

Análise comparativa entre um modelo analítico e um modelo de simulação para o tráfego ferroviário

Ulisses Fernandes Alves (Lactec) ulissesalves@outlook.com.br

Débora Cíntia Marcilio (Lactec) debora@lactec.org.br

Ana Paula Oening (Lactec) ana.oening@gmail.com

Resumo:

O aumento de capacidade de uma ferrovia se caracteriza pela necessidade de altos desembolsos financeiros e, deste modo, a previsão de ganho de cada investimento deve ser a mais precisa possível, pois um desvio pequeno pode representar milhares de reais. As ferramentas mais populares para realização destes cálculos são atualmente planilhas eletrônicas, modelos de simulação em *softwares* específicos para a ferrovia ou ainda programas de propósito geral. Neste contexto, podem surgir dúvidas se uma ou outra ferramenta é adequada para o problema que se pretende analisar. Deste modo, o presente trabalho avaliou um modelo analítico e um modelo de simulação dinâmica com o objetivo de comparar as predições feitas por cada um dos modelos para o tempo de trânsito médio. Este indicador é de grande importância para a área de planejamento de longo prazo, pois direciona a compra de vagões e locomotivas, a implantação de novos pátios e a necessidade de aquisição de novos sistemas de licenciamento. Para a comparação foi elaborado um estudo de caso em que os modelos realizaram a predição para os tempos de trânsito. Os valores preditos foram validados com dados reais do período e avaliados por meio do desvio percentual em relação ao valor realizado. O modelo de simulação apresentou melhor aderência ao realizado, mas ressalta-se que a modelagem analítica não apresentou desvios que a inviabilizasse completamente.

Palavras chave: Ferrovia, Modelo de Simulação Computacional, Modelo Analítico do Tempo de Espera, Transporte Ferroviário, Linha Singela.

Comparative analysis between an analytical model and a simulation model for rail traffic

Abstract

The increase in capacity of a railroad is characterized by the need for high financial disbursements and, therefore, the forecast of the gain of each investment should be as accurate as possible, since a small deviation can represent thousands of reais. The most popular tools for performing these calculations are currently spreadsheets, simulation models in railroad specific software or general-purpose programs. In this context, doubts may arise if one or another tool is suitable for the problem to be analyzed. Thus, the present work evaluated an analytical model and a dynamic simulation model with the objective of comparing the predictions made by each of these models for the mean transit time. This indicator is of great importance for the long-term planning area, since it guides the purchase of wagons and locomotives, the implementation of new yards and the need for acquiring new licensing systems. For the comparison, a case study was elaborated in which the models predicted the transit times. The predicted values were validated with real data from the period and evaluated using by means of the percentage deviation in relation to the realized value. The simulation model presented better adherence

to the realized one, but it should be emphasized that the analytical modeling did not present deviations that made it completely unfeasible.

Key-words: Railroad, Computational Simulation Model, Analytic Model of Delay Time, Rail Transport, Single Track

1. Introdução

Durante a definição da estrutura da ferrovia a ser construída ou na capacitação da estrutura existente podem surgir questões como: qual deve ser o incremento na quantidade de vagões e locomotivas para atender a demanda futura? Devem ser construídos mais pátios de cruzamentos? É necessário implementar um sistema de licenciamento mais rápido? Deve ser investido para que a malha ferroviária suporte o deslocamento de um trem com maior número de vagões? Qual deve ser o espaçamento entre os pátios de cruzamento que respeite as restrições físicas e que garanta a maior produtividade do sistema? Em qual região devem haver linhas duplicadas? Qual deve ser o intervalo concedido para a manutenção da via permanente?

A resposta para estas questões depende basicamente do impacto que estas ações causam na redução do tempo de trânsito médio das composições e no aumento da quantidade de trens que circulam na malha. Conforme destacado por Barros (2013), estes desafios levam a um esforço muito grande no sentido de identificar e quantificar com exatidão a relação dos elementos do sistema ferroviário. As análises dos projetos e as ações de melhoria para o sistema ferroviário precisam de ferramentas e modelos que sejam capazes de representar adequadamente a conexão entre as variáveis deste sistema. Surge, assim, a necessidade de serem desenvolvidos modelos aprimorados que forneçam as respostas que os gestores buscam.

