

ESTUDO COMPARATIVO DE APROXIMAÇÕES PARA REDES DE FILAS DE MANUFATURA UTILIZANDO PLANEJAMENTO DE EXPERIMENTOS

José Eduardo Vieira Camorim^a, Reinaldo Morabito^{a*}, Maria Isabel Rodrigues^b

^a*Universidade Federal de São Carlos – UFSCar, São Carlos – SP, Brasil*

^b*Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP, Campinas – SP, Brasil*

Resumo

Neste estudo comparamos seis aproximações, baseadas em métodos de decomposição paramétricos, para analisar modelos de redes de filas abertas representando sistemas discretos de manufatura, tais como job-shops. Estas aproximações podem ser utilizadas para estimar importantes medidas de desempenho destes sistemas, tais como níveis médios de estoques em processo e leadtimes de produção dos produtos. Elas também podem ser utilizadas em modelos de otimização para apoiar decisões de projeto, planejamento e operação destes sistemas, tais como alocação de capacidade nas estações de trabalho da rede. A motivação para este estudo é a ausência de trabalhos na literatura que comparam estas aproximações de maneira mais abrangente e aprofundada. Diversas configurações de redes de filas de manufatura foram aqui exploradas para identificar quais aproximações são mais adequadas para analisar quais configurações, utilizando-se para isso a teoria de planejamento de experimentos. Os resultados mostraram que duas das seis aproximações estudadas são, em geral, mais efetivas para avaliação de desempenho dos sistemas analisados. As outras aproximações demonstraram certo comportamento em sobreestimar os estoques em processo (e os leadtimes de produção) quando o número de estações da rede aumenta. Estes resultados motivam o desenvolvimento de ferramentas computacionais baseadas nas aproximações dos métodos de decomposição paramétricos.

Palavras-chave: redes de filas abertas, modelos de avaliação de desempenho, métodos de decomposição paramétricos, sistemas discretos de manufatura, job-shop, planejamento de experimentos.

Abstract

In this study we compare six approximations based on parametric decomposition methods to analyze open queueing networks representing discrete manufacturing systems, like job-shops. These approximations can be used to evaluate important system performance measures, such as work-in-process and production leadtimes. They can also be used in optimization models to support design, planning and operations decisions of these systems, like capacity allocation to the network workstations. The motivation for this work is the absence of studies in the literature which compare these approximations in a broad and detailed manner. Different configurations of manufacturing queueing networks are explored to identify which approximations are more appropriate for the analysis of each configuration using the theory of design of experiments. The results show that two out of the six approximations are in general more effective for the performance evaluation of the systems analyzed. The other approximations tend to overestimate the work-in-process (and the production leadtimes) when the number of network workstations increases. These results encourage the development of computational tools for queueing network performance evaluation based on parametric decomposition methods.

Keywords: open queueing networks, performance evaluation models, parametric decomposition methods, discrete manufacturing systems, job-shop, design of experiments.

*Autor para correspondência: e-mail: morabito@ufscar.br

1. Introdução

Sistemas de manufatura consistem basicamente de máquinas e estações de trabalho, em que operações são realizadas sobre partes, itens, submontagens e montagens, para criar produtos que serão distribuídos para clientes. Grande parte dos produtos que consumimos é produzida em sistemas discretos de manufatura, onde os itens são processados individualmente ou em lotes. Um exemplo de sistema discreto é o sistema *job-shop*, que opera com grande diversidade de produtos ou *jobs*, porém em pequenos lotes. O resultado, em geral, é a existência de fluxos complexos de *jobs* ao longo dos *shops* (estações), e longas filas de espera na frente das máquinas. Tais sistemas podem ser freqüentemente representados por modelos de redes de filas, onde os nós correspondem às estações de trabalho e os arcos ligando os nós, aos fluxos de *jobs* entre as estações.

Redes de filas (de manufatura) são em geral difíceis de serem geridas por processarem diversos produtos que têm características diferentes, que partilham os mesmos recursos, e que são afetados por um conjunto de fontes de incerteza, tais como variabilidade nas demandas dos produtos, confiabilidade de fornecedores e variabilidade nos processos de produção. As redes de filas são comumente classificadas como redes de Jackson, aquelas cujos processos de chegadas externas de produtos são Poisson e os tempos de serviço em cada estação têm distribuição exponencial, e as redes genéricas, aquelas cujos processos de chegadas externas não necessariamente são Poisson e/ou os de serviço não necessariamente são exponenciais, ou seja, são descritos por distribuições de probabilidade genéricas. As redes de filas ainda podem ser abertas (número de produtos circulando na rede pode variar a cada instante) ou fechadas (número de produtos na rede é constante), sendo as abertas o foco deste estudo.

Métodos de avaliação de desempenho de redes de filas abertas descrevem o comportamento do sistema sob uma dada configuração, por meio da avaliação de medidas

de desempenho da sua operação. Exemplos de medidas de desempenho são: média e variância do número de *jobs* no sistema e em cada estação (i.e., estoques em processo), média e variância do *leadtime* de produção de produtos no sistema e em cada estação, taxa média de produção do sistema, nível médio de utilização do sistema, entre outros. Métodos exatos de avaliação de desempenho existem somente para redes de Jackson, mas a representação de sistemas de manufatura como redes de Jackson, em geral, superestima a variabilidade dos processos de serviço (e.g., Bitran e Tirupati, 1988; Jiang e Giachetti, 2008; Silva e Morabito, 2007a, 2009). Portanto, métodos aproximados são em geral utilizados para estimar o desempenho de redes mais genéricas, particularmente os sistemas discretos de manufatura do tipo *job-shop*.

Existe uma ampla literatura sobre sistemas discretos de manufatura, representação destes sistemas por meio de redes de filas, e métodos para avaliar medidas de desempenho destas redes (e.g., Krajewski e Ritzman, 1990; Chase e Aquilano, 1992; Askin e Strandridge, 1993; Buzacott e Shanthikumar, 1993; Gershwin, 1994; Nahmias, 1995; Morabito, 1998; Nakano e Ohno, 1999; Warsing et al., 2001; Kerbache e Smith, 2004; Cruz et al., 2010; Morabito e Souza, 2010; Smith et al., 2010; Liu et al., 2011; Koo et al., 2011; Ishfaq e Sox, 2012; Wu e McGinnis, 2012, 2013; Morabito et al., 2014 e as referências neles contidas). Neste trabalho são estudadas aproximações baseadas nos métodos analíticos de decomposição de redes de filas, que usam como parâmetros a média e o coeficiente quadrático de variação para caracterizar os processos de chegada e de serviço (processamento) dos usuários na rede. As precisões destas aproximações são comparadas em diversas situações (por meio de experimentos computacionais), para identificar quais aproximações são mais adequadas para analisar quais situações.

Em outras palavras, os objetivos deste estudo são: (i) realizar uma comparação computacional abrangente e efetiva entre estas aproximações analíticas (a simulação

discreta é utilizada como referência para a comparação da qualidade dos resultados gerados pelas aproximações analíticas); (ii) identificar as aproximações mais apropriadas para cada situação. Por exemplo, para uma determinada configuração de uma rede (número e *mix* de produtos, capacidade e nível de utilização das estações, variabilidades nos processos de chegadas e processamento dos produtos nas estações, etc.), determinar as aproximações mais adequadas para descrever a rede. Estes objetivos vêm de encontro às perspectivas para pesquisa futura propostas em Bitran e Morabito (1996, 1999), Kouvelis et al. (2005) e Silva e Morabito (2007b, 2009).

Para proceder com as comparações, é utilizada a técnica de análise e planejamento de experimentos (e.g., Cox, 1992; Myers e Montgomery, 1995; Wu e Hamada, 2000; Montgomery, 2001; Rodrigues e Iemma, 2005). Foi adotado um planejamento fatorial, mais precisamente, utilizou-se um delineamento composto central rotacional (DCCR) do tipo 2^4 com 1 ponto central e 8 pontos axiais, pois gera uma razoável qualidade de informações para situações em que se deseja determinar os efeitos nas variáveis existentes e uma possível otimização do processo. Experimentos com DCCR foram realizados para estudar o efeito de algumas variáveis nas aproximações de redes de filas. Também foi utilizado um delineamento de Plackett & Burman (PB) em razão da sua capacidade em lidar com um número bem maior de variáveis (Plackett e Burman, 1946; Rodrigues e Iemma, 2005; Ledolter e Swersey, 2007), para analisar casos em que as variáveis de controle são bem mais numerosas porque variam para cada classe (ou família) de produtos na rede e para cada estação da rede, conforme é discutido adiante.

Este artigo está organizado como segue: na seção 2 discutem-se brevemente métodos de avaliação de desempenho comumente utilizados em redes de filas abertas. O foco é nos métodos de decomposição paramétricos para avaliar sistemas *job-shops*, mas o estudo também poderia ser estendido para outros sistemas discretos de manufatura. Na

seção 3 discute-se o planejamento de experimentos utilizado (*DOE - design of experiments*), importante para atingir os objetivos deste artigo. Na seção 4 são apresentados e analisados os resultados computacionais obtidos inicialmente para redes menores, com 2 e 5 estações (envolvendo de 1 a 13 classes de produtos), e depois para redes maiores, com 13 estações, baseadas na rede de uma fábrica de semicondutores estudada em Bitran e Tirupati (1988) e Bitran e Morabito (1995a, 1999). Por fim, na seção 5 são apresentadas as conclusões deste estudo e as perspectivas para futuros trabalhos.

2. Métodos de Avaliação de Desempenho

Métodos de avaliação de desempenho de redes de filas podem ser classificados em: métodos exatos; métodos aproximados; simulação e técnicas relacionadas (Bitran e Tirupati, 1988; Suri et al., 1993; Govil e Fu, 1999). Vários trabalhos em literatura abordaram aproximações para avaliar o desempenho de redes de filas abertas e utilizaram o método de decomposição paramétrico, dentre os quais, pode-se citar: Shanthikumar e Buzacott (1981), Whitt (1983a, 1983b), Bitran e Tirupati (1988), Segal e Whitt (1989), Kouvelis e Tirupati (1991), Buzacott e Shanthikumar (1993), Suri et al (1993), Bitran e Sarkar (1994), Bitran e Morabito (1995a, 1996), Morabito (1998), Nakano e Ohno (1999), Shanthikumar e Xu (2000), Warsing et al. (2001), Souza et al. (2001, 2002), Souza e Ketzenberg (2002), Chao et al. (2003), Ketzenberg et al. (2003), Kerbache e Smith (2004), Jeong et al. (2008), Jiang e Giachetti (2008) e Morabito et al. (2014). Neste artigo são estudadas aproximações geradas pelo método de decomposição paramétrico, cujo objetivo é estender para redes mais gerais o resultado obtido para as redes de Jackson: cada nó da rede pode ser tratado como se fosse estocasticamente independente e, desta maneira, a análise de medidas de congestão da rede é simplificada.

