

COMPARAÇÃO ENTRE O MODELO DE REDE DE FILAS E O MODELO DE SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL PARA ANÁLISE DE CAPACIDADE DE MALHAS FERROVIÁRIAS EM TRECHOS SINGELOS

Irce Fernandes Gomes Guimarães¹

Lásara Fabrícia Rodrigues²

Fabiano Mezadre Pompermayer³

Maurício Cardoso de Souza⁴

Resumo

O presente trabalho propõe uma comparação entre dois métodos: a modelagem de redes de filas e a simulação computacional utilizadas para estimar medidas de desempenho, 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 determinar a capacidade de malha ferroviária, dado um nível de serviço, e também mostrar as especificidades de cada um dos métodos. Para as referidas análises foi modelado um 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. Esses modelos podem ser usados para estimar o impacto no tempo de viagem de trens em trechos congestionados. São apresentados, para os dois métodos, resultados numéricos em trechos singelos de malha da Ferrovia Centro-Atlântico, bem como uma comparação entre os dois métodos.

Palavras-chave: Simulação computacional; Desempenho.

A COMPARISON BETWEEN A LINE NETWORK MODEL AND A SIMULATION MODEL IN SINGLE STRETCHES OF RAILROAD LINE

Abstract

The present work proposes a comparison among two methodologies: a line network model and a simulation model. These two approaches aims to measure the performance of, for example, the average total trip time for a given train route. It is assumed that there is no tracks changes involved and where it passes through several railroad crossings. The objective of this comparison is to present two performance analysis tools to determine the railroad line capacity for a given level of service. 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 Centro Atlântica, as well as a comparison among the two methods.

Key words: Simulation; Performance.

1 INTRODUÇÃO

A utilização do modal ferroviário começou a perder espaço para o modal rodoviário a partir da década de 1950, com a ampliação da malha rodoviária brasileira. De acordo com Bertaglia,⁽¹⁾ a indústria ferroviária não tem recebido, nos últimos anos, inovações

tecnológicas na mesma velocidade que a indústria aeronáutica 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.

¹Engenheira de Produção, MC, Professora Assistente – UFOP: Universidade Federal de Ouro Preto, Escola de Minas- DEPRO, Campus Universitário S/N, Bauxita – 35400-000 - Ouro Preto, MG, Brasil. irce@em.ufop.br

²Engenheira de Produção, MC, Professora Assistente - CEFET-OP Centro Federal de Educação Tecnológica de Ouro Preto, UNED Congonhas, Rua Michael Pereira de Souza, 3007 Campinho – 36415-000 - Congonhas, MG, Brasil. lasara@cefetop.edu.br

³Engenheiro Master - CVRD, Dr. Engenharia de Produção. Companhia Vale do Rio Doce, Diretoria Executiva de Logística. Rua Sapucaí, 383 - 7 andar Floresta 30200-900 - Belo Horizonte, MG Belo Horizonte, MG, Brasil. fabiano.pompermayer@cvrd.com.br

⁴Engenheiro de Produção. Dr. em Informática, Professor Adjunto. Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia, Departamento de Engenharia de Produção. Rua Espírito Santo, 35/306, Centro – 30160-030 – Belo Horizonte, MG, Brasil. mauricio@dep.ufmg.com.br

Portanto, o gerenciamento eficaz e a utilização dos bens e recursos 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 a 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 e do 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 têm-se verificado alguns avanços neste tipo de serviço.

Segundo Guimarães,⁽²⁾ a capacidade de tráfego de trens em uma malha ferroviária, muitas vezes é analisada com base na capacidade teórica, no número máximo de trens que podem percorrer um determinado trecho, e com base na capacidade prática, que 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. Atualmente, alguns modelos apresentam boas soluções para este tipo de problema. Exemplos podem ser encontrados no estudo de Kuehn,⁽³⁾ Cordeau, Toth e Vigo⁽⁴⁾ e em Krueger.⁽⁵⁾ Porém, existem algumas técnicas que permitem uma melhor visualização do problema.