Assim, este artigo realiza a avaliação de dois tipos de abordagens para sistemas ferroviários, a saber: um modelo analítico com base na teoria das filas e um modelo de simulação, desenvolvido e implementado pelo presente trabalho. As duas abordagens são aplicadas em uma malha ferroviária de linha singela e buscam responder qual modelo é mais adequado para predizer o tempo de trânsito médio dos trens.

2. Modelagem analítica

O modelo analítico foi construído em uma planilha buscando representar os elementos da operação ferroviária e suas variáveis, tendo em vista o período de análise, pois estes fatores podem sofrer alteração ao longo do tempo. Na abordagem utilizada, foi calculada a capacidade para cada linha singela dada pela aplicação da seguinte fórmula de Colson (adaptada de Barros (2013)):

$$C_p = \left[\frac{1440 - t_m}{Ti + T_p + 2\theta} \right] * k \quad (1)$$

Em que:

- C_p – Capacidade prática da seção em pares de trens por dia;
- 1440 – Número de minutos no dia (min);
- t_m – Tempo de manutenção da via férrea com interrupção da circulação (min);
- Ti – Tempo de condução do trem em um sentido (min);

- T_p – Tempo de condução do trem no sentido oposto (min);
- θ – Tempo de licenciamento considerando as características no sistema adotado de licenciamento e controle (min);
- k – Coeficiente ou fator redutor percentual, que varia de 60% a 80% conforme a eficiência de cada ferrovia (%).

O cálculo do tempo de espera pode ser realizado pelas equações de Pollaczek-Kintchine, as quais são baseadas na teoria de filas (NOVAES, 1975):

$$Te = \sum_{k=1}^n \frac{(Ti_k + Tp_k) \rho_k}{2(1 - \rho_k)} \quad (2)$$

$$\rho_k = \frac{D_k}{Cp_k} \quad (3)$$

Em que:

- n – total de seções de bloqueio do trecho ferroviário;
- k – seção de bloqueio específica;
- Te – Tempo de espera (min);
- ρ – taxa de utilização da capacidade;
- D_k – demanda de tráfego planejado para a seção de bloqueio k em pares de trens por dia;
- Cp_k – capacidade prática da seção de bloqueio k também em pares de trens por dia.

Na equação Pollaczek-Kintchine, quanto maior a intensidade do tráfego ferroviário, ou seja, quanto mais o valor de ρ se aproxima de 1 (ou 100%), maiores serão os tempos de espera resultantes, gerando assim o fenômeno conhecido como congestionamento.

Finalmente, pode ser calculado o tempo de trânsito médio da malha ferroviária ($TT_{\text{médio}}$), dado pela equação (4):

$$TT_{\text{médio}} = \frac{1}{2} \sum_{m=1}^2 \sum_{k=1}^n (Ti_{mk} + Tp_{mk} + Te_{mk} + \theta_{mk} + T_{\text{processo}}_{mk}) \quad (4)$$

Em que:

- m – sentido da circulação dos trens, sendo 1 para exportação e 2 para importação;
- T_{processo} – duração média para eventos de abastecimento, anexação de locomotivas e trocas de equipes que acontecem nos pátios de atividades (min).

A equação (4) é dividida por 2 para representar o tempo de trânsito médio independente do sentido de circulação (exportação ou importação).