PESQUISA OPERACIONAL PARA O DESENVOLVIMENTO

Basicamente, o método de decomposição paramétrico aproxima os processos de chegada de produtos por processos de renovação, decompõe a rede em estações individuais e as considera como se fossem estocasticamente independentes. Conforme mencionado anteriormente, o método usa apenas dois parâmetros para caracterizar cada processo de chegada e cada processo de serviço em cada estação da rede, um para descrever a taxa média e o outro para descrever a variabilidade. As medidas de congestionamento de cada estação são então descritas por fórmulas aproximadas que dependem somente destes parâmetros. O método envolve três passos essenciais (Shanthikumar e Buzacott, 1981; Whitt, 1983a, 1983b; Govil e Fu, 1999; Silva e Morabito, 2007a, 2009):

Passo 1- Análise das interações entre as estações da rede de filas.

Passo 2- Decomposição da rede de filas em subsistemas com uma única estação, e avaliação das medidas de desempenho de cada estação.

Passo 3- Recomposição dos resultados obtidos pelas estações decompostas com avaliação das medidas de desempenho da rede.

O Passo 1 é o mais importante e envolve três processos básicos para analisar a interação entre as estações: (i) Superposição das chegadas: representa a chegada agregada de produtos em uma estação, combinação dos fluxos individuais de chegadas de outras estações. (ii) Partidas: é o resultado da combinação deste processo de chegada agregada com o processo de serviço. (iii) Separação ou decomposição das partidas: decompõe o processo de partida agregada dos produtos nos fluxos individuais de partidas para outras estações. Por meio da solução de sistemas lineares derivados destes três processos básicos, o Passo 1 produz os seguintes parâmetros para aproximar os processos de chegada e de serviço em cada estação j da rede: a média $E(a_j)$ (ou taxa de chegadas de produtos $\lambda_j = 1/E(a_j)$) e o coeficiente quadrático de variação ca_j dos intervalos de tempo entre chegadas de produtos, a_j , e a média $E(s_j)$ (ou taxa de serviço de produtos $\mu_j = 1/E(s_j)$) e o coeficiente quadrático

de variação cs_j dos tempos de serviço em cada estação j da rede, s_j , respectivamente (o coeficiente quadrático de variação de uma variável aleatória x é definido pela razão entre a variância de x e o quadrado do valor esperado de x , $cx = V(x)/E(x)^2$). Whitt (1983a), Bitran e Tirupati (1988) e outros autores afirmam que estes dois parâmetros são suficientes para descrever redes de filas genéricas com precisão usualmente aceitável para as decisões tomadas na prática.

A Tabela 1 apresenta seis diferentes sistemas lineares nas variáveis ca_j que podem ser alternativamente utilizados no Passo 1 do método de decomposição, e que foram estudados e comparados no presente trabalho (a descrição da notação utilizada em cada sistema linear está resumidamente descrita logo abaixo da tabela). Estas seis aproximações (Aprox 1, Aprox 2, ..., Aprox 6) foram propostas em Whitt (1983a) (Aprox 1 e 4), Bitran e Tirupati (1988) (Aprox 2 e 5) e Segal e Whitt (1989) (Aprox 3 e 6), e referem-se a sistemas de redes de filas $GI/G/m$ e múltiplas classes de produtos com roteiros de fabricação determinísticos (i.e., a seqüência de nós visitados pelas classes de produtos é definida *a priori*). Estas aproximações combinam variações de dois métodos básicos: o método assintótico e o método dos intervalos estacionários. Estes métodos são também chamados macro e micro, respectivamente, devido à visão macroscópica e microscópica no processo de chegadas (Whitt, 1982, 1983a).

O método assintótico, numa tentativa de levar em conta a dependência entre os intervalos de tempo entre chegadas sucessivas, toma uma visão macroscópica do processo de chegada e tenta descrever seu comportamento num intervalo de tempo relativamente longo. O método dos intervalos estacionários, ao contrário, ignora qualquer dependência no processo de chegada, e toma uma visão microscópica para descrever o comportamento do processo num intervalo de tempo relativamente pequeno. Pode ser mostrado (Whitt, 1982,

1995) que o método assintótico (macro) é assintoticamente correto com a utilização média da estação j tendendo a 100% da sua capacidade (i.e., com intensidade de tráfego pesado: $\rho_j \rightarrow 1$), e o método dos intervalos estacionários (micro) é assintoticamente correto com o número de processos de chegada na estação j tendendo a infinito, quando a superposição destes processos tende ao processo de Poisson.

Conforme mencionado, as aproximações Aprox 1, Aprox 2, ..., Aprox 6 da Tabela 1 referem-se a diferentes adaptações e combinações desses dois métodos básicos, propostas nos trabalhos referidos anteriormente e utilizadas em vários estudos posteriores na literatura. Por exemplo, as estimativas de ca_j nas aproximações Aprox 1, Aprox 2 e Aprox 3 baseiam-se apenas no método assintótico, enquanto que nas aproximações Aprox 4, Aprox 5 e Aprox 6, baseiam-se na combinação convexa dos valores obtidos pelos métodos assintótico e dos intervalos estacionários (este último aproximado por um processo de Poisson). Além disso, nas aproximações Aprox 1 e Aprox 4, as estimativas para o coeficiente quadrático de variação do intervalo de tempo entre partidas da estação j para a estação i , cd_{ji} , consideram a agregação de todas as classes de produtos da estação j numa única classe (classe agregada), enquanto que as aproximações Aprox 2 e Aprox 5 consideram explicitamente o efeito de interferência entre cada classe k em cada operação l na estação j , por meio da análise de duas classes: a classe de interesse k na operação l e a agregação de todas as demais classes que chegam entre duas chegadas sucessivas da classe de interesse (k,l) . E as aproximações Aprox 3 e Aprox 6 exploram uma expressão alternativa para estimar cd_{ji} , baseada na média entre os coeficientes quadráticos de variação dos intervalos de tempo entre chegadas externas das classes de produtos na estação j , ponderada pelo número médio de visitas de cada classe na estação j , definida por ce_j conforme Tabela 1.

PESQUISA OPERACIONAL PARA O DESENVOLVIMENTO

Os Passos 2 e 3 do método de decomposição paramétrico utilizam fórmulas em função dos parâmetros do Passo 1 para estimar medidas de desempenho para cada estação e a rede como um todo, por exemplo, para o número médio de *jobs* em cada estação *j* da rede, $E(L_j)$, cuja expressão é função de ca_j , cs_j e ρ_j . O número médio de *jobs* na rede é então obtido por $E(L) = \sum_{j=1}^n E(L_j)$. Para mais detalhes de como estas aproximações são derivadas e definidas, o leitor pode consultar Whitt (1983a), Bitran e Tirupati (1988), Segal e Whitt (1989), Bitran e Morabito (1995a, 1995b, 1996), Morabito (1998), Silva (2005), Camorim (2008) e as referências neles citadas.

Tabela 1. Seis aproximações alternativas para o Passo 1 do método de decomposição

Aprox 1	Aprox 4
$ca_j = \sum_{i=0}^n \frac{\lambda_{ij}}{\lambda_j} ca_{ij}$	$ca_j = w_j \sum_{i=0}^n \frac{\lambda_{ij}}{\lambda_j} ca_{ij} + 1 - w_j$
$cd_j = 1 + (1 - \rho_j^2)(ca_j - 1) + \frac{\rho_j^2}{\sqrt{m_j}} (\max\{cs_j, 0, 2\} - 1)$	$cd_j = 1 + (1 - \rho_j^2)(ca_j - 1) + \frac{\rho_j^2}{\sqrt{m_j}} (\max\{cs_j, 0, 2\} - 1)$
$cd_{ji} = q_{ji} cd_j + (1 - q_{ji})$	$cd_{ji} = q_{ji} cd_j + (1 - q_{ji})$
Aprox 2	Aprox 5
$ca_j = \sum_{i=0}^n \frac{\lambda_{ij}}{\lambda_j} ca_{ij}$	$ca_j = w_j \sum_{k=1}^r \sum_{l=1}^{n_k} \frac{\lambda'_k}{\lambda_j} ca_{kl} 1\{n_{kl} = j\} + 1 - w_j$
$cd_j = 1 + (1 - \rho_j^2)(ca_j - 1) + \frac{\rho_j^2}{\sqrt{m_j}} (\max\{cs_j, 0, 2\} - 1)$	$cd_j = 1 + (1 - \rho_j^2)(ca_j - 1) + \frac{\rho_j^2}{\sqrt{m_j}} (\max\{cs_j, 0, 2\} - 1)$
$cd_{kl} = q_{kl} cd_{n_{kl}} + (1 - q_{kl}) q_{kl} + (1 - q_{kl})^2 ca_{kl}$	$cd_{kl} = q_{kl} cd_{n_{kl}} + (1 - q_{kl}) q_{kl} + (1 - q_{kl})^2 ca_{kl}$
Aprox 3	Aprox 6
$ca_j = \sum_{i=0}^n \frac{\lambda_{ij}}{\lambda_j} ca_{ij}$	$ca_j = w_j \sum_{i=0}^n \frac{\lambda_{ij}}{\lambda_j} ca_{ij} + 1 - w_j$
$cd_j = 1 + (1 - \rho_j^2)(ca_j - 1) + \frac{\rho_j^2}{\sqrt{m_j}} (\max\{cs_j, 0, 2\} - 1)$	$cd_j = 1 + (1 - \rho_j^2)(ca_j - 1) + \frac{\rho_j^2}{\sqrt{m_j}} (\max\{cs_j, 0, 2\} - 1)$
$cd_{ji} = q_{ji} cd_j + (1 - q_{ji}) q_{ji} ca_j + (1 - q_{ji})^2 ce_j$	$cd_{ji} = q_{ji} cd_j + (1 - q_{ji}) q_{ji} ca_j + (1 - q_{ji})^2 ce_j$
$\text{onde } ce_j = \frac{\sum_{k=1}^r \sum_{l=1}^{n_k} \lambda'_k 1\{n_{kl} = j\} ca'_k}{\sum_{k=1}^r \sum_{l=1}^{n_k} \lambda'_k 1\{n_{kl} = j\}}$	$\text{onde } ce_j = \frac{\sum_{k=1}^r \sum_{l=1}^{n_k} \lambda'_k 1\{n_{kl} = j\} ca'_k}{\sum_{k=1}^r \sum_{l=1}^{n_k} \lambda'_k 1\{n_{kl} = j\}}$

Definição da notação:

a_j	Intervalo de tempo entre chegadas na estação j .
a_{ij}	Intervalo de tempo entre chegadas na estação i da estação j .
a_k	Intervalo de tempo entre chegadas externas da classe de produtos k .
a_{kl}	Intervalo de tempo entre chegadas da classe de interesse k para a operação l na estação n_{kl} .
cx	Coeficiente quadrático de variação da variável aleatória x , definido pela razão entre a variância de x e o quadrado do valor esperado de x ($cx = V(x)/E(x)^2$).
d_j	Intervalo de tempo entre partidas da estação j .
d_{ji}	Intervalo de tempo entre partidas da estação j para a estação i .
d_{kl}	Intervalo de tempo entre partidas da classe de interesse k para a operação l na estação n_{kl} .
λ_j	Taxa média de chegada na estação j ($\lambda_j = 1/E(a_j)$)
λ_{ij}	Taxa média de chegada na estação j da estação i .
λ_k	Taxa média de chegada externa da classe k na rede.
r	Número de classes de produtos na rede.
m_j	Número de máquinas paralelas e idênticas na estação j .
n	Número de estações internas na rede
n_k	Número de operações no roteiro da classe k
n_{kl}	Estação visitada para a operação l do roteiro da classe k ;
q_{ij}	probabilidade de um usuário após terminar serviço em i , seguir para estação j .
ρ_j	Utilização média (intensidade de tráfego) da estação j ($\rho_j = \lambda_j / (m_j \mu_j)$)
s_j	Tempo de processamento na estação j .
s_{kl}	Tempo de processamento da l -ésima operação da classe k .