Uma dessas técnicas é a simulação. Para Banks et al.,⁽⁶⁾ a simulação é uma representação de um processo do mundo real. Ela envolve a geração de um sistema artificial e, pela 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 por intermédio da Rede de Filas. Esse método é mostrado por Guimarães⁽²⁾ e podem-se citar como exemplos aplicações em trabalhos apresentados por Asadarhorn e Chao,⁽⁷⁾ Bitran e Morabito,⁽⁸⁾ e Kim.⁽⁹⁾

Este estudo propõe uma comparação entre dois métodos utilizados para analisar o problema de capacidade de linha férrea: a simulação computacional e o modelo paramétrico 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 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 só poderão atravessá-lo se a capacidade estiver abaixo da permitida. Ao entrar no sistema, os trens podem percorrer cada subtrecho ou aguardar nos pátios de espera, existentes em cada subtrecho.

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. Admite-se que os subtrechos estão em condições de serem atravessados sem que haja interrupções. 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 a travessia de um trem em um subtrecho, este não poderá ser interrompido nem cancelado. A disciplina de atendimento será por ordem de chegada (FIFO). O trem completa o processo de serviço em um subtrecho, quando termina de atravessá-lo. 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.⁽²⁾

3 SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL

É uma ferramenta utilizada para analisar o desempenho de sistemas e o comportamento futuro de variáveis relevantes. Segundo Pedgen, Shannon e Sadowski,⁽¹⁰⁾ 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.

Pinto⁽¹¹⁾ descreve que uma das vantagens da simulação é a possibilidade de controlar a velocidade com que as alterações no estado do modelo acontecem. A essência da simulação é que trocas de estado do sistema são modeladas pelo tempo.

Segundo Andrade,⁽¹²⁾ um trabalho de simulação pode ser desenvolvido segundo as etapas apresentadas na Figura 2.

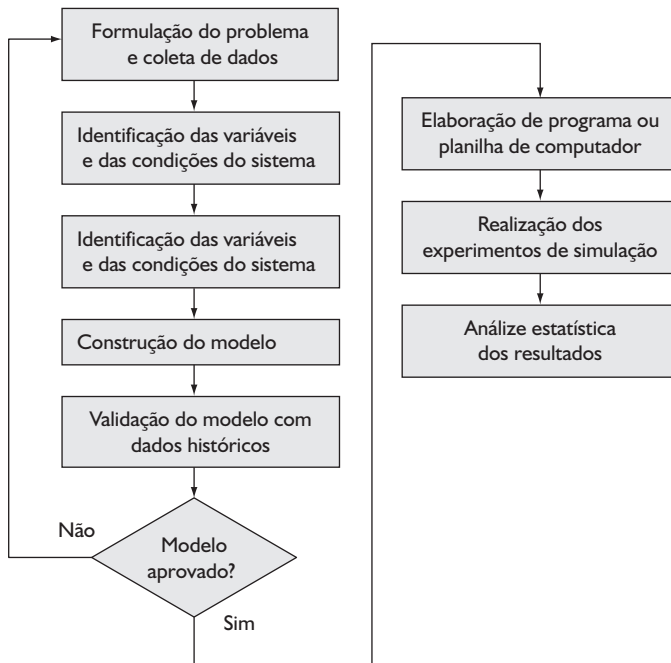


Figura 2. Etapas de um sistema de simulação.⁽¹³⁾

4 MÉTODO APROXIMADO DE DECOMPOSIÇÃO PARAMÉTRICA PARA REDE DE FILAS G/G/I

Para o referido método, os processos de chegada e serviços são descritos por poucos parâmetros: as médias e scv (a variância dividida pelo quadrado da média). No caso de uma ferrovia, os subtrechos são tratados como estocasticamente independentes e analisados separadamente como um sistema de fila G/G/I. O método de decomposição paramétrico pode ser descrito em três passos:

4.1 Primeiro Passo

Determinam-se os fluxos internos de chegada em cada estação. Pretende-se calcular para cada subtrecho dois parâmetros: a taxa média de chegada (λ_j) e o scv ou parâmetro de variabilidade do intervalo de tempo entre chegadas (ca_j). As equações de variabilidade do tráfego combinam três etapas:

4.1.1 Superposição de chegadas

Para cada subtrecho, os fluxos de chegadas de trens e o parâmetro de variabilidade do intervalo de tempo entre chegadas são combinados (scv). Efetivamente a taxa média de chegadas de trens em cada subtrecho de um sistema ferroviário é 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 é descrito pelos fluxos dos trens, sendo estes representados pela matriz de transição $Q = q_{ij}$, onde $i = 1, \dots, n$ e $j = 1, \dots, n$. Observe que o acesso externo ao sistema acontece apenas pelos subtrechos 1 e n . Portanto, as taxas de chegada externa nos outros subtrechos são iguais a zero ($\lambda_{0j} = 0$, onde $j = 2, \dots, n-1$).

