

# AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO EM TRECHOS SINGELOS DE MALHAS FERROVIÁRIAS: UMA COMPARAÇÃO ENTRE O MODELO DE REDE DE FILAS E O MODELO DE SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL <sup>1</sup>

*Irce Fernandes Gomes Guimarães <sup>2</sup>  
Lásara Fabrícia Rodrigues <sup>3</sup>*

## **Resumo**

O presente trabalho propõe uma comparação entre dois métodos: a modelagem de redes de filas e a Simulação computacional utilizados para estimar medidas de desempenho, como por exemplo, o tempo médio total de viagem num trecho sem bifurcações de uma malha ferroviária, contendo um certo número de pátios de cruzamento. O objetivo desta comparação é apresentar as duas ferramentas de análise de desempenho para se determinar a capacidade de malha ferroviária dado um nível de serviço e também mostrar quais as especificidades de cada um dos métodos. Assim, para estas análises, foi modelado o trecho de malha por uma rede de servidores em série ou modelo computacional, representando os subtrechos entre pátios, e os trens que percorrerão esses pátios. Estes modelos podem ser usados para estimar o impacto no tempo de viagem de trens em trechos congestionados. Foram apresentados, para os dois métodos, resultados numéricos em trechos singelos de malha da Ferrovia Centro Atlântica, bem como uma comparação entre os dois métodos.

**Palavras-chave:** Redes de filas; Método aproximado de decomposição paramétrica; Simulação computacional; Capacidade de malha.

## **MEASURING THE PERFORMANCE IN SINGLE STRETCHES OF RAILROAD LINE: A COMPARISON BETWEEN A LINE NETWORK MODEL AND A SIMULATION MODEL**

### **Abstract**

The present work proposes a comparison among two methodologies: a line network model and a simulation model to measure the performance of, for example, the average total trip time for a given train route where there is no track changing involved and where it passes through several railroad crossings. The objective of this comparison is to present two performance analysis tools used to determine the railroad line capacity for a given level of service. As such, for these analyses the stretch of the railroad line for a network of servers in series is modeled or represented by a computational model representing the sub-stretches between the railroad crossing and the trains. These models can be used to estimate the impact on the trains travel time in congested areas. Numerical results are presented in single stretches of the railroad line of Ferrovia Centro Atlântica, as well as a comparison among the two methods.

**Key words:** Line networks; Approximation method for parametric decomposition; Simulation, Railroad line capacity.

<sup>1</sup> *Contribuição técnica ao XXVI Seminário de Logística, 19 e 20 de junho de 2007, Vitória - ES*

<sup>2</sup> *Professora da Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP) - Mestre em Engenharia de Produção (UFMG)*

<sup>3</sup> *Professora do Centro Federal de Educação Tecnológica de Ouro Preto (CEFET-OP) – Mestre em Engenharia de Produção (UFMG)*

## 1 INTRODUÇÃO

A utilização do modal ferroviário começou a perder espaço para o modal rodoviário a partir da década de 50, com a ampliação da malha rodoviária brasileira. Com a privatização do setor ferroviário, na década de 90, alguns trechos da malha ferroviária foram desativados, o que proporcionou o aumento da utilização do modal rodoviário.

De acordo com Bertaglia (2005), a indústria ferroviária não tem recebido, nos últimos anos, inovações tecnológicas na mesma velocidade que a indústria da aviação e o transporte rodoviário. Tal fato pode ser justificado pela característica própria do setor ferroviário em transportar produtos que são *commodities*, a baixo custo e não apresentar muita flexibilidade de operação.

Portanto, o gerenciamento eficaz e a utilização dos bens e recursos se tornaram pontos importantes na disputa de mercados, redução de custos, melhoramento de serviços e controle do tráfego de uma ferrovia. Diariamente, o tráfego em estrada de ferro atende diferentes tipos de serviços em trens que concorrem a mesma linha férrea. As dimensões da área controlada e a intensidade do tráfego são fatores que dificultam a tomada de decisões do tipo e número de trens que devem trafegar na linha, número de pátios necessários. Devido a estas restrições, o desenvolvimento de modelos de otimização para planejamento da utilização das malhas ferroviárias vêm sendo alvo de muitos estudos e tem-se verificado alguns avanços neste tipo de serviço. De acordo com Kuehn (1999), para que as empresas ferroviárias prosperem e intensifiquem suas atuações no mercado de entrega é necessário que estes serviços sejam oferecidos com maior rapidez, qualidade e segurança.