3. Planejamento de Experimentos

O planejamento de experimentos é um método com a finalidade de melhor explorar certos dados nas quantidades e condições adequadas ao longo de um experimento, obtendo maior precisão estatística sobre a variável resposta com menor custo e num menor tempo de execução. Ele envolve o estudo dos métodos de amostragem e dos problemas correlatos que surgem (Spiegel, 1982). Experimentos são utilizados com o intuito de se buscar saber algo sobre um determinado sistema, ou para comparar os efeitos causados por vários fatores num fenômeno (Montgomery, 2001). Portanto, por meio de uma série de testes, são realizadas mudanças ou certos estímulos nas variáveis de entrada (*inputs*) do sistema, para que se possa observar e identificar os efeitos nas variáveis de resposta ou de saída (*output*), geradas pelo próprio sistema.

PESQUISA OPERACIONAL PARA O DESENVOLVIMENTO

Existe uma grande quantidade de estratégias que podem ser adotadas para a execução de um planejamento de experimentos, tais como: bom senso; um fator por vez; tratamentos em pares; tratamentos em blocos aleatorizados; blocos incompletos parcialmente balanceados; quadrado grego-latino; quadrados de *Youden*; hierárquico; Plackett & Burman e experimentos fatoriais; método de Taguchi (Kackar, 1985; Taguchi, 1993; Ross, 1991; Elsayed e Chen, 1993; Ton et al., 1997; Reddy et al., 1998). Cada uma dessas estratégias possui suas particularidades, tornando-as mais adequadas do que outras, dependendo da situação problema que se pretende avaliar. Mais detalhes sobre planejamento de experimentos podem ser encontrados na literatura em Myers e Montgomery (1995), Wu e Hamada (2000), Montgomery (2001), Rodrigues e Iemma (2005), entre outros. Neste trabalho aplicamos o planejamento de experimento fatorial (com delineamento composto central rotacional) e o delineamento experimental de Plackett & Burman, resumidamente descritos a seguir.

O planejamento fatorial 2^k é um dos planejamentos fatoriais mais utilizados, onde k fatores (não confundir com a classe k de produtos da seção anterior) são testados em apenas 2 níveis, originando 2^k combinações possíveis. O processo envolve analisar todas as possíveis combinações da matriz experimental, permitindo a determinação e interpretação dos efeitos principais e de interação dos fatores envolvidos, para que as condições de desempenho ótimo do produto ou processo de fabricação sejam identificados e trabalhados. Em particular, um método útil para testar se o modelo matemático de primeira ordem é capaz de ajustar a superfície de resposta é o planejamento fatorial 2^k com pontos centrais. Para que esse teste seja feito, é necessário realizar um experimento 2^k , com n_c corridas no ponto central (0,0). Portanto, são adicionados mais pontos experimentais, entre os níveis (-1, +1), para determinar todos os parâmetros desse modelo, além de erros experimentais, sem

interferir nos efeitos produzidos pelos fatores na resposta, mantendo a linearidade dos efeitos.

3.1 Delineamento Composto Central Rotacional (DCCR)

Se a função matemática de primeira ordem não é capaz de ajustar a superfície de resposta, é necessário a adição de mais $2k$ ensaios nas condições axiais ou estrela. No DCCR, também chamado de projeto composto central de segunda ordem, α é a distância do centro do delineamento até os pontos axiais. Este parâmetro garante a rotabilidade do DCCR e é dependente do número de pontos existentes na porção fatorial do delineamento. O cálculo de α é dado pela equação: $\alpha = (2^k)^{1/4}$. Com $2k$ pontos axiais, esses pontos ficam organizados em $(\pm\alpha, 0, 0, \dots, 0)$, $(0, \pm\alpha, 0, \dots, 0)$, $(0, 0, \pm\alpha, \dots, 0)$, ..., $(0, 0, 0, \dots, \pm\alpha)$. A Tabela 2 apresenta alguns valores para α .

Tabela 2. Valores para α

k	2	3	4	5	6
α	$\pm 1,4142$	$\pm 1,6818$	$\pm 2,0000$	$\pm 2,3784$	$\pm 2,8284$

Neste estudo utilizou-se experimentos com DCCR para investigar o efeito de algumas variáveis nas aproximações das redes de filas. O DCCR permite investigar efeitos em fatores controláveis de forma econômica, ou seja, gera um pequeno número de rodadas experimentais. Foram considerados $k = 4$ fatores de controle: $(X_1 = r, X_2 = ca_k, X_3 = cs_j, X_4 = \rho_j)$, em que $X_1 = r$ é o número de classes de produtos, $X_2 = ca_k$ é o coeficiente quadrático de variação dos intervalos de tempo entre chegadas externas de todas as classes $k = 1, \dots, r$, $X_3 = cs_j$ é o coeficiente quadrático de variação dos tempos de processamento em todas as estações $j = 1, \dots, n$, e $X_4 = \rho_j$ é a utilização média em todas as estações $j = 1, \dots, n$ (esta notação foi definida logo abaixo da Tabela 1). Desta maneira, o DCCR tem $2^4 = 16 + 1$ ponto central + 8 pontos axiais, ou seja, um total de 25 ensaios.

Nos experimentos foram consideradas até $r = 13$ classes (ou famílias) de produtos com roteiros gerados aleatoriamente entre as n estações das redes. Os roteiros de cada classe representam as ordens ou as sequencias de estações visitadas pelos produtos. Nestes experimentos considerou-se os níveis do fator ca_k variando de 0,25 até 1,25, ou seja, desde processos de chegadas externas com relativamente baixas variabilidades até processos com variabilidades altas (maiores do que um processo de Poisson). No caso do fator cs_j , considerou-se o níveis variando de 0 até 1, ou seja, desde processos de serviço determinísticos até processos com variabilidades iguais a de um processo de Poisson. As utilizações médias ρ_j consideradas nestes experimentos variaram de 0,1 até 0,9, ou seja, desde situações com relativamente baixa intensidade de tráfego (tráfego leve) até situações com intensidade alta (tráfego pesado). A Tabela 3 apresenta os valores dos níveis para cada fator utilizados nos experimentos de DCCR. Foram realizados experimentos com redes com 2, 5 e 13 estações, conforme discussão na seção 4 adiante.

Tabela 3. Valores para os níveis dos fatores

Fatores	-2	-1	0	1	2
r	1	4	7	10	13
ca_k	0,25	0,5	0,75	1	1,25
cs_j	0	0,25	0,5	0,75	1
ρ_j	0,1	0,3	0,5	0,7	0,9

3.2 Planejamento de Plackett & Burman (PB)

Em situações com, por exemplo, até 8 variáveis independentes, os planejamentos fracionários são bem capazes de resolver. Mas em situações que envolvem uma grande quantidade de variáveis independentes, pode-se recorrer aos delineamentos experimentais de PB que são eficientes para isso (Rodrigues e Iemma, 2005; Ledolter e Swersey, 2007). Esses delineamentos também chamados de *screening design* podem ser utilizados em situações em que se gostaria de investigar fatores adicionais nos experimentos e um grande número de candidatos deve ser testado de forma econômica. Neste caso deve-se utilizar

sempre pelo menos quatro ensaios a mais do que o número de variáveis independentes a serem avaliadas. Por exemplo, em um processo onde temos 9 variáveis envolvidas, um PB de 16 ensaios com adição de 3 pontos centrais seria o delineamento mais adequado a ser utilizado.

Conforme mencionado na seção 3.1, nos experimentos analisados com DCCR, todas as r classes de produtos têm o mesmo valor para a variável de controle ca_k ($k = 1, 2, \dots, r$), e todas as n estações têm o mesmo valor para as variáveis de controle cs_j e ρ_j ($j = 1, 2, \dots, n$). Neste estudo também se aplicou um delineamento PB para analisar o comportamento das aproximações em situações em que estas variáveis de controle são diferentes para cada classe de produtos k e para cada estação j da rede. Desta maneira, são consideradas 39 variáveis independentes: $(ca_1, ca_2, \dots, ca_{13}; cs_1, cs_2, \dots, cs_{13}; \rho_1, \rho_2, \dots, \rho_{13})$, isto é, os coeficientes quadráticos de variação ca_k dos intervalos de tempo entre chegadas externas de cada classe k na rede, a'_k ($k = 1, 2, \dots, 13$ classes de produtos), e os coeficientes quadráticos de variação cs_j dos tempos de serviço s_j e as utilizações médias ρ_j de cada estação j da rede ($j = 1, 2, \dots, 13$ estações). Isto requer um PB de 44 ensaios (i.e., 44 diferentes configurações de redes) que servem de comparações para as aproximações. A lógica por trás disso é que variações independentes entre as variáveis $ca_1, ca_2, \dots, ca_{13}$, e entre as variáveis $cs_1, cs_2, \dots, cs_{13}$, e entre as variáveis $\rho_1, \rho_2, \dots, \rho_{13}$, podem alterar os resultados das aproximações, o que não seria capturado nos experimentos anteriores com DCCR (que investiga apenas um valor por vez para cada um desses conjuntos de variáveis). Os resultados desses experimentos PB também são apresentados e analisados na seção 4 a seguir.