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

Dada a taxa de chegada é possível obter a intensidade do tráfego (ρ_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 por meio deste método. Por outro lado, se $\rho_j < 1$ o sistema é 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:

$$W_j = \frac{1}{1 + 4(1 + \rho_j)^2 (V_j - 1)} \quad V_j = \frac{1}{\sum_{i=0}^n \left(\frac{\lambda_{ij}}{\lambda_j} \right)^2} \quad (5)$$

4.1.2 Processo de partidas

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 ($\rho < 1$) considera-se que a taxa média de partida é igual à taxa média de chegada. Logo, o tempo de partida é conhecido quando a taxa de entrada é conhecida. Neste estudo, é utilizada a aproximação para cd_j proposta por Whitt:⁽¹⁴⁾

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

4.1.3 Processo de separação da partida

A taxa média de partida superposta e o coeficiente de variabilidade do intervalo de tempo entre as partidas superpostas do subtrecho j são separados, produzindo as taxas médias λ_{ji} :

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

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

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

4.2 Segundo Passo

Estima-se o tempo de espera em fila nos pátios que antecede cada subtrecho que é denotado por W_{qj} . 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:

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

4.3 Terceiro Passo

Os trens entram no sistema somente pelos subtrechos 1 e n e devem visitar todos os subtrechos para completar a viagem. Cada trem pode visitar cada subtrecho apenas uma vez. Logo, o número de visitas em cada subtrecho $E(V_j)$ é igual a 1. Além disso, deve-se considerar, para a análise final, o número médio $E(L_j)$ de trens em todo sistema, e que 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 $E(S_j)$, por meio de:

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

5 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.

5.1 Simulação Computacional

Com base nos dados foram feitos os tratamentos estatísticos de modo a fornecer a distribuição que melhor represente os tempos de travessia em cada um dos 13 trechos. As distribuições estatísticas foram obtidas por meio do *Input Analyser*, uma ferramenta do *software* ARENA 5.0, que converte os dados coletados em distribuições estatísticas.

Nos cenários analisados considera-se que o número de trens que chega no intervalo de tempo é igual a 1, que o período de simulação é de 380 dias com 20 dias de aquecimento e que a jornada de trabalho é de 24 horas por dia.

Para o primeiro cenário, considera-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, chegam 2 trens a cada uma hora. Em relação ao terceiro cenário, considera-se a chegada de um trem a cada 45 minutos, ou seja, dois trens chegam a cada 1 hora e 30min. Para o quarto cenário, a chegada de 1 trem a cada 88 minutos.

Já para o quinto cenário, 1 trem chega a cada 102 minutos, ou seja, a cada 1h e 42 min. E, em relação ao último cenário, considera-se a chegada 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.

Para cada cenário estudado, são 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 maior número de viagens do que os demais cenários é inviável, pois necessita de pátios com capacidade para, aproximadamente, 66 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 varia de 6h e 29 min a 6h e 33 min no sentido exportação, e 6h e 42 min a 6h e 32 min no sentido importação.

Após a análise dos cenários com 13 subtrechos, identifica-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 há 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. 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 ocorrem em todos os cenários analisados.

Tabela 1. Análise dos cenários.⁽¹³⁾

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

5.2 Método Aproximado de Decomposição Paramétrica para Rede de Filas G/G/1

Neste estudo são feitos três tipos de avaliações. Para cada uma, a taxa de chegada externa no sistema é calculada como a máxima possível, segundo o tratamento da capacidade do *buffer*. Estas avaliações são descritas a seguir:

Avaliação 1 – 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 – Trata-se de forma “otimista” a capacidade do *buffer* é. 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 – Respeita-se estritamente a capacidade do *buffer*. Para essa análise observa-se a que taxa de entrada o número médio de trens na fila ($E(L)$), em cada subtrecho, é menor que 1.