Segundo Guimarães (2005), a capacidade de tráfego de trens em uma malha ferroviária pode ser analisada com base na capacidade teórica, no número máximo de trens que podem percorrer um determinado trecho, e com base na capacidade prática, a qual se refere à habilidade de combinar o trecho a ser percorrido com o tráfego e as operações da linha, a fim de transportar o maior número de trens possível. Porém, existem técnicas mais eficientes que permitem uma melhor visualização do problema. Atualmente alguns modelos mostram boas soluções para este tipo de problema, exemplos podem ser encontrados no estudo de Cordeau *et al* (1998) e em Krueger (1999).

Para Bancks *et al* (2001), a simulação é uma representação de um processo do mundo real. Ela envolve a geração de um sistema artificial e, através da observação deste sistema são retiradas as conclusões a respeito das características de operação do sistema real.

Outra forma de abordar o problema de capacidade de linha férrea é através Rede de filas, esse método é mostrado por Guimarães (2005). Neste trabalho, é feita uma análise de capacidade de uma malha ferroviária utilizando o modelo de rede de filas em trechos singelos, os quais podem ser denominados trechos de uma linha férrea sem bifurcações que operam no sentido de exportação (da empresa para o porto marítimo) e no sentido de importação (do porto marítimo para a empresa), permitindo a passagem de apenas um trem, independente do sentido de movimentação.

Portanto, este estudo propõe uma comparação entre dois métodos utilizados para analisar o problema de capacidade de linha férrea: a simulação no *software* Arena 5.0 e o modelo de rede de filas, bem como avaliar como os dois métodos estimam o tempo médio total de viagem num trecho singelo de malha ferroviária e o impacto no tempo de viagem de trens em trechos congestionados.

## 2 O SISTEMA EM ESTUDO

O modelo conceitual em estudo trata de uma malha ferroviária dedicada ao transporte de cargas a pequenas e longas distâncias, composta de um trecho singelo, ou seja, um trecho sem bifurcação onde há apenas uma linha que é compartilhada por trens que viajam em sentidos opostos. Existem dois pontos de acesso para entrada e saída do sistema. Entre estes pontos estão os pátios de espera e os subtrechos. Denominam-se subtrechos os fragmentos de linha entre os pontos de acesso e o pátio subsequente e entre um pátio e outro.

Os trens chegam ao sistema de uma fonte externa e poderão atravessá-lo se a capacidade estiver abaixo da permitida, caso contrário eles não entram no sistema. Ao entrar no sistema, os trens podem percorrer cada subtrecho ou aguardar nos pátios de espera, existentes em cada subtrecho. Os processos de chegada e de serviço são aproximados por processos de renovação e os subtrechos são assumidos estocasticamente, independentes um dos outros, com apenas um servidor. O roteamento dos trens será considerado determinístico. Quando um trem chegar ao sistema, ele deverá seguir para o subtrecho deterministicamente roteado a ele. Os processos de chegada externa dos trens são independentes e probabilísticos, com intervalos de tempo entre as chegadas independentes e identicamente distribuídos (*iid*) nos subtrechos. Todos os trens que entram no sistema deverão sair, ou seja, não se perde trens ao longo da rede. Admite-se que os subtrechos estão em condições de serem atravessados sem que haja interrupções ou bloqueios de passagens. Um subtrecho poderá ser utilizado por apenas um trem. Quando um subtrecho estiver ocupado e outro trem necessitar trafegar, então este deverá aguardar em um pátio de espera (*buffer*). Uma vez permitido o atravessamento de um trem em um subtrecho, este não poderá ser interrompido nem cancelado. A disciplina de atendimento será por ordem de chegada (FIFO). A Figura 1 representa um trecho singelo de malha ferroviária. Verifica-se que o sistema tem apenas dois acessos para entrada e saída, e que os subtrechos são os percursos entre um pátio e outro.