4. Resultados Computacionais

4.1 Experimentos DCCR para as Redes de Filas com 2 e 5 Estações

Na Figura 1 são apresentados os roteiros das 13 classes para uma rede com $n = 2$ estações. Por exemplo, o roteiro da classe 1 percorre as estações 1 e 2, enquanto o roteiro da classe 2 percorre apenas a estação 2. Neste e nos demais experimentos desta seção, os valores de $E(L_j)$ em cada estação j nos modelos de simulação foram obtidos pelo *software* de simulação *GPSS/H*[®] (v.3.60), utilizando os mesmos procedimentos descritos em Bitran e Morabito (1995a), enquanto que os valores das 6 aproximações foram determinados pelo *software* de modelagem *GAMS*[®] (v.2.0.10.0). A análise estatística foi realizada utilizando-se o *software* *Statistica*[®] (v.8.0).

Foram realizados 25 ensaios experimentais do DCCR com a rede da Figura 1, conforme discutido anteriormente. A Tabela 4 apresenta, para cada uma das 6 aproximações discutidas na seção 2, a média dos 25 desvios do número de *jobs* na rede, $E(L) = \sum_{j=1}^n E(L_j)$, em relação ao número obtido pela simulação. Note que como a simulação foi tomada como referência, seu desvio médio é nulo. A Aprox 3 foi a que obteve, em média, os melhores resultados computacionais em comparação à simulação - ela foi a que teve o menor desvio em 18 (dos 25) ensaios, e seu desvio médio foi de apenas - 0,22% (destacado em negrito na Tabela 4). As outras aproximações também tiveram um bom desempenho, não ultrapassando desvios médios de 5%. Em 3 dos 25 ensaios realizados para esse exemplo, pelo menos uma das aproximações resultou em desvios maiores do que 10% (Ensaio 5, configuração $r = 4$, $ca_k = 0,5$, $cs_j = 0,75$ e $\rho_j = 0,3$; Ensaio 13, configuração $r = 4$, $ca_k = 0,5$, $cs_j = 0,75$ e $\rho_j = 0,7$ e Ensaio 20, configuração $r = 7$, $ca_k = 0,25$, $cs_j = 0,5$ e $\rho_j = 0,5$).

PESQUISA OPERACIONAL PARA O DESENVOLVIMENTO

Os detalhes destes 25 ensaios encontram-se em Camorim (2008, p.86-87). As Figuras 2 a 4 apresentam as superfícies de respostas para a variável $E(L)$ em função de r e ca_k ; ca_k e cs_j , ca_k e ρ_j . Para todas as respostas avaliadas, foi realizada a análise estatística determinando-se os valores do coeficiente de regressão, o erro padrão, o teste t_{cal} e o p -valor. O fator ρ_j afeta a variável resposta $E(L)$ mais do que os outros fatores (r , ca_k e cs_j); o ρ_j foi a variável mais importante e estatisticamente significativa a 95% de confiança (p -valor $< 0,05$). Modelos quadráticos foram utilizados após comprovação da inadequação de modelos lineares. Foi realizada a ANOVA, sendo a porcentagem de variação explicada (R^2) igual a 87% e o F calculado igual a 73,4, ou seja, 21 vezes superior ao tabelado a 5% de significância (3,44).

Tabela 4. Resultados da simulação e das aproximações: desvios médios do número de jobs $E(L)$ na rede com 2 estações nos 25 ensaios do DCCR realizados

	Sim	Aprox 1	Aprox 2	Aprox 3	Aprox 4	Aprox 5	Aprox 6
Desvio médio	0%	2,32%	-2,47%	-0,22%	4,03%	4,09%	2,00%

(a) $k = 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13$

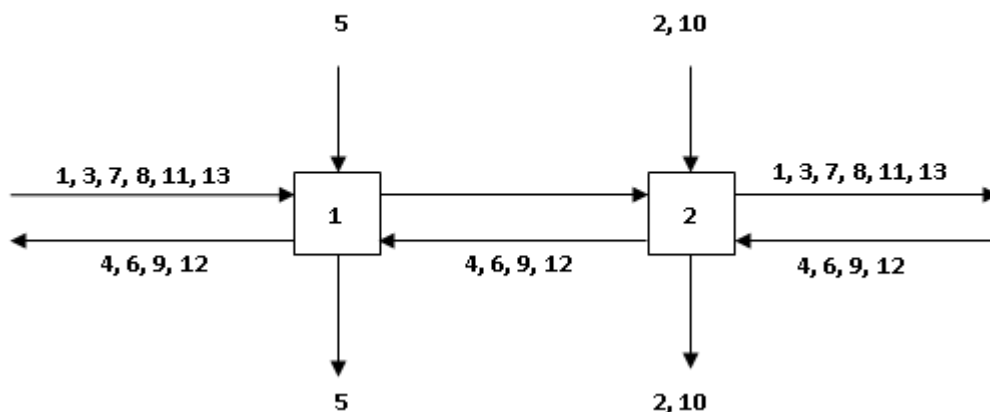


Figura 1. Roteiro das 13 classes com $n = 2$ estações

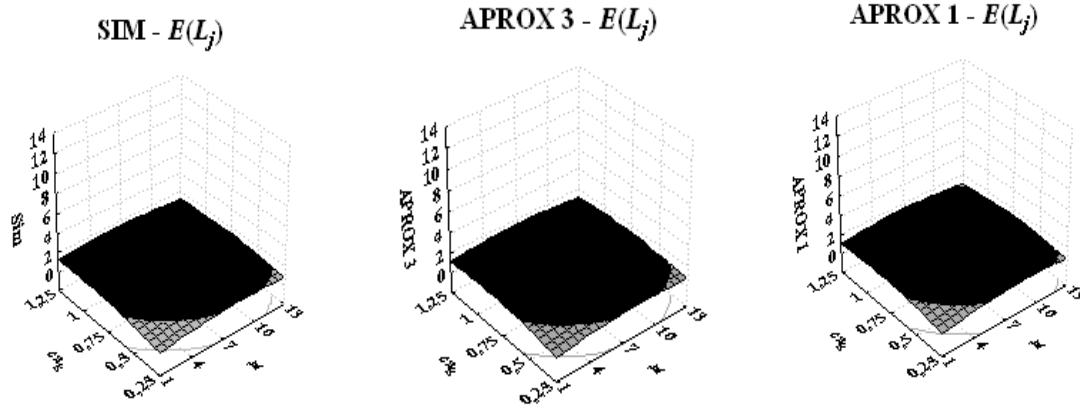


Figura 2. Superfícies de respostas: $E(L)$ em função de r e ca_k

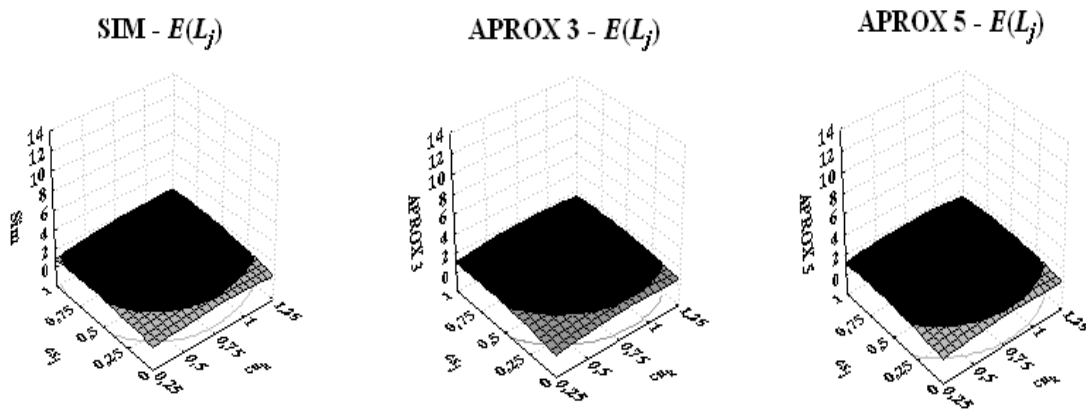


Figura 3. Superfícies de respostas: $E(L)$ em função de ca_k e cs_j

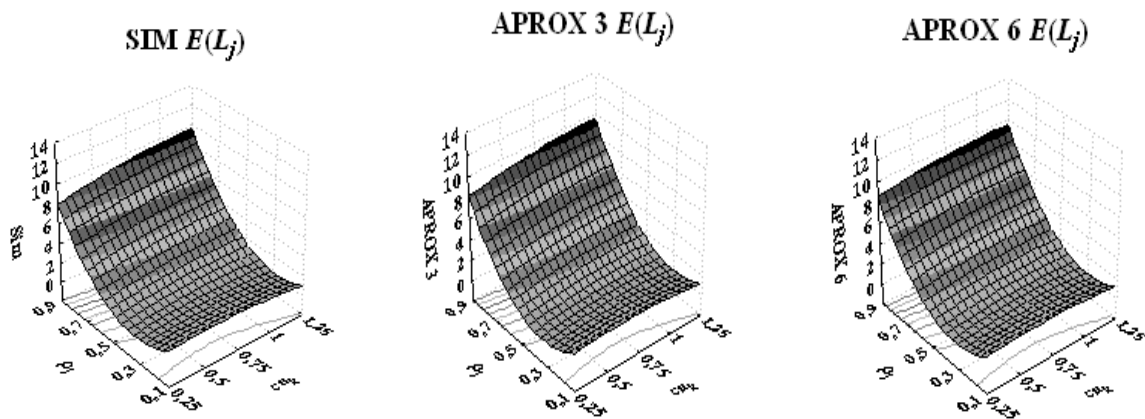


Figura 4. Superfícies de respostas: $E(L)$ em função de ca_k e ρ_j

PESQUISA OPERACIONAL PARA O DESENVOLVIMENTO

Na Figura 5 são apresentados os roteiros das 13 classes (gerados aleatoriamente) para uma rede com $n = 5$ estações. Similarmente a Tabela 4, a Tabela 5 apresenta os desvios médios obtidos nos 25 ensaios experimentais do DCCR com essa rede. Em 8 (dos 25) ensaios realizados (Ensaio 9, configuração $r = 4$, $ca_k = 0,5$, $cs_j = 0,25$ e $\rho_j = 0,7$; Ensaio 10, configuração $r = 10$, $ca_k = 0,5$, $cs_j = 0,25$ e $\rho_j = 0,7$; Ensaio 13, configuração $r = 4$, $ca_k = 0,5$, $cs_j = 0,75$ e $\rho_j = 0,7$; Ensaio 14, configuração $r = 10$, $ca_k = 0,5$, $cs_j = 0,75$ e $\rho_j = 0,7$; Ensaio 15, configuração $r = 4$, $ca_k = 1,0$, $cs_j = 0,75$ e $\rho_j = 0,7$; Ensaio 16, configuração $r = 10$, $ca_k = 1,0$, $cs_j = 0,75$ e $\rho_j = 0,7$; Ensaio 20, configuração $r = 7$, $ca_k = 0,25$, $cs_j = 0,5$ e $\rho_j = 0,5$ e Ensaio 25, configuração $r = 7$, $ca_k = 0,75$, $cs_j = 0,5$ e $\rho_j = 0,9$), pelo menos uma das aproximações resultou em desvios acima de 10%.

