VMO) do trem, distância ( $\Delta S$ ) entre as plataformas das estações e os valores de intervalo de tempo ( $\Delta t$ ) 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  $\Delta t$ . Assim sendo,  $T_m = 1,548$  minutos.

TABELA I  
DADOS DE DISTÂNCIA, VELOCIDADE E TEMPO.

Trecho	$\Delta S$ (m)	VMO (km/h)	Transição	$\Delta t$ (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:

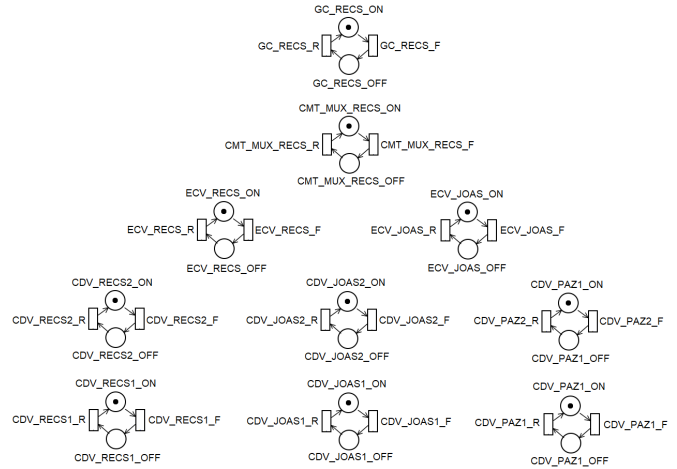
$$T.Intervalo = (((E\{\#RECS1\}) + (E\{\#JOAS1\}) + (E\{\#PAZ1\}) + (E\{\#PAZ2\}) + (E\{\#JOAS2\}) + (E\{\#RECS2\})) / (E\{\#RECS1\} / T_m)) / ((E\{\#RECS1\}) + (E\{\#JOAS1\}) + (E\{\#PAZ1\}) + (E\{\#PAZ2\}) + (E\{\#JOAS2\}) + (E\{\#RECS2\})) \quad (3)$$

- **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  $\Delta t$  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  $\Delta t$  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  $\Delta t$  espera, resulta da divisão do tempo de intervalo pelo número de vias. Portanto, para um cenário com 3 TUEs por exemplo, tem-se:  $\Delta t$  Viagem = 9,290 minutos;  $\Delta t$  Intervalo =  $9,290/3 = 3,096$  minutos e  $\Delta t$  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  $\delta t$  Intervalo, que representam o tempo de intervalo entre os trens computado via equação,

TABELA II  
RESULTADOS DAS MÉTRICAS DE DESEMPENHO.  $\Delta T$   
VIAG.=9,29.

N TUEs	T.Viag(m)[IC]	T.Interv.(m)[IC]	$\Delta t$ Interv.	T.Esp.(m)[IC]	$\Delta t$ 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 exhibe 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