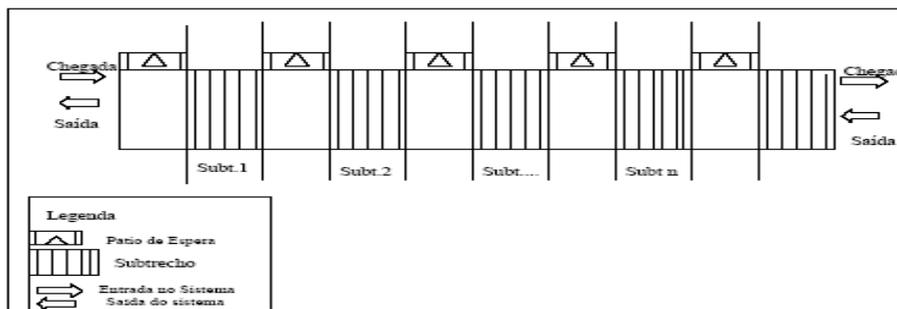


Figura 1: Um trecho de malha ferroviária

O trem completa o processo de serviço em um subtrecho, quando termina de atravessá-lo. Sabe-se que o dimensionamento adequado e a operação otimizada podem contribuir para que haja uma continuidade no fluxo de trens, evitando congestionamento e grande tempo em filas. Então, para atender esse princípio, necessita-se de avaliar o desempenho deste sistema, e para este fim, serão analisados alguns parâmetros tais como taxa de chegada de trens, tempo de atravessamento em cada subtrecho, capacidade dos pátios, tempo que os trens esperam nos pátios.

### 3 MÉTODOS UTILIZADOS PARA ANÁLISE DA CAPACIDADE DE UMA MALHA FERROVIÁRIA

#### 3.1 Simulação Computacional

Com a utilização do computador, os modelos matemáticos adquiriram solução mais rápida e fácil, levando ao aumento do uso de simulação computacional. Esta é uma ferramenta utilizada para analisar a performance de sistemas e o comportamento futuro de variáveis relevantes.

Os modelos de simulação computacional são representados por uma estrutura matemática e/ou lógica, e são baseados em distribuições estatísticas que introduzem variações randômicas dentro do modelo, criando estatísticas que validam o experimento.

Segundo Pedgen *et al* (1994), a simulação é o processo de projetar um modelo computacional de um sistema real e conduzir experimentos, objetivando o entendimento do seu comportamento e/ou avaliando estratégias para sua operação. A modelagem deve ser capaz de compreender a realidade dos sistemas em estudo, baseando-se em fenômenos conhecidos, permitindo a simulação e a realização de experimentos que possibilitam prever o comportamento real.

Portanto, de acordo com Soares (1992), o modelo pode ser entendido como uma ferramenta para:

- auxiliar na detecção das características intrínsecas do sistema;
- analisar gargalos do sistema e elementos críticos;
- avaliar idéias, e soluções;
- planejar novos projetos.

Lembrando que o modelo é sempre uma abstração da realidade, e sua importância se apresenta, principalmente, quando é necessário definir qual o escopo do problema e o nível de detalhes que devem ser considerados.

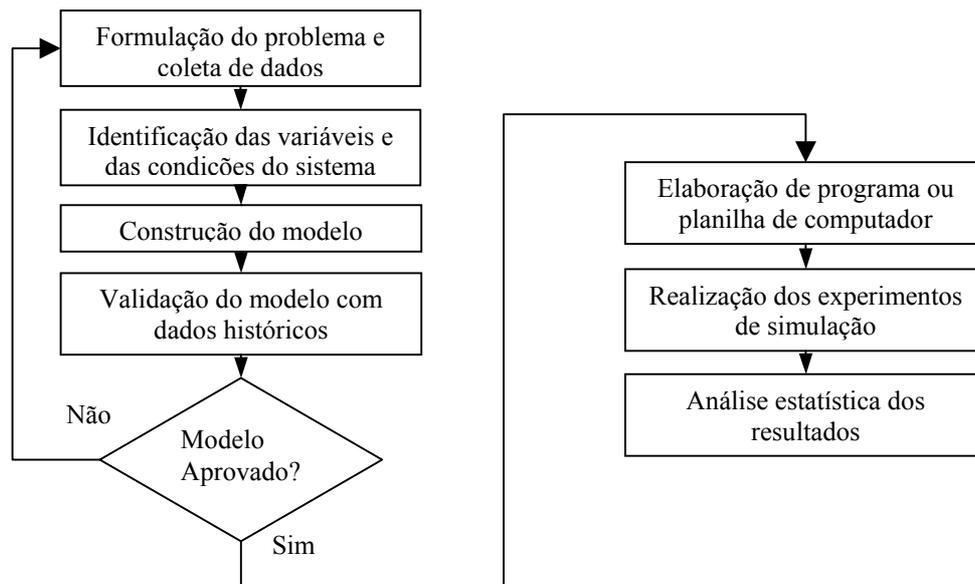
De acordo com Pidd (1998), um modelo é a representação externa explícita da realidade vista pelas pessoas que desejam usá-lo para entender, mudar, gerenciar e controlar aquela parte da realidade.