Os detalhes destes 25 ensaios encontram-se em Camorim (2008, p.94-95). Convém notar que nos experimentos com redes de 5 estações, o desempenho das aproximações piora em relação aos experimentos com redes de 2 estações. Mais uma vez, a Aprox 3 foi a que, em média, melhor se comportou (desvio médio de 6,16%), seguida da Aprox 2 (8,23%). A Aprox 3 foi a que teve o menor desvio em 17 (dos 25) ensaios (68%). Observa-se que aumentando os valores da taxa de ocupação ρ_j , os valores dos desvios pioram. As Figuras 6 a 8 apresentam as superfícies de respostas para a variável resposta $E(L)$, em função dos fatores r e ca_k ; ca_k e cs_j , ca_k e ρ_j . Nestes experimentos com redes de 5 estações, fica mais evidente que a superfície de resposta (independente dos fatores analisados) mais próxima da superfície da simulação foi a Aprox 3. Isso pode ser observado, por exemplo, na Figura 7, em que as superfícies entre Sim e Aprox 3 são mais próximas do que as entre Sim e Aprox 1. Essa situação era de se esperar em razão dos valores obtidos de $E(L)$, já que, em média, a Aprox 3 obteve melhor desempenho em relação as demais aproximações, quando comparada com simulação.

PESQUISA OPERACIONAL PARA O DESENVOLVIMENTO

Tabela 5. Resultados da simulação e das aproximações: desvios médios do número de jobs $E(L)$ na rede com 5 estações nos 25 ensaios do DCCR realizados

	Sim	Aprox 1	Aprox 2	Aprox 3	Aprox 4	Aprox 5	Aprox 6
Desvio médio	0%	13,54%	8,23%	6,16%	15,76%	14,70%	11,81%

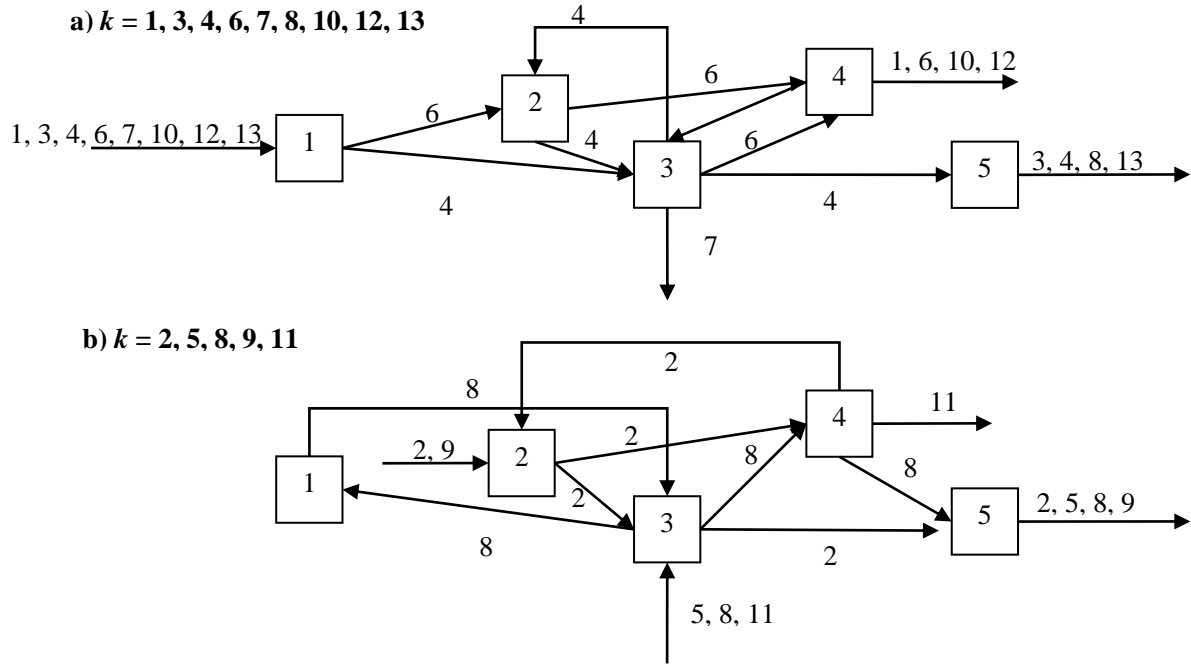


Figura 5. Roteiro das 13 classes com $n = 5$ estações

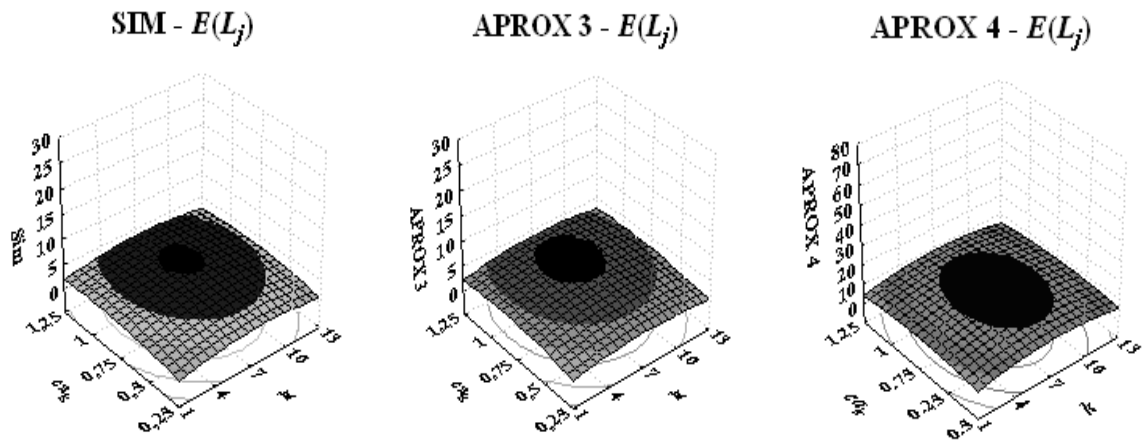


Figura 6. Superfícies de respostas: $E(L)$ em função de r e ca_k

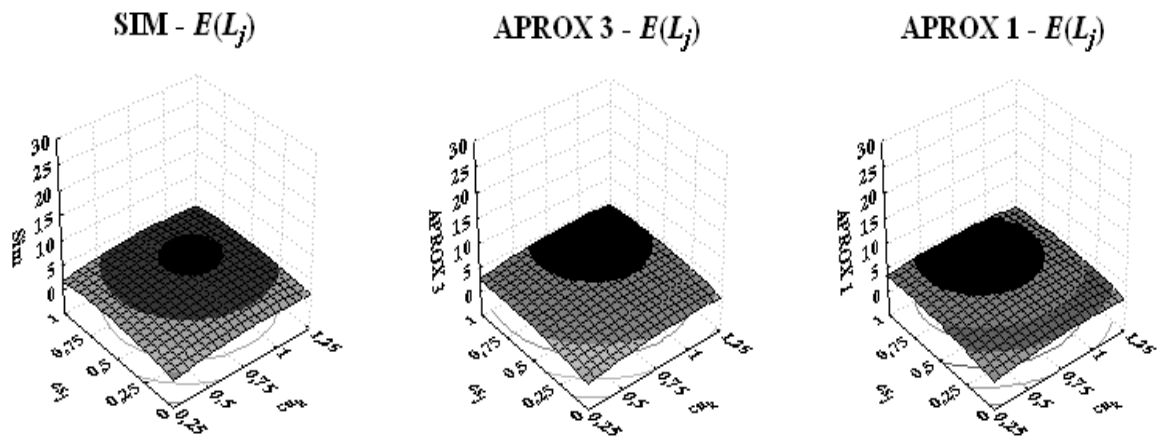


Figura 7. Superfícies de respostas: $E(L)$ em função de ca_k e cs_j

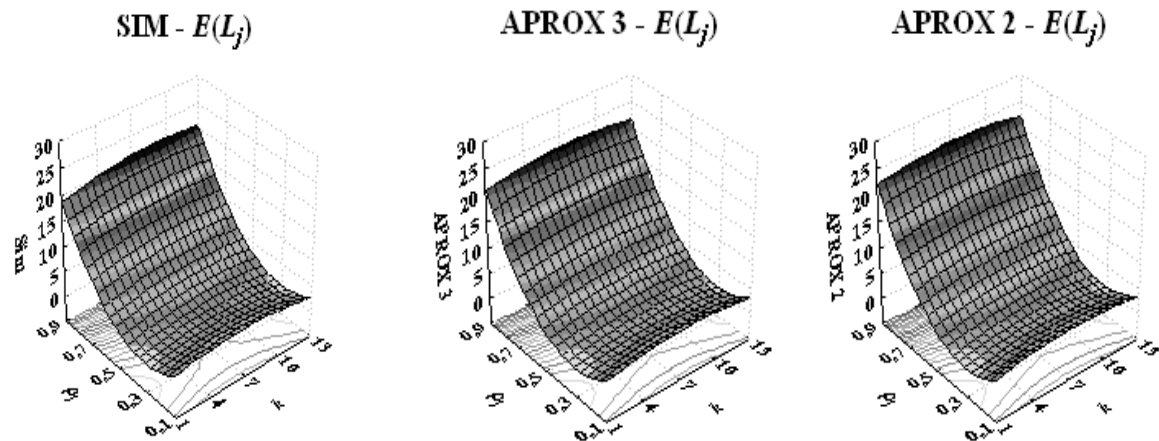


Figura 8. Superfícies de respostas: $E(L)$ em função de r e ρ_j

Da mesma forma que para a rede com 2 estações, foi realizada a análise estatística para a rede com 5 estações. Novamente ρ_j foi a variável mais importante e estatisticamente significativa a 95% de confiança (p -valor $< 0,05$). A ANOVA apresentou porcentagem de variação explicada (R^2) igual a 86,3% e o F calculado igual a 69, ou seja, 20 vezes superior ao tabelado a 5% de significância (3,44).