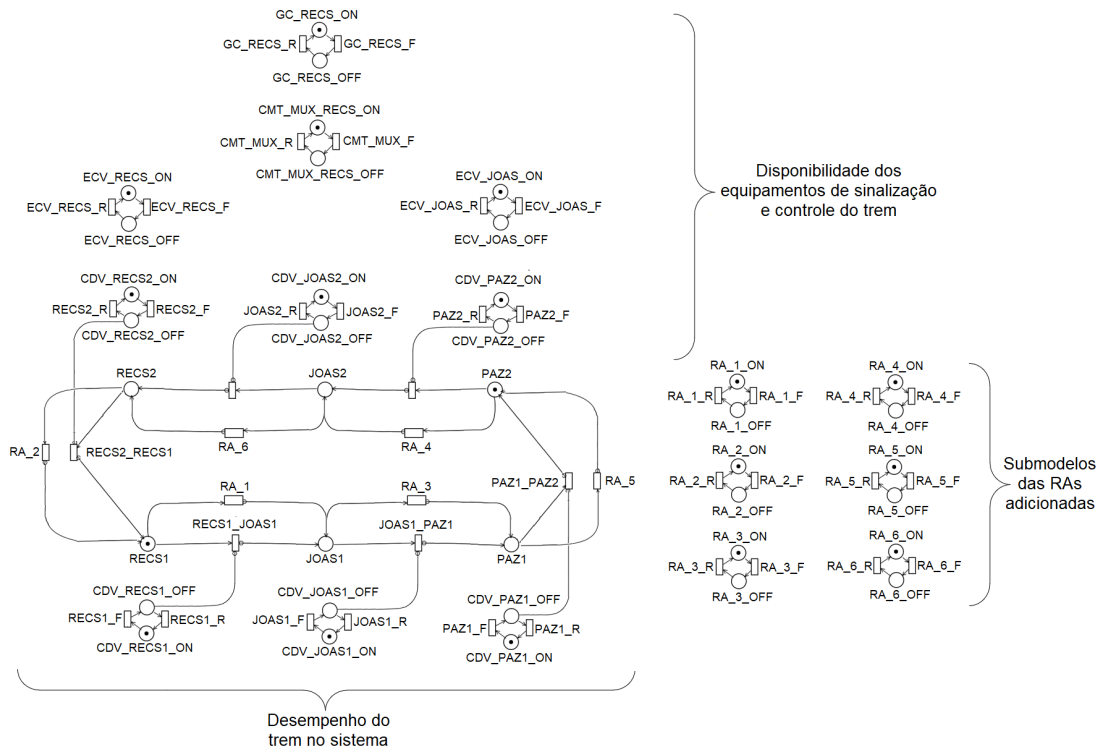


Fig. 6. Modelo de performatividade - Domínio da região RECS.

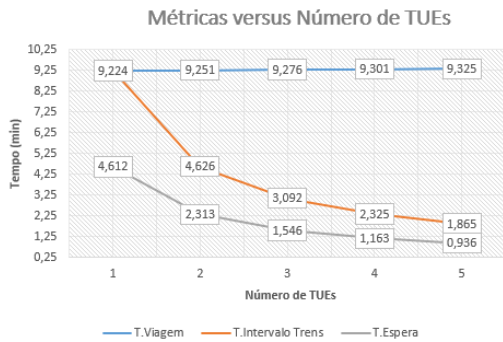


Fig. 7. Impacto da variação de TUEs.

e a disponibilidade do sistema. Vale destacar que as métricas em cada cenário podem sofrer ajustes para reproduzir a inserção dos novos dispositivos, os chamados aparelhos de mudança de via (AMVs), que integram a formação das RAs. Uma RA só é ativada em caso de ocorrência de falha do CDV que pretende ser otimizado. Sendo assim, os dispositivos de controle dessa nova RA são inseridos paralelamente aos do referido circuito de via, aumentando a disponibilidade de todo sistema. Essa otimização pode ser verificada através da análise da Tabela IV, uma vez que a disponibilidade dos dispositivos de controle e sinalização *Alstom* aumentou de 81,674% (cenário sem RAs) para 85,319% (cenário com uma RA), seguindo um ritmo estável de aumento médio na escala de 3,171% por RA adicionada, atingindo a disponibilidade máxima de 98,456% (com 6 RAs).

A Figura 8 ilustra como a adição de rotas alternativas em sistemas ferroviários otimiza o tempo de cada indicador

TABELA IV  
MÉDIAS DE DESEMPENHO CADA CENÁRIO AVALIADO.

Nº de RAs	Desempenho (min)			Disponibilidade (%)
	Viagem	Intervalo	Espera	Alstom RECS
0	11,302	5,071	2,535	81,674
1	11,326	5,068	2,630	85,319
2	9,702	4,570	2,285	87,744
3	9,243	4,327	2,163	92,092
4	8,569	3,963	1,982	93,306
5	7,671	3,493	1,747	94,961
6	7,023	3,226	1,613	98,456

de desempenho. Pode-se observar que o tempo de viagem diminuiu de 11,30 min (Tempo médio sem RAs) para 7,02 min (Tempo médio com 6 RAs), o que representa uma otimização de 37,86%. Destaca-se na Figura 8 que, a partir da quarta RA adicionada, os resultados apresentam uma tendência de estabilização mais acentuada. Esse comportamento indica que, para a região de domínio RECS (Figura 1) o melhor "custo-benefício" seria a adição de 4 RAs.

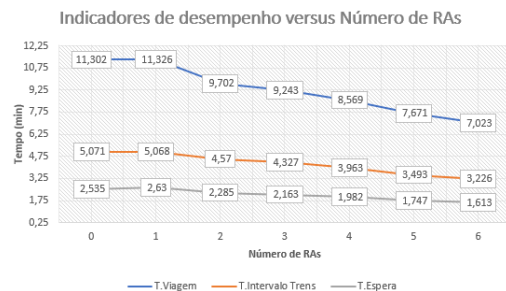


Fig. 8. Impacto da variação de RAs.

## 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.

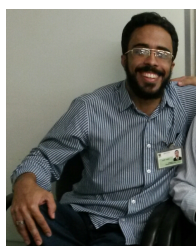
## AGRADECIMENTOS

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 geo-econômica 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 (ICTBS)*, 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.

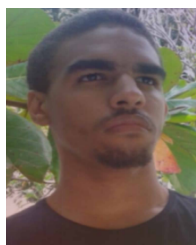
- [13] A. Lopes, "Universidade federal rural de pernambuco," in *Metodologia de Análise de Desempenho de Sistemas de Transporte Público*, (Recife), pp. 18–20, 2019.
- [14] G. Callou, P. Maciel, E. Tavares, E. Andrade, B. Nogueira, C. Araújo, and P. Cunha, "Energy consumption and execution time estimation 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.