Law & Kelton (1991) afirmam que as vantagens do uso da simulação são:

- modelar sistemas complexos que têm elementos estocásticos que devem ser resolvidos e analisados pela simulação, visto que estes não poderiam ser descritos perfeitamente por modelos matemáticos resolvidos analiticamente;
- fornecer um melhor controle sobre as condições experimentais do que seria possível no sistema real, pois podem ser feitas várias replicações no modelo, fornecendo os valores para todos os parâmetros;
- permitir a replicação precisa dos experimentos, possibilitando-se testar alternativas diferentes para o sistema;
- permitir simular longos períodos em um tempo reduzido ou vice-versa;
- evitar gastos desnecessários, em geral, é mais econômico que testar o sistema real.

Pinto (1999) descreve que uma das vantagens da simulação é a possibilidade de controlar a velocidade com que as alterações no estado do modelo processam. A essência da simulação é que trocas de estado do sistema são modeladas através do tempo.

Segundo Andrade (2000), um trabalho de simulação pode ser desenvolvido segundo as etapas ilustradas na Figura 2.



**Figura 2:** Etapas de um sistema de Simulação

### 3.2. Método Aproximado de Decomposição Paramétrica para Rede de Filas G/G/1

Este método de aproximação vem sendo bastante utilizado na literatura e está trazendo bons resultados na avaliação de performance de sistemas produtivos. Pode-se citar como exemplos de aplicações os estudos apresentados por Asadathorn e Chao (1999), Bitran e Morabito (1996), Kim (2004), Morabito (1998) e Whitt (1995). Este tipo de abordagem é eficiente para avaliação de sistemas industriais, pois ele utiliza processo de renovação para aproximar os processos de chegadas e serviços.

Neste método, os processos de chegada e serviços são descritos por poucos parâmetros: suas respectivas médias e scv (a variância dividida pelo quadrado da média). No caso de uma ferrovia, os subtrechos são tratados como se fossem estocasticamente independentes e são analisados separadamente como um sistema de fila G/G/1. Esta independência pode ser interpretada como uma simplificação da solução, porém, quando se aproximam os fluxos internos através do scv, as aproximações tentam capturar a dependência entre os intervalos de chegadas em cada subtrecho. O método de decomposição paramétrico pode ser descrito em três passos:

#### Primeiro Passo

No primeiro passo, são determinados os fluxos internos de chegada em cada estação. Nesta etapa do processo, pretende-se calcular para cada subtrecho dois parâmetros: (i) a taxa média de chegada ( $\lambda_j$ ); e (ii) o scv ou parâmetro de variabilidade do intervalo de tempo entre chegadas ( $ca_j$ ). As equações de variabilidade do tráfego combinam três etapas:

*Superposição de Chegadas* que é baseado no método de intervalos estacionários através de uma combinação convexa das taxas médias de chegadas e do scv do intervalo de tempo entre chegadas em cada subtrecho. Neste processo são combinados para cada subtrecho os fluxos de chegadas de trens e o parâmetro de

variabilidade do intervalo de tempo entre chegadas(scv). Efetivamente a taxa média de chegadas de trens em cada subtrecho de um sistema ferroviário pode ser encontrada pelas seguintes equações do tráfego:

$$\lambda_j = \lambda_{0j} + \sum_{i=1}^n q_{ij} \lambda_i \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (1)$$

Para um sistema ferroviário pode-se considerar que cada subtrecho interno  $j$  será descrito pelos fluxos dos trens, sendo estes representados pela matriz de transição  $Q = q_{ij}$ , sendo  $i = 1, 2, 3, \dots, n$  e  $j = 1, \dots, n$ . Como os trens num subtrecho só podem seguir para um dos subtrechos adjacentes, ou no caso dos  $j = 1$  e  $j = n$  podem também sair do sistema, essa matriz pode ser representada por:

$$Q = \begin{pmatrix} 0 & q_{12} & 0 & \dots & & \\ q_{21} & 0 & q_{23} & 0 & \dots & \\ 0 & q_{32} & 0 & q_{34} & 0 & \dots \\ \vdots & & & \ddots & & \\ 0 & \dots & q_{n-1,n-2} & 0 & q_{n-1,n} & \\ 0 & \dots & & q_{n,n-1} & 0 & \end{pmatrix}$$