4.2 Experimentos DCCR para as Redes de Filas com 13 Estações

A seguir são apresentados os resultados dos experimentos DCCR com redes de filas com 13 estações, baseadas em um exemplo real de uma fábrica de semicondutores analisado por Bitran e Tirupati (1988) e Bitran e Morabito (1995a, 1995b, 1999). Como o fator r da Tabela 3 assume valores iguais a 1, 4, 7, 10 e 13 classes de produtos, e a rede exemplo da fábrica de semicondutores tem 10 classes de produtos, outros 3 roteiros foram gerados aleatoriamente para considerar o caso $r = 13$ – estes roteiros das classes 11, 12 e 13 estão ilustrados na Figura 9. Todos os dados de entrada para estes 25 experimentos DCCR podem ser encontrados em Camorim (2008). A Tabela 6 apresenta, para cada uma das 6 aproximações discutidas na seção 2, a média dos 25 desvios do número de *jobs* na rede,

$$E(L) = \sum_{j=1}^n E(L_j), \text{ em relação ao número obtido pela simulação.}$$

Tabela 6. Resultados da simulação e das aproximações: desvios médios do número de jobs $E(L)$ na rede de Bitran e Tirupati (1988) nos 25 ensaios do DCCR realizados

	Sim	Aprox 1	Aprox 2	Aprox 3	Aprox 4	Aprox 5	Aprox 6
Desvio médio	0%	15,64%	10,34%	4,17%	16,75%	17,03%	12,09%

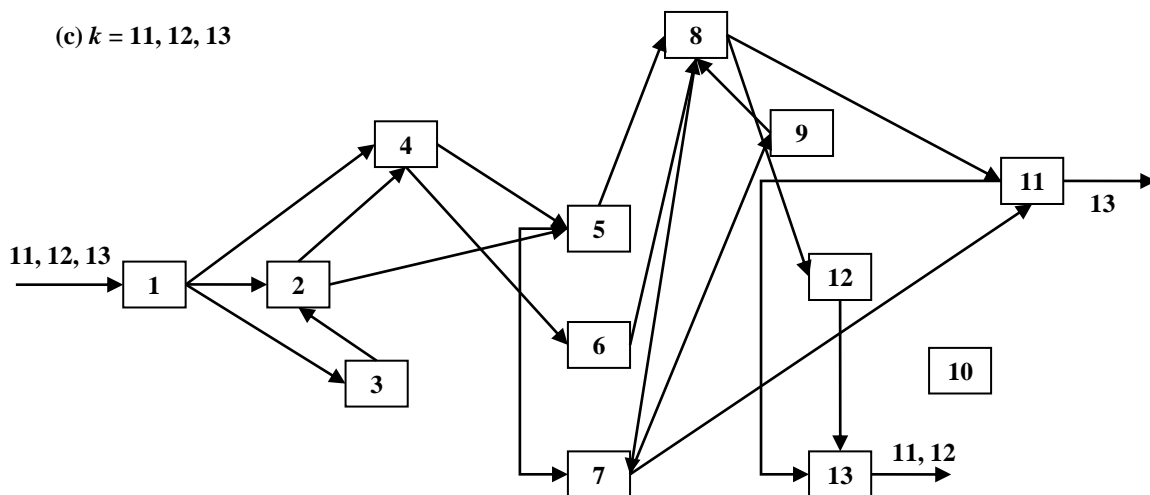


Figura 9. Roteiros das 3 classes com $n = 13$ estações

PESQUISA OPERACIONAL PARA O DESENVOLVIMENTO

A Aprox 3 foi a que teve menor desvio, em média, em 64% dos casos, ou seja, 16 (dos 25) ensaios. Em seguida, a Aprox 2 com 28%, e a Aprox 1, com apenas 8% dos casos. A Aprox 3 foi a única aproximação que conseguiu desvios médios abaixo dos 10%, com 4,17%, seguida da Aprox 2, com 10,34%. Observa-se quanto maior o valor de ρ_j , maior o desvio em relação a simulação. Em 7 destas 25 situações (Ensaio 9, $r = 4$, $ca_k = 0,5$ $cs_j = 0,25$ e $\rho_j = 0,7$; Ensaio 10, $r = 10$, $ca_k = 0,5$ $cs_j = 0,25$ e $\rho_j = 0,7$; Ensaio 13, $r = 4$, $ca_k = 0,5$ $cs_j = 0,75$ e $\rho_j = 0,7$; Ensaio 14, $r = 10$, $ca_k = 0,5$ $cs_j = 0,75$ e $\rho_j = 0,7$; Ensaio 16, $r = 10$, $ca_k = 1,0$ $cs_j = 0,75$ e $\rho_j = 0,7$; Ensaio 20, $r = 7$, $ca_k = 0,25$ $cs_j = 0,5$ e $\rho_j = 0,5$ e Ensaio 25, $r = 7$, $ca_k = 0,75$ $cs_j = 0,5$ e $\rho_j = 0,9$), as aproximações resultaram em desvios bem acima dos 10%. Os detalhes destes 25 ensaios encontram-se em Camorim (2008, p.107-108). As Figuras 10 a 15 comparam os desvios das 6 aproximações nos ensaios realizados.

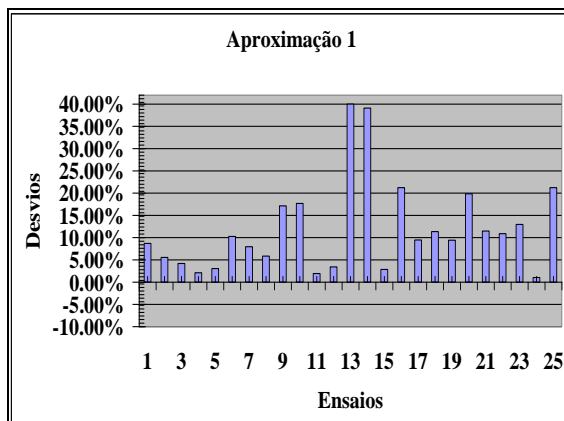


Figura 10. Aprox 1 com 13 estações

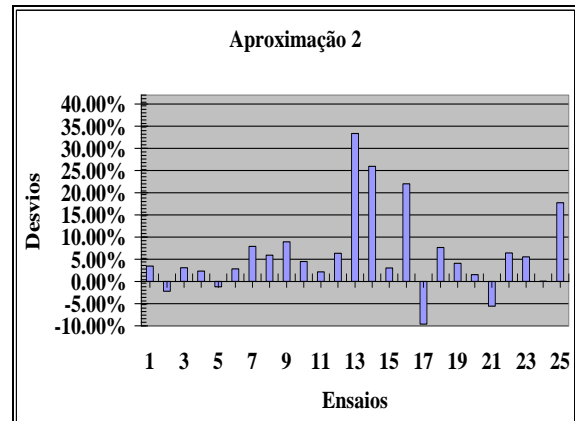


Figura 11. Aprox 2 com 13 estações

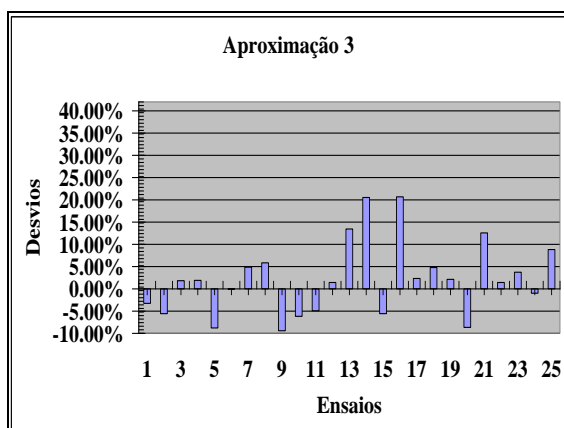


Figura 12. Aprox 3 com 13 estações

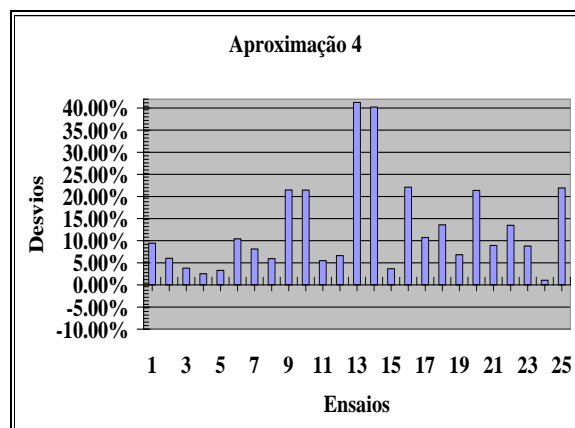


Figura 13. Aprox 4 com 13 estações

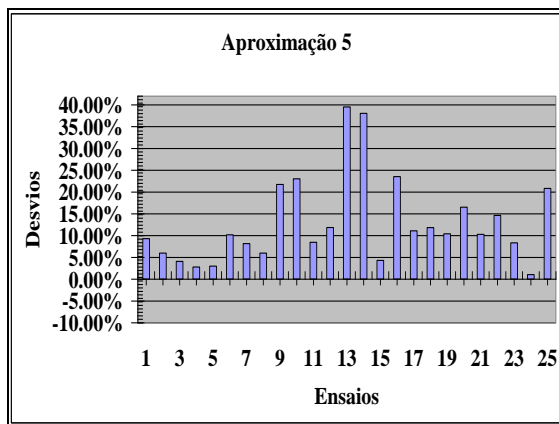


Figura 14. Aprox 5 com 13 estações

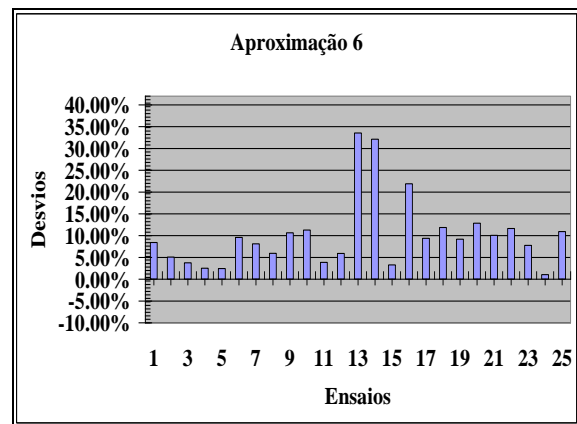


Figura 15. Aprox 6 com 13 estações

Comparando-se os desempenhos das Aprox 1, Aprox 4, Aprox 5 e Aprox 6 nos experimentos com redes de 2 nós, 5 nós e 13 nós, para o mesmo conjunto de ensaios experimentais, nota-se que existe uma tendência de sobrestimativas dos valores de $E(L)$ (i.e., desvios positivos), a medida que aumenta o número de nós na rede. Isso indica que tais aproximações se deterioram a medida que o número de estações da rede aumenta, e, portanto devem ser utilizadas com certa cautela em redes com maior número de nós. Por outro lado, com relação a Aprox 3, observa-se que ela possui superfície de resposta mais próxima da superfície de simulação do que as outras aproximações. Para mais detalhes do comportamento da Aprox 3, o leitor pode consultar as figuras apresentadas em Camorim (2008). As superfícies de respostas para as redes com 13 estações, assim como as das Figuras 4 e 8 para as redes com 2 e 5 estações, possuem curvaturas diferentes quando avaliam $E(L)$ em função de ρ_j . O fator ρ_j afeta a variável resposta $E(L)$ mais do que os outros fatores (r , ca_k e cs_j); o ρ_j foi a variável mais importante e estatisticamente significativa a 95% de confiança (p -valor $< 0,05$). A ANOVA apresentou porcentagem de variação explicada (R^2) igual a 84,8% e o F calculado igual a 61,3, ou seja, 18 vezes superior ao tabelado a 5% de significância (3,44).