3. Modelo de simulação

O modelo de simulação para a circulação de trens elaborado no *software* Arena segue o fluxo de processamento da informação apresentado na Figura 1 para a geração dos resultados da

simulação. Tanto a entrada de dados quanto a saída são consolidadas em planilhas eletrônicas, sendo encargo da simulação processar adequadamente os dados de entrada:

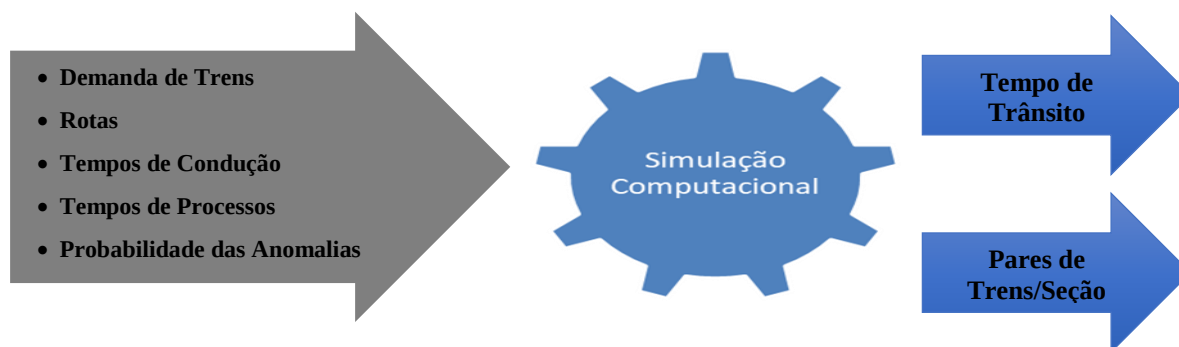


Figura 1 – Fluxo de processamento da informação na simulação

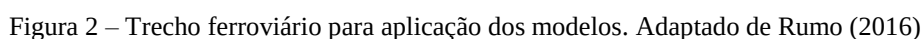
O princípio da simulação reside nos tempos envolvidos para cada tipo de evento pelo qual passa o trem, com destaque para os elencados a seguir:

- Tempo de espera para o cruzamento;
- Tempo de condução nas seções de bloqueio (pátios, linhas singelas e ou duplas);
- Tempo de processos no trecho (troca de equipe, anexação/desanexação de locomotivas e abastecimentos);
- Anomalias (acidentes de modo geral e falhas de locomotivas, vagões, via permanente, equipamentos de comunicação, etc.);

Deste modo, o tempo de trânsito para a trajetória total de um trem é o resultado da soma de todos estes tempos. Um ponto importante a se destacar é que o tempo de espera é uma saída deste modelo, enquanto que os demais tempos são dados de entrada para se realizar a simulação. Este tempo de espera surge em decorrência do fato de que o trem deve aguardar até que o próximo segmento de linha do seu destino esteja disponível para que ele possa transitar. As regras para o avanço do trem são implementadas na simulação para atuarem de modo semelhante ao que acontece na realidade quando é fornecida uma licença para o trem seguir adiante.

4. Estudo de caso

O estudo realizado no presente trabalho é direcionado para análise do trecho ferroviário de linha singela compreendido entre Rondonópolis (MT) e a região de Campinas (SP), conforme destacado na Figura 2. Os principais produtos transportados por este corredor ferroviário são commodities agrícolas como grãos (soja, farelo de soja e milho), açúcar, arroz, trigo e fertilizantes, além de produtos industriais como combustíveis e celulose (RUMO, 2017a). Para a análise do estudo de caso foram criados os casos A, B e C que se referem aos meses de Abril, Maio e Setembro de 2017, com o propósito comparar os valores dos tempos de trânsito resultantes de cada modelo com os valores reais de cada mês.



A Rumo logística disponibilizou os dados referente aos tempos envolvidos e utilizados pelos modelos com a restrição de não divulgar de forma explícita estes valores. Portanto, a codificação para os elementos dos pátios e linhas singelas mencionadas anteriormente, não irá fazer referência aos locais conhecidos publicamente e, portanto, podem estar localizados em qualquer região compreendida entre Rondonópolis e Campinas. Além disso, todos os dados de entrada e resultados apresentados foram normalizados linearmente no intervalo entre 0 e 100% com exceção dos casos das tabelas 1 e 2 em que os resultados foram divididos por uma determinada constante.