Com a matriz acima pode-se chegar as seguintes equações do tráfego considerando-se  $n$  subtrechos. Observe que neste sistema ferroviário existe acesso externo ao sistema apenas pelos subtrecho 1 e  $n$ . Portanto as taxas de chegada externa nos outros subtrechos serão iguais a zero. ( $\lambda_{0j} = 0$ ; sendo  $j = 2, \dots, n - 1$ )

$$\lambda_j = \begin{cases} \lambda_{01} + q_{21} \lambda_2; & \text{se } j = 1 \\ q_{j-1,j} \lambda_{j-1} + q_{j+1,j} \lambda_{j+1} & \text{se } j = 2, \dots, n - 1 \\ \lambda_{0,n} + q_{n-1,n} \lambda_{n-1} & \text{se } j = n \end{cases} \quad (2)$$

Dada a taxa de chegada é possível obter a intensidade do tráfego ( $\rho_j$ ) em cada subtrecho, por:

$$\rho_j = \frac{\lambda_j}{\mu_j} \quad j = 1, \dots, n \quad (3)$$

Se  $\rho_j \geq 1$ , então o  $j$ -ésimo nó é instável e torna-se inviável a resolução deste problema através deste método. Por outro lado se  $\rho_j < 1$  o sistema será considerado estável.

O cálculo do scv do intervalo de tempo entre chegadas em cada subtrecho  $j$  considerando que  $\lambda_{ij} = \lambda_i q_{ij}$  e que o fluxo parte de  $j$  para  $i$  é feito a partir de:

$$ca_j = W_j \sum_{i=0}^n \frac{\lambda_{ij}}{\lambda_j} ca_{ij} + 1 - W_j \quad i, j = 1, 2, \dots, n \quad (4)$$

onde o tempo de permanência ( $W_j$ ) no subtrecho  $j$  é calculado como:

$$W_j = \frac{1}{1 + 4(1 + \rho_j)^2(V_j - 1)} \quad (5)$$

$$V_j = \frac{1}{\sum_{i=0}^n \left(\frac{\lambda_{ij}}{\lambda_j}\right)^2}$$

*Processo de Partidas* : O processo de partida depende da intensidade do tráfego do próximo nó para onde poderá ser encaminhada esta partida. Portanto, se no sistema em estudo, o subtrecho  $j$  estiver estável e não saturado ( $\rho < 1$ ) pode-se dizer que a taxa média da partida é igual a taxa média de chegada. Conseqüentemente, o tempo de partida é conhecido, quando a taxa de entrada é conhecida. Neste estudo será considerada a aproximação para  $cd_j$  proposta por Whitt(1995) :

$$cd_j = \rho_j^2 cs_j + (1 - \rho_j^2) ca_j \quad (6)$$

*Processo de Separação da Partida*: A taxa média de partida superposta e o coeficiente de variabilidade do intervalo de tempo entre as partidas superposto do subtrecho  $j$  são separados, produzindo as taxas médias  $\lambda_{ji}$ :

$$\lambda_{ji} = \lambda_j q_{ji} \quad (7)$$

e o coeficiente de variação do tempo entre partidas que é dado por:

$$cd_{ji} = q_{ji} cd_j + (1 - q_{ji}) \quad (8)$$

### Segundo Passo

No segundo passo, as medidas de desempenho de cada subtrecho serão avaliadas. Sendo assim, pode-se estimar o tempo de espera em fila nos pátios que antecedem cada subtrecho que será denotado por  $W_q$  e é um dos principais parâmetros para se avaliar a medida de congestionamento em cada subtrecho. Portanto, o tempo médio de espera nos pátios do subtrecho  $j$  é dado por:

$$E(W_{qj}) = \frac{\rho_j(ca_j + cs_j)g(\rho_j, ca_j, cs_j)}{2\mu_j(1 - \rho_j)} \quad (9)$$

onde  $g(\rho; ca_j; cs_j)$  é definido por:

$$g(\rho, ca_j, cs_j) = \begin{cases} \exp\left\{\frac{-2(1-\rho)(1-ca_j)}{3\rho(ca_j+cs_j)}\right\} & \text{se } ca_j < 1 \\ 1 & \text{se } ca_j \geq 1 \end{cases}$$

O número médio de trens na fila do subtrecho  $j$  pode ser avaliado por:

$$E(L_j) = \frac{\rho_j^2(ca_j + cs_j)g(\rho_j, ca_j, cs_j)}{2(1 - \rho_j)} + \frac{\lambda_j}{\mu_j} \quad (10)$$