Para cada avaliação testa-se a influência do sc_y nas medidas de desempenho geradas. Para tal varia-se o ca_{0j} de 0,1 a 1 com incremento de 0,1. Observa-se na Tabela 2 os resultados do primeiro cenário. O sc_y das taxas de chegadas no sistema, o tipo de análise, o tempo total de viagem em horas, a taxa de entrada no sistema e a quantidade diária de trens no sistema.

Tabela 2. Resumo dos resultados encontrados considerando 13 subtrechos.⁽²⁾

Ca_{0j}	Tipo de análise	Tempo total de viagem (h)	Taxa de entrada	Quantidade 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

6 CONCLUSÃO

Neste trabalho, apresentam-se 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 5.0, 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, simula-se este processo, utilizando os dados históricos referentes a tempos de viagem entre pátios de um trecho ferroviário da Ferrovia Centro Atlântica.

Para essas avaliações considera-se o número de viagens em um ano, número de trens na fila e o tempo de travessia total do trecho em estudo. Ambos os métodos mostram 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. Por meio destas avaliações, percebe-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, pelo 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 oferece um passo no sentido que, em trabalhos futuros, utilizar os resultados atingidos com o modelo de simulação como entradas para o modelo de decomposição paramétrica.

REFERÊNCIAS

- 1 BERTAGLIA, P.R. **Logística e gerenciamento da cadeia de abastecimento**. São Paulo: Saraiva, 2005.
- 2 GUIMARÃES, I.F.G. **Modelo de rede de filas para avaliação de desempenho em trechos singelos de malhas ferroviárias**. 2005. 76 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2005.
- 3 KUEHN, J. **Capacity is not the cause of railroad service**. Princeton, NJ: MultiModal Applied Systems, 1999. p. 1-6.
- 4 CORDEAU, J.; TOTH, P.; VIGO, D. A survey of optimization models for train routing and scheduling. **Transportation Science**, v. 32, p 380-404, Apr. 1998.
- 5 KRUEGER, H. Parametric modeling in rail capacity planning. In: WINTER SIMULATION CONFERENCE, Winter, Phoenix, AZ, 1999. **Proceedings...** New York: ACM, 1999. v.2., p. 1194-200.
- 6 BANKS, J.; CARSON II, J.S.; NELSON, B.L.; NICOL, D.M. **Discrete-event system simulation**. New Jersey: Pearson Education International, 2001.
- 7 ASADARHORN, N.; CHAO X. A decomposition for assembly-disassembly queueing network with finite buffer and blocking. **Annals of Operations Research**, v. 87, p. 247-61, Apr. 1999.
- 8 BITRAN, G.R.; MORABITO, R. Open queueing networks: optimization and performance evaluation models for discrete manufacturing system. **Production and Operations Management**, v. 5, n. 2, p. 163-93, 1996.
- 9 KIM, S. The heavy-traffic bottleneck phenomenon under splint and superposition. **European Journal of Operational Research**, v. 157, n. 3, p. 736-45, Sep. 2004.
- 10 PEGDEN, C.D.; SHANNON, R.E.; SADOWSKI, R.P. **Introduction to simulation using SIMAN**. New York: McGraw-Hill, 1990.
- 11 PINTO, L.R. **Metodologia de análise do planejamento de lavra de minas a céu aberto baseada em simulação das operações de lavra**. 1999. 190 p. Tese (Doutorado em Engenharia de Produção) – COPPE/UFRJ Universidade Federal do Rio de Janeiro, 1999.
- 12 ANDRADE, E. L. **Introdução à pesquisa operacional**. Rio de Janeiro: LTC, 2000.
- 13 CAMPOS, K.C.F.; GUIMARÃES, I.F.G. ; MARTINS, A.X. Simulação em um trecho singelo de uma malha ferroviária utilizando o software Arena. In: CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, 26, 2006, Fortaleza. Rio de Janeiro: Abepro, 2006. p. 1-8.
- 14 WHITT, W. Variability functions for parametric-decomposition approximations of queueing networks. **Management Science**, v. 10, n. 41, p. 1704-15, Oct. 1995.

Recebido em: 07/12/07

Aceito em: 05/12/08

Proveniente de: SEMINÁRIO DE LOGÍSTICA, 26., 2007, Vitória, ES. São Paulo: ABM, 2007.