A Figura 3 apresenta a demanda em PdTs para as seções das linhas singelas nos períodos mencionados:

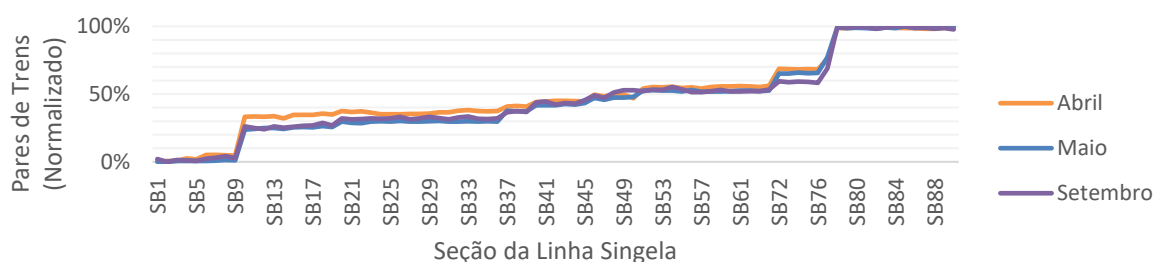


Figura 3 – Demanda do transporte ferroviário (PdTs) em linhas singelas no ano de 2017 (RUMO, 2017b)

No modelo de simulação foram definidos os intervalos entre partidas de trens para cada fluxo de transporte composto por uma origem, um destino e uma carga, os quais também foram codificados de forma sequencial. Os intervalos de partidas para cada fluxo serão apresentados na Tabela 1 que apresenta a origem e o destino. No caso dos fluxos que encerram na região do Porto de Santos é anotado no seu destino apenas “Santos”, enquanto que os fluxos que não tiveram demanda em determinado mês são descritos como “N/A” (não se aplica):

ID Fluxo	Origem	Destino	Intervalo entre partidas [h]		
			Abril	Maio	Setembro
1	PT70	Santos	19,9	4,2	10,9
2	PT87	Santos	18,7	10,2	13,9
3	PT74	Santos	14,9	6,4	8,6
4	PT114	Santos	16,0	4,5	N/A
5	PT2	Santos	6,2	2,7	4,5
6	PT2	PT292	67,6	47,5	11,0
7	PT114	Santos	3,4	2,2	9,2
8	PT24	Santos	6,3	3,1	3,5
9	PT24	Santos	2,1	2,6	3,7
10	PT44	Santos	12,4	9,0	9,2
11	PT13	Santos	16,0	N/A	27,6
12	PT2	Santos	1,0	1,3	0,8
13	PT2	Santos	0,8	0,8	0,8
14	PT292	PT31	15,6	19,9	22,2
15	PT292	PT1	5,9	6,2	5,2
16	PT292	PT86	18,2	17,2	21,9
17	PT292	PT115	67,8	70,5	N/A
18	PT292	PT129	13,0	6,3	16,3
19	PT130	Santos	N/A	11,0	N/A

Fonte: Adaptado de Rumo (2017b)

Tabela 1 – Intervalos entre partidas dos trens (divididos por uma constante)

O gráfico apresentado na Figura 4 mostra de maneira geral o tempo médio que um trem leva para receber uma licença do CCO:

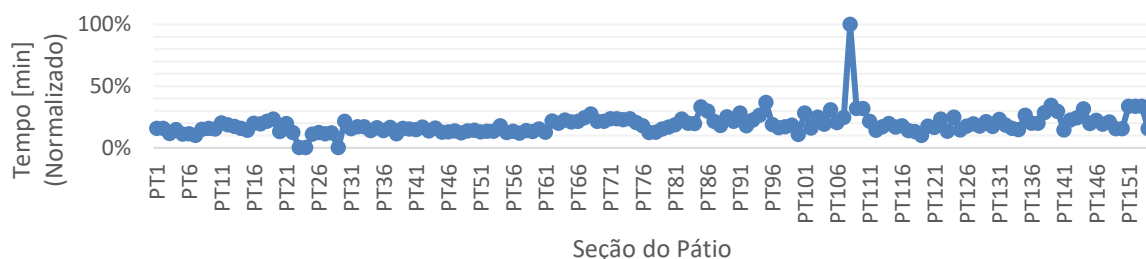


Figura 4 – Tempo médio de licenciamento nos pátios em Abril de 2017 (RUMO, 2017b)