### Terceiro Passo

Para completar a análise será necessário avaliar a medida de desempenho para toda a rede. Para isso, deve ser considerado o número  $E(V_j)$  de visitas de um trem em cada subtrecho. Como neste estudo, os trens entram no sistema somente pelos subtrechos 1 e  $n$  e devem visitar todos os subtrechos para completar a viagem, sendo que cada trem pode visitar cada subtrecho apenas uma vez. O número de visitas em cada subtrecho  $E(V_j)$  será considerado igual a 1. Outro fator importante, que se deve considerar para a análise final, seria o número médio  $E(L_j)$  de trens em todo sistema. Ele pode ser dado por:

$$E(L) = \sum_{j=1}^n E(L_j) \quad (11)$$

Finalmente, pode-se avaliar o tempo total médio  $E(T)$  que um trem percorreu o sistema, considerando o tempo de espera ( $EW_{qj}$ ) e o tempo de utilização de cada subtrecho  $E(S_j)$ , através de:

$$E(T) = \sum_{j=1}^n E(V_j)(EW_{qj}) + E(S_j) \quad (12)$$

## 4 ANÁLISE DE CADA MÉTODO

Os resultados computacionais foram adquiridos a partir de dados históricos referentes a tempo de viagem entre pátios de um trecho da Ferrovia Centro Atlântica (FCA). Este trecho não possui bifurcações e nele existem 13 pátios de cruzamento, sendo que cada pátio tem capacidade para apenas um trem.

### 4.1 Simulação Computacional

#### 4.1.1 Coleta de dados

Com base nos dados foram feitos os tratamentos estatísticos de modo a fornecer a melhor distribuição estatística que represente os tempos de atravessamento em cada um dos 13 trechos. As distribuições estatísticas foram obtidas por meio do *Input Analyser*, uma ferramenta do *software* Arena que converte os dados coletados em distribuições estatísticas.

#### 4.1.2. Descrição dos cenários

Em todos os cenários analisados, considerou-se que o número de trens que chegam no intervalo de tempo é igual a 1. Considerou-se para todos os cenários um período de simulação de 380 dias com 20 dias de aquecimento. A jornada de trabalho considerada é de 24 horas por dia.

Para o primeiro cenário, considerou-se que chega um trem a cada 60 minutos. Já para o segundo cenário, a chegada de um trem a cada 30 minutos, ou seja, chega-se 2 trens a cada uma hora. Em relação ao terceiro cenário, considerou-se a chegada de um trem a cada 45 minutos, ou seja, dois trens chegam a cada 1h e 30min. Para o quarto cenário, a chegada de um trem a cada 88 minutos. Já para o quinto cenário, um trem que chega a cada 102 minutos, ou seja, a cada 1h e 42 min. E, em relação ao último cenário, considerou-se a de um trem a cada 145 minutos, ou seja, a cada 2h e 25 min. Para todos os cenários, o intervalo de chegada de trens é o mesmo nos dois sentidos da linha férrea, tanto para o sentido exportação quanto para o importação.

### 4.1.3 Avaliação dos cenários

Os resultados computacionais foram adquiridos a partir de dados históricos referentes a tempos de viagem entre pátios de um trecho de uma malha ferroviária de uma empresa do setor de mineração, que também atua no setor ferroviário. Tal trecho não possui bifurcações e nele existem 13 pátios de cruzamento, sendo que cada pátio tem capacidade para apenas um trem.

Para cada cenário estudado, foram analisados o tempo médio e o tempo máximo de espera, ambos em minutos, o número máximo de trens na fila e o número total de viagens nos sentidos exportação e importação.

O cenário 2, apesar de apresentar o maior número de viagens do que os demais cenários é inviável, pois necessitaria de pátios com capacidade para, aproximadamente, sessenta trens.

O cenário 3 é o que apresenta a maior capacidade de utilização de um trecho singelo de uma malha ferroviária por apresentar o maior número de viagens em relação aos cenários restantes e, também, por apresentar um número máximo de trens na fila menor ou igual seis trens. O tempo médio de espera na fila variou de 6h e 29min à 6h e 33min no sentido exportação, e 6h e 42min à 6h e 32min no sentido importação.

Após a análise dos cenários com 13 subtrechos, identificou-se que o subtrecho quatro é o gargalo do sistema, sendo que este começa no sentido importação do subtrecho três e permanece por todo o subtrecho quatro, nos dois sentidos.

Em relação à inclusão de um novo subtrecho, pode-se observar que em relação ao número de viagens, tanto no sentido exportação quanto importação, não houve alterações significativas, mas em relação ao número máximo de trens na fila, houve uma melhora em alguns trechos, como pode ser visualizado na Tabela 1. Já em relação ao tempo máximo e ao tempo médio de espera na fila, ocorreram melhoras significativas em alguns trechos e em outros foram obtidos resultados não significativos. Tais fatos ocorreram em todos os cenários analisados.