Como pode ser observado nos experimentos com redes de 2, 5 e 13 nós, a Aprox 3 foi a que obteve o melhor desempenho, seguida da Aprox 2. Em situações onde os desvios das aproximações não foram satisfatórios, mesmo assim a Aprox 3 foi aquela que obteve, em geral, menor desvio médio (e.g. menor que 10%).

4.3 Experimentos PB para as Redes de Filas com 13 Estações

Conforme mencionado antes, nos experimentos anteriores analisados nas seções 4.1 e 4.2, todas as r classes de produtos têm o mesmo valor para a variável de controle ca_k ($k = 1, 2, \dots, r$), e todas as n estações têm o mesmo valor para as variáveis cs_j e ρ_j ($j = 1, 2, \dots, n$). A seguir aplicamos um delineamento PB para analisar o comportamento das aproximações em situações em que essas variáveis de controle variam para cada classe de produtos k e para cada estação j da rede. Desta maneira, são consideradas 39 variáveis independentes: ($ca_1, ca_2, \dots, ca_{13}; cs_1, cs_2, \dots, cs_{13}; \rho_1, \rho_2, \dots, \rho_{13}$), isto é, os coeficientes quadráticos de variação ca_k dos intervalos de tempo entre chegadas externas de cada classe k na rede, a'_k ($k = 1, 2, \dots, 13$ classes de produtos), e os coeficientes quadráticos de variação cs_j dos tempos de serviço s_j e as utilizações médias ρ_j de cada estação j da rede ($j = 1, 2, \dots, 13$ estações). Isto requer um PB de 44 ensaios (i.e., 44 diferentes configurações de redes) que servem de comparações para as aproximações. Informações detalhadas sobre os dados de entrada para os processos de chegada e os processos de serviço utilizados neste experimento podem ser encontrados em Camorim (2008). A taxa média de chegada externa (λ'_k) continua a mesma para todas as famílias de produtos, como nos experimentos anteriores. A Tabela 7 apresenta, para cada uma das 6 aproximações discutidas na seção 2, a média dos 44 desvios do número de *jobs* na rede, $E(L) = \sum_{j=1}^n E(L_j)$, em relação ao número obtido pela simulação (os detalhes deste planejamento PB44 encontram-se em Camorim, 2008, p.118-123).

PESQUISA OPERACIONAL PARA O DESENVOLVIMENTO

Tabela 7. Resultados da simulação e das aproximações: desvios médios do número médio de jobs $E(L)$ nos 44 ensaios realizados do delineamento de PB

	Sim	Aprox 1	Aprox 2	Aprox 3	Aprox 4	Aprox 5	Aprox 6
Desvio médio	0%	17,74%	2,58%	-1,42%	18,80%	12,56%	8,29%

Mais uma vez, a Aprox 3 obteve o menor desvio médio (1.42%) em relação à simulação, seguido da Aprox 2 (2.58%). Isso mostra que essa aproximação continua precisa, mesmo em situações em que as variáveis ca_k ($k = 1, 2, \dots, r$) e cs_j e ρ_j ($j = 1, 2, \dots, n$) podem ser bem diferentes para cada classe de produtos k e para cada estação j . O maior desvio (18,80%) foi da Aprox 4. Assim como foi observado em Morabito (1998) e Silva (2005), as três aproximações (Aprox 3, Aprox 2 e Aprox 6), foram as que melhor descreveram o comportamento do sistema em relação à simulação para essa rede estudada. Nas Figuras 16 a 21 as aproximações são comparadas nos ensaios realizados.

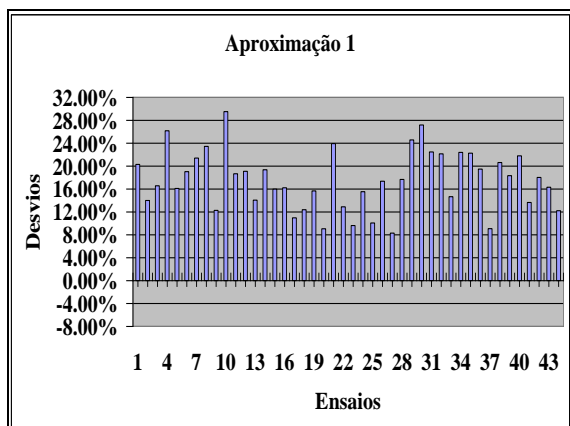


Figura 16. Aprox 1 para o experimento de PB

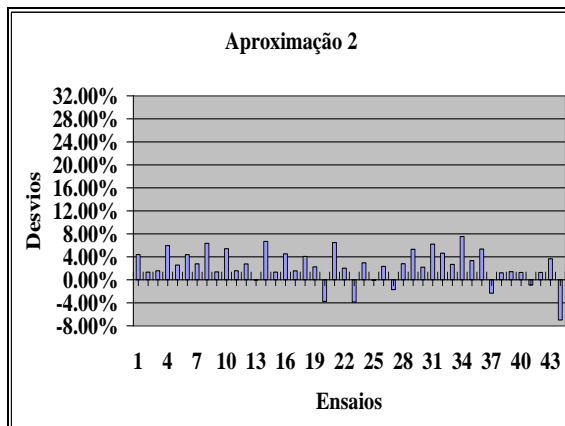


Figura 17. Aprox 2 para o experimento de PB

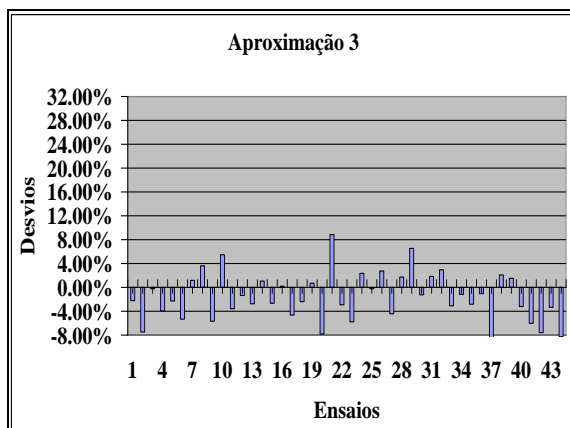


Figura 18. Aprox 3 para o experimento de PB

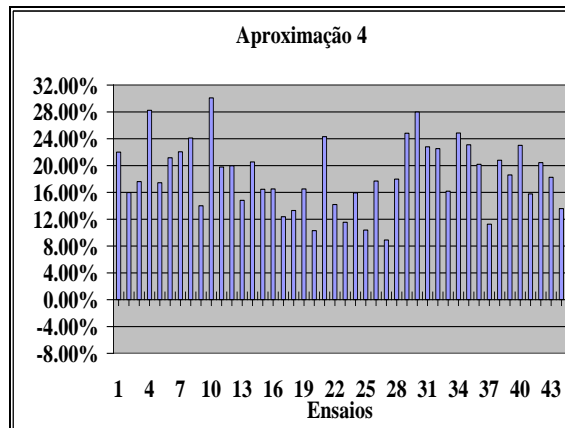


Figura 19. Aprox 4 para o experimento de PB

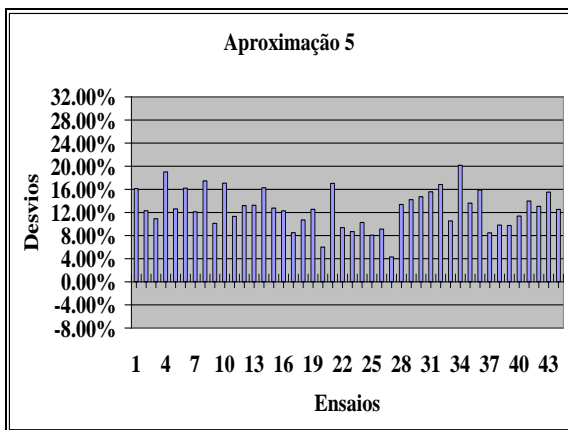


Figura 20. Aprox 5 para o experimento de PB

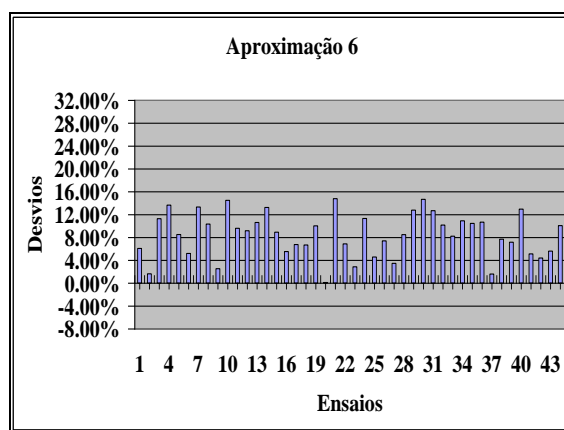


Figura 21. Aprox 6 para o experimento de PB

A mesma tendência de sobreestimar observada para a Aprox 1, Aprox 4, Aprox 5 e Aprox 6 nos experimentos com as redes de 13 estações, também é aqui observada. Analisando mais detalhadamente o experimento, ensaio por ensaio, é interessante notar que, dos 44 ensaios que foram realizados para esse experimento PB, em 21 deles (47,70%) a Aprox 2 teve os menores desvios. A Aprox 3, que em média foi a mais precisa, ficou atrás em apenas um ensaio, ou seja, em 20 configurações de redes, cerca de 45,50%. As Aprox 1, Aprox 4 e Aprox 5 não foram melhores em nenhuma das 44 configurações analisadas para a rede.

Em muitas situações nesse experimento realizado, os desvios para a Aprox 2 e a Aprox 3 se mostraram bem baixos, próximos dos resultados da simulação. Fica evidente que tanto a Aprox 2 como a Aprox 3 são bem mais eficientes para redes de filas com características como as aqui estudadas, ou seja, redes genéricas com múltiplas classes de produtos com roteiros determinísticos e estações de trabalho $GI/G/1$. Essas aproximações diferem uma da outra durante o processo de separação de partidas - a Aprox 3 utiliza um sistema linear diferente do sistema linear usado pela Aprox 2 (veja as expressões para cd_{kl} e cd_{ji} na Tabela 1). Embora de maneira diferente, essas duas aproximações consideram a interferência entre as classes de produtos, diferentemente da Aprox 1, o que indica que esse

é um aspecto importante de Aprox 2 e Aprox 3 nos exemplos aqui considerados. Além disso, ambas a Aprox 2 e Aprox 3 estimam ca_j com base apenas no método assintótico, e não numa combinação convexa dos métodos assintóticos e de intervalos estacionários, como a Aprox 4, Aprox 5 e Aprox 6 (veja seção 2), o que também parece ser uma diferença importante nos exemplos aqui analisados. A Aprox 2 e a Aprox 3 foram as únicas aproximações que não tiveram desvios acima dos 10% em nenhum dos 44 ensaios. A título de ilustração, a Tabela 8 apresenta a configuração da rede que obteve o menor desvio dentre todos.