O tempo de licenciamento compreende a média dos valores contidos no mês de Abril de 2017, os quais serão assumidos também para os demais meses das análises, pois com exceção de um valor na seção do pátio PT108 que assume o valor máximo de 100%, tem-se que os demais valores assumem a média de 18% e não apresentam variações consideradas significativas.

As Figuras 5 e 6 apresentam os valores médios para os tempos de condução nas seções do pátio no sentido exportação e importação, respectivamente:

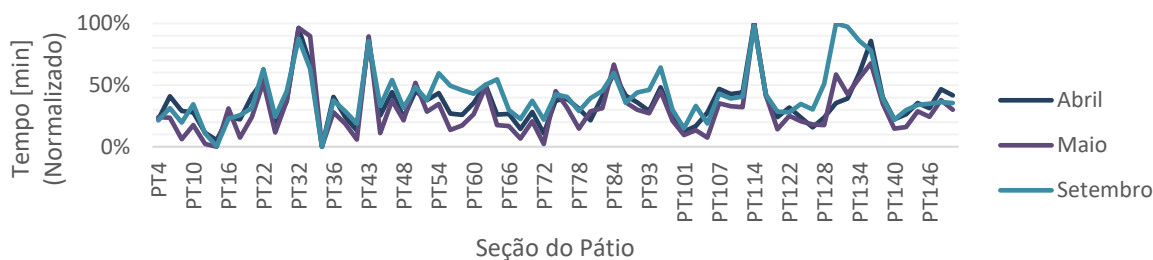


Figura 5 – Tempo de condução nas seções do pátio: sentido exportação (RUMO, 2017b)

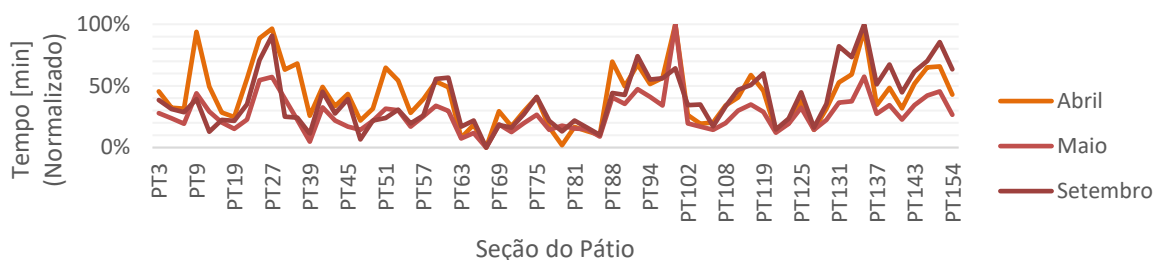


Figura 6 – Tempo de condução nas seções do pátio: sentido importação (RUMO, 2017b)

Os gráficos apresentados na figura 7 e na figura 8 representam os dados para os tempos de condução nas linhas singelas para os sentidos exportação e importação, respectivamente:

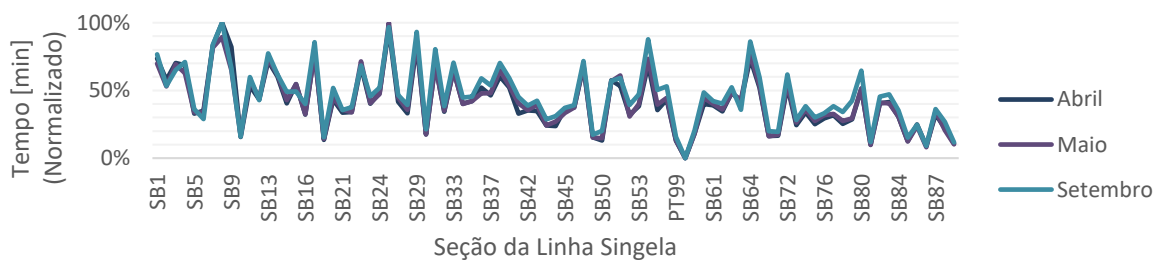


Figura 7 – Tempo de condução nas seções da linha singela: sentido exportação (RUMO, 2017b)

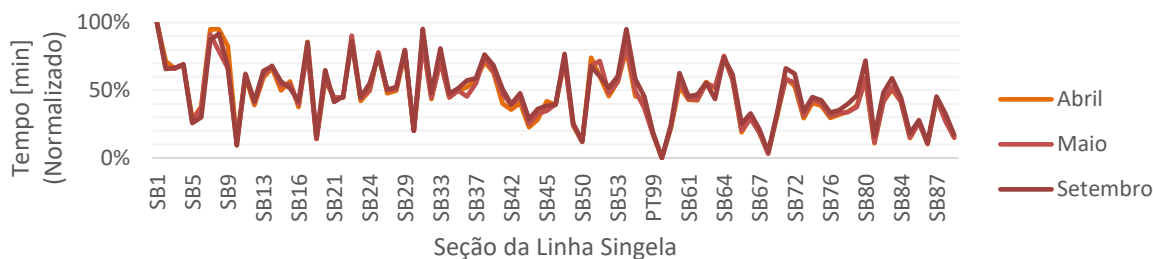


Figura 8 – Tempo de condução nas seções da linha singela: sentido importação (RUMO, 2017b)

O comparativo entre os valores realizados mensalmente para os meses em consideração mostra tempos bastante semelhantes, tanto no sentido exportação quanto no sentido importação. Contudo, quando é analisada a amplitude dos valores assumidos pelo tempo de condução, verifica-se a existência de uma elevada dispersão entre as SBs adjacentes, o que mostra que o comprimento das seções é bastante variável.

Em relação ao fator de eficiência K utilizado no modelo analítico foi definido o valor de 80%,

conforme valor máximo apontado por Brina (1988), tendo em vista as características operacionais do trecho em avaliação. Seguindo este mesmo critério, também foi utilizado um tempo de manutenção médio diário igual a 60 minutos.

As falhas e ineficiências que ocorrem na seção de bloqueio são inseridas no modelo de simulação por meio de um percentual de ocorrência de falhas e por uma distribuição probabilística para a duração desta anomalia. Com o intuito de simplificar a consolidação das distribuições estatísticas, foi assumido que os conjuntos de dados podem ser modelados por uma distribuição triangular, em que o primeiro argumento da distribuição é o valor mínimo, o segundo argumento é a moda e o terceiro argumento é o valor máximo.

4.2 Análise dos dados de saída

O sistema considerado no presente estudo apresenta características de um sistema não terminal. Para tanto, o método de análise dos resultados consistiu em executar a simulação por 7.440 horas o que equivale a um período de 10 meses, de modo que este tempo foi considerado suficiente para à análise do momento em que o sistema entra no regime estacionário. O tempo para executar as simulações girou em torno de 10 minutos. Para verificação do regime estacionário e eliminação do período transiente, foram elaborados gráficos para o tempo de trânsito médio ao longo do tempo de simulação para cada um dos casos considerados e verificado o momento em que o sistema atinge o regime permanente.