**Tabela 1-** Análise dos cenários

Cenário	Sentido	Trecho com 13 subtrechos		
		Número total de viagens em um ano	Tempo médio de viagem (min)	Número máximo de trens na fila
1	Exp.	8640	372	4
	Imp.	8641	395	4
2	Exp.	17281	413	10
	Imp.	17282	428	60
3	Exp.	11522	389	5
	Imp.	11519	402	6
4	Exp.	5891	360	2
	Imp.	5891	366	2
5	Exp.	5081	341	2
	Imp.	5083	364	2
6	Exp.	3575	343	1
	Imp.	3575	364	1

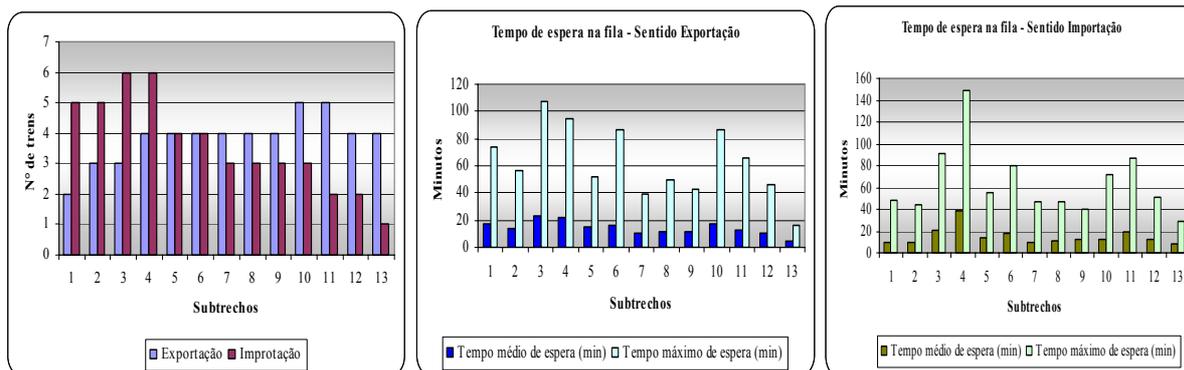


Figura 3: Número de trens na fila e tempo de espera na fila

## 4.2. Método Aproximado de Decomposição Paramétrica para Rede de Filas G/G/1

### 4.2.1 Avaliação dos cenários

Neste estudo, serão feitas três tipos de avaliações que variam entre si na maneira de como a capacidade do *buffer* é tratada. Para cada avaliação a taxa de chegada externa no sistema é calculada como a máxima possível segundo o tratamento da capacidade do *buffer*. Estas avaliações serão descritas a seguir:

**Avaliação 1** - Para esta análise, calcula-se a taxa externa de chegada no sistema para que a intensidade de tráfego em todos os subtrechos seja menor que 1. Ou seja, ignora-se a capacidade do *buffer*.

**Avaliação 2** - Na segunda avaliação, a capacidade do *buffer* é tratada de forma "otimista". Calcula-se a taxa externa de chegada, para que a soma do número total de trens na fila seja igual ao número de pátios.

**Avaliação 3** - Na terceira avaliação a capacidade do *buffer* é estritamente respeitada. Para essa análise é observado a que taxa de entrada o número médio de trens na fila ( $E(L)$ ) em cada subtrecho seja menor que 1.

Para cada avaliação testa-se a influência do scv na medidas de desempenho geradas. Para tal varia-se o  $ca_{0j}$  de 0,1 a 1 com incremento de 0,1. Os resultados do primeiro cenário são mostrados na Tabela 2. Observa-se na tabela o scv das taxas de chegadas no sistema, o tipo de avaliação, o tempo total de viagem em horas, a taxa de entrada no sistema e a quantidade diária de trens no sistema. Nos gráficos são avaliados o comportamento das filas e o tempo total de viagem para diferentes taxas de entrada no sistema.

Tabela 2: Resumo dos resultados encontrados considerando 13 subtrechos

$Ca_{0j}$	Tipo de Análise	Tempo Total de Viagem (h)	Taxa de Entrada	Qtde de trens por dia
0,1	1	10,09	0,68	32
0,1	2	8,45	0,58	28
0,1	3	7,63	0,41	19
1	1	15,00	0,68	32
1	2	10,32	0,58	28
1	3	8,24	0,41	19

## 5 CONCLUSÃO

Neste trabalho, procurou-se apresentar os resultados de uma investigação da aplicação de um modelo de rede de filas aberta e um modelo de simulação computacional, utilizando o software Arena, para estimar o tempo médio total de viagem num trecho singelo de malha ferroviária, contendo um certo número de pátios de cruzamento. Para entender melhor planejamento da capacidade de uma linha férrea, simulou-se este processo, utilizando os dados históricos referentes a tempos de viagem entre pátios de um trecho ferroviário da Ferrovia Centro Atlântica. Para estas avaliações considerou-se o número de viagens em um ano, número de trens na fila e o tempo de atravessamento total do trecho em estudo. Ambos os métodos mostraram alguns possíveis cenários e o comportamento do sistema em cada subtrecho inclusive que o trecho de maior gargalo, ou seja, o maior tempo de atravessamento é o subtrecho 4. Através destas avaliações, percebeu-se que a utilização dos métodos analisados traz ao analista informações mais seguras sobre o sistema e que as informações adquiridas contribuem para importantes decisões. O que diferencia os tipos de análise é que através do método de decomposição paramétrica de rede de filas aberta tem-se uma análise geral do problema e necessita-se de refinar as entradas, uma vez que estas são baseadas em tempos médios. Já o modelo de simulação computacional parte de dados, ou seja, são utilizados os dados obtidos no sistema real e a partir deles são obtidas as distribuições de probabilidade que regem cada atividade. A comparação dos resultados obtidos com as duas metodologias mostrou um passo no sentido de, em trabalhos futuros, utilizar os resultados atingidos com o modelo de simulação como entradas para o modelo de decomposição paramétrica.

## REFERÊNCIAS

- 1 ANDRADE, E. L. de. **Introdução à Pesquisa Operacional**. Rio de Janeiro: LTC Livros Técnicos e Científicos - Editora S.A., 2000.
- 2 ASADARHORN, N. E CHAO X. A decomposition approximation for assembly-disassembly queueing network with finite buffer and blocking, **Annals of Operations Research**, v 87, p 247-261, 1999.
- 3 BANKS, J., CARSON II, J. S. NELSON, B. L., NICOL, D. M. **Discrete-Event System Simulation**. New Jersey: Pearson Education International, 2001.
- 4 BERTAGLIA, P. R. **Logística e gerenciamento da cadeia de abastecimento**. São Paulo: Editora Saraiva, 2005.
- 5 BITRAN, G. R. E MORABITO, R. Open queueing networks: optimization and performance evaluation models for discrete manufacturing system, **Production and Operations Management**, v 5, p 163-193, 1996.
- 6 CORDEAU, J., TOTH, P., VIGO, D. A survey of optimization models for train routing and scheduling, **Transportation Science**, n 32, p 380-404, 1998.
- 7 GUIMARÃES, I. F. G. **Modelo de Rede de Filas para Avaliação de Desempenho em Trechos Singelos de Malhas Ferroviárias. Dissertação**, Departamento de Engenharia de Produção, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Brasil, 2005.
- 8 KIM, S. The heavy-traffic bottleneck phenomenon under splint and superposition, **European Journal of Operational Research**, n 157, p 736-745, 2004.
- 9 KRUEGER, H. Parametric modeling in rail capacity planning, **Winter Simulation Conference**, P.A. Farrington, II, p. 1194-1200, 1999.

- 10 KUEHN, J. Capacity is not the cause of railroad service, MultiModal Applied Systems, 1-6, .corridors, **Winter Simulation Conference**, P.A.Farrington, p. 1125-1133, 1999.
- 11 LAW, A. M. & KELTON, W. D. **Simulation modeling and analysis**. Singapore: McGraw-Hill, 1991.
- 12 MORABITO, R. (1998) - Análise de curvas de trade-off\_ baseada em teoria de rede de filas para o projeto e planejamento de sistemas discretos de manufatura", **Tese de Livre-Docência**, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de São Carlos, São Paulo, Brasil.
- 13 PEGDEN, C.D., SHANNON, R.E e SADOWSKI, R.P. **Introduction to Simulation Using SIMAN**. New York: McGraw-Hill, 1990.
- 14 PIDD, M. **Modelagem empresarial: ferramentas para a tomada de decisão**. Porto Alegre: Bookman, 1998.
- 15 PINTO, L.R. (1999). *Metodologia de Análise do Planejamento de Lavra de Minas a Céu Aberto Baseada em Simulação das Operações de Lavra*, **Tese de Doutorado**, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil
- 16 SOARES, L. F. G. **Modelagem e Simulação Discreta de Sistemas**. Rio de Janeiro: Campus, 1992.
- 17 WHITT, W. Variability functions for parametric-decomposition approximations of queueing networks, **Management Science**, n 41, p. 1704-1715, 1995.