5. Resultados

Os resultados dos casos A, B e C foram consolidados para realizar a validação e a comparação dos modelos. Foram contabilizados os valores do tempo de trânsito apresentados na tabela 2:

CASOS	Valor Observado Real	Tempo de Trânsito Médio [h]			
		Modelo Analítico		Modelo de Simulação	
		Valor	Desvio % ¹	Valor	Desvio % ⁷
A	17:00	17:21	2,1%	15:47	-7,2%
B	17:06	18:51	10,2%	17:03	-0,3%
C	18:20	19:38	7,1%	18:42	2,0%

Fonte: O autor (2018)

Tabela 2 – Comparativos entre os tempos de trânsito do trecho (divididos por uma constante)

Pode ser observado no caso A que o modelo analítico apresentou valores mais próximos do valor realizado, enquanto que nos casos B e C, o modelo de simulação apresentou valores mais próximos da realidade. Isto se deve ao fato de que a demanda no caso A não é tão elevada quanto nos casos B e C, o que indica um melhor desempenho do modelo analítico.

Dentre as características de cada modelo, pode-se constatar que o modelo estático concentra todo o tempo de espera em um determinado pátio em questão, devido a sua incapacidade de atualizar os seus tempos em reflexo aos eventos que acontecem nas regiões próximas do pátio. Já o modelo de simulação, por possuir natureza dinâmica lida bem com eventos que se propagam ao longo do espaço e tempo. Assim, uma restrição do modelo analítico é a sua incapacidade de proporcionar análises para verificar os efeitos no tempo de trânsito decorrentes

¹ Desvio percentual em relação ao valor observado real.

de intervalos concedidos para manutenção da via permanente, pois neste caso, algumas durações elevadas de intervalo causam parada de trens em regiões distantes do local em que se está realizando a manutenção.

Outro ponto a ser mencionado é que embora tenha sido considerado um fator de eficiência (Colson) extremamente otimista para o modelo analítico, pode ser observado que os valores de tempo de trânsito médio preditos por este modelo foram superiores ao realizado, o que mostra que este modelo de teoria de filas está superestimando o tempo de espera. Este resultado induz o gestor a tomar decisões conservadoras que irão gerar capacidade excedente em relação à real necessidade. Contudo, como foi ressaltado na introdução deste trabalho, uma obra ferroviária tem um custo muito elevado, e esta despesa pode ser evitada com um modelo que seja capaz de prever mais acuradamente o valor do tempo de trânsito médio.

5. Considerações finais

No estudo realizado para o trecho ferroviário foram avaliados os resultados de tempo de trânsito médio dos modelos e constatou-se que o modelo de simulação apresentou maior aderência aos valores reais. Com as análises dos modelos, pode ser constatado que a principal diferença dos resultados do modelo analítico pode ser atribuída ao fato de que esta abordagem não possui a dinâmica de propagação de anomalias e tempos de espera que o modelo de simulação consegue representar de forma mais adequada.

Mesmo que o modelo analítico não seja capaz de realizar as análises que são possibilitadas pelo modelo de simulação, deve-se ressaltar que o seu uso pode complementar quando possível os resultados de uma simulação dinâmica, pois enquanto o método analítico guia as análises iniciais, a abordagem dinâmica permite o refinamento necessário dos fenômenos para que se tenha confiança e clareza nos investimentos e ações que serão implantados para capacitar e melhorar os processos da malha ferroviária.

Referências

- BARROS, J. M. F. M.** *Avaliação dos principais métodos analíticos de cálculo de capacidade de tráfego utilizados em ferrovia nacional e internacional*, 2013. Dissertação (Mestrado em Geotecnia e Transportes) - Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2013.
- BRINA, H. L.** *Estradas de Ferro 2*. 2a ed. Belo Horizonte: Editora UFMG, 1988.
- NOVAES, A. G. N.** *Pesquisa Operacional e Transportes: Modelos Probabilísticos*. Engenharia da Universidade de São Paulo: McGraw-Hill do Brasil, 1975.
- RUMO.** *Mapa da Ferrovia*. Curitiba, 2016.
- RUMO.** *Modelo de Negócio: Rumo*. Curitiba, 2017a.
- RUMO.** *Dados para Simulação*. Curitiba, 2017b.