Tabela 8. Melhor configuração do experimento de PB

Produtos/Estações	ca_k	cs_j	ρ_j
1	0,5	0,5	0,7
2	1	1	0,5
3	1	1	0,3
4	0,5	0,33	0,5
5	0,25	0,5	0,7
6	0,25	0,25	0,5
7	0,5	0,5	0,7
8	0,25	1	0,3
9	0,33	0,25	0,5
10	0,5	0,5	0,7
11	0,25	0,25	0,3
12	1	1	0,5
13	0,5	0,5	0,5

A Aprox 2 e a Aprox 3 podem ser utilizadas para avaliar o comportamento do desempenho de redes de filas em todos os 44 ensaios estudados, principalmente em situações onde a rede possui características de configurações como as apresentadas na Tabela 8, por exemplo. Analisando os resultados dos efeitos para a Aprox 2 no PB, as taxas de ocupação (ρ_j), em particular, as taxas das estações $\rho_1, \rho_2, \rho_3, \rho_8, \rho_{10}$ e ρ_{12} , obtiveram valores de p -valor abaixo dos 5%, o que indica influência importante nessas variáveis resposta. Para a Aprox 3, mais uma vez, as taxas de ocupação de algumas estações foram as mais importantes e estatisticamente significativas em relação as demais variáveis analisadas.

Uma situação semelhante ao que ocorre com a Aprox 2, acontece com os efeitos para a Aprox 6; as taxas de $\rho_1, \rho_2, \rho_3, \rho_8, \rho_{10}$ e ρ_{12} foram as mais importantes e estatisticamente significativas.

Convém salientar que estes resultados reforçam os resultados obtidos em Bitran e Morabito (1995a) e Silva e Morabito (2007a, 2009), onde as seis aproximações foram aplicadas para resolver duas redes reais de manufatura. Em Bitran e Morabito (1995a), foi analisada a rede *job-shop* da fábrica de semicondutores mencionada na seção 4.2, com 13 estações, 10 classes de produtos, e processos de chegadas e serviços com diferentes distribuições de probabilidade. Conforme esperado com os experimentos desta seção, os resultados de Aprox 1, Aprox 4 e Aprox 5 sobreestimaram $E(L)$ (29,9%, 31,6% e 23,1%, respectivamente), enquanto Aprox 2, Aprox 3 e Aprox 6 resultaram nos menores desvios em relação à simulação (8,3%, -10,8% e 0,7%, respectivamente). Convém notar que, em alguns ensaios no delineamento PB, a Aprox 6 foi a que obteve o melhor desempenho.

Em Silva e Morabito (2007a, 2009), foi estudada a rede *job-shop* de uma fábrica de peças metálicas que atendem indústrias automotivas e de eletrodomésticos (linha branca), com 15 estações de trabalho, 14 classes de produtos, e processos de chegadas e serviços com diferentes distribuições de probabilidade. Os resultados de Aprox 1, Aprox 4, Aprox 5 e Aprox 6 também sobreestimaram $E(L)$ (20,8%, 22,1%, 15,5% e 11,7%, respectivamente), enquanto Aprox 2 e Aprox 3 resultaram nos menores desvios em relação à simulação (-0,9% e 2,6%, respectivamente). Além disso, ao considerar-se que os processos de chegadas e serviços são determinísticos, os desvios em relação à simulação saltaram para -31,1%, enquanto que ao considerar-se que eles são Markovianos, estes desvios saltaram para +69,0%.

5. Conclusões

Neste artigo estudou-se redes de filas abertas para representar sistemas discretos de manufatura do tipo *job-shop*, com a finalidade de realizar uma comparação mais aprofundada entre 6 diferentes aproximações para avaliar medidas de desempenho das redes, baseadas no método aproximado de decomposição paramétrico. Utilizou-se matrizes de planejamento fatorial completo e de Plackett & Burman para o estudo de 4 e 39 variáveis independentes, respectivamente. Foi possível não só avaliar as configurações das redes de filas, como também fornecer informações importantes sobre o comportamento das redes de filas, verificando-se as variáveis que interferem no sistema e os desvios das aproximações propostas na literatura em relação à simulação das configurações.

Os resultados mostraram que sistemas de manufatura discretos do tipo *job-shop* podem ter seus desempenhos adequadamente avaliados por duas destas aproximações (Aprox 3 e Aprox 2). No entanto, nenhuma aproximação domina as demais em todos os experimentos. A Aprox 1, Aprox 4, Aprox 5 e Aprox 6 apresentam certo comportamento de sobreestimar o número de *jobs* na rede, a medida que o número de estações aumentam; logo, suas utilizações exigem cuidados adicionais. Estes resultados motivam o desenvolvimento de ferramentas computacionais, baseadas na Aprox 3 e Aprox 2, para apoio a decisões de projeto, planejamento e controle de sistemas discretos de manufatura, como, por exemplo, sistemas *job-shops*.

Uma perspectiva interessante para pesquisa futura seria realizar novos experimentos para redes de filas com outras características além das que foram aqui estudadas, por exemplo, redes com maior número de estações, com maior número de classes de produtos, e com outras topologias. O objetivo seria saber se a Aprox 3 e a Aprox 2 continuariam tendo um bom desempenho médio em relação às demais. Além disso, permitiria melhor entender o comportamento de tendência dos resultados da Aprox 1, Aprox

4, Aprox 5 e Aprox 6. Outra perspectiva interessante de pesquisa seria estudar e entender melhor o motivo que leva a Aprox 1 ou a Aprox 4, que possuem como características não considerar o problema da interferência entre as classes, a terem em algumas configurações desvios semelhantes ou até menores do que as outras aproximações que consideram esse problema. Conhecer melhor esses comportamentos ajudaria a melhor interpretar e entender o problema da interferência entre as classes, e possivelmente refinar as aproximações. Por fim, outra perspectiva importante para pesquisa futura é a continuação da aplicação desta metodologia de análise e planejamento de experimentos, com o objetivo de otimizar as variáveis analisadas nos experimentos.

Agradecimentos

Os autores gostariam de agradecer aos dois revisores anônimos pelos úteis comentários e sugestões. Esta pesquisa contou com apoio da FAPESP e CNPq.

Referências

- Abraham, B.; Chipman, H.; Vijayan, K. (1999). Some risks in the construction and analysis of supersaturated designs. *Technometrics* 41, 2, 135-141.
- Bitran, G. R.; Morabito, R. (1995a). Um exame dos modelos de redes de filas abertas aplicados a sistemas de manufatura discretos – Parte I. *Gestão & Produção* 2, 2, 192-219.
- Bitran, G.; Morabito, R. (1995b). Modelos de otimização de redes de filas abertas para projeto e planejamento de job-shops, *Pesquisa Operacional* 15, 1, 1-22.
- Bitran, G. R.; Morabito, R. (1996). Open queueing networks: Optimization and performance evaluation models for discrete manufacturing systems. *Production and Operations Management* 5, 2, 163-193.
- Bitran, G. R.; Morabito, R. (1999). An overview of trade-off curves in manufacturing systems design. *Production and Operations Management* 8, 1, 56-75.
- Bitran, G. R.; Sarkar, D. (1994). Throughput analysis in manufacturing networks. *European Journal of Operational Research* 74, 448-465.
- Bitran, G. R.; Tirupati, D. (1988). Multiproduct queueing networks with deterministic routing: Decomposition approach and the notion of interference. *Management Science* 34, 1, 75-100.
- Buzacott, J. A.; Shanthikumar, J. G. (1993). *Stochastic models of manufacturing systems*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ.

- Camorim, J. E. V. (2008). Estudo comparativo das aproximações baseadas no método de decomposição paramétrico para avaliar redes de filas de manufatura utilizando planejamento de experimentos. Dissertação, Departamento de Engenharia de Produção, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, São Paulo, p.180.
- Chao, X., Liu, L.; Zheng, S. (2003). Resource allocation in multisite service systems with intensive customer flows. *Management Science* 49, 1739-1752.
- Chase, R. B.; Aquilano, N. J. (1992). *Production and operations management – A life cycle approach*, Irwin, Homewood, MA.
- Cox, D. R. (1992). *Planning of experiments*. New York: John Wiley & Sons.
- Cruz, F.; Woensel, T.; Smith, J. M. (2010). Buffer and throughput trade-offs in M/G/1/K queueing networks: A bi-criteria approach. *International Journal of Production Economics*, 125, 2, 224-234.
- Elsayed, E. A.; Chen, A. (1993). Optimal levels of process parameters for products with multiple characteristics. *International Journal Production Research* 31, 5, 1117–1132.
- Gershwin, S. B. (1994). *Manufacturing systems engineering*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ.
- Govil, M. K.; Fu, M. C. (1999). Queueing theory in manufacturing: A survey. *Journal of Manufacturing Systems* 18, 3, 214-240.
- Ishfaq, R.; Sox, C. (2012). Design of intermodal logistics networks with hub delays. *European Journal of Operational Research* 220, 629-641.
- Jeong, K., Cho, H.; Phillips, D. T. (2008). Integration of queueing network and IDEF3 for business process analysis”. *Business Process Management Journal* 14, 471-482.
- Jiang, L.; Giachetti, R. E. (2008). A queueing network model to analyze the impact of parallelization of care on patient cycle time. *Health Care Management Science* 11, 248-261.
- Kerbache, L.; Smith, J. M. (2004). Queueing networks and the topological design of supply chain systems. *International Journal of Production Economics* 91, 251-272.
- Kackar, R. N. (1985). Off-line quality control, parameter design and the Taguchi method. *Journal of Quality Technology*, 17, 4, 176-188.
- Ketzenberg, M. E.; Souza, G. C.; Guide, V. D. R. (2003). Mixed assembly and disassembly operations for remanufacturing. *Production and Operations Management* 42, 3, 523-530.
- Kerbache, L.; Smith, J. M. (2004). Queueing networks and the topological design of supply chain systems. *International Journal of Production Economics* 91, 251-272.
- Koo, P., Koh, S.; Lee, W. (2011). Simultaneous determination of lot size and production rate at capacity-constrained multiple-product systems. *Flexible Service Manufacturing Journal* 23, 346–359.
- Kouvelis, P.; Tirupati, D. (1991). Approximate performance modeling and decision making for manufacturing systems: A queueing network optimization framework. *Journal of Intelligent Manufacturing* 2, 107-134.

- Kouvelis, P.; Chambers, C.; Yu, D. Z. (2005). Manufacturing operations manuscripts published in the first 52 issues of POM: Review, trends and opportunities. *Production and Operations Management* 14, 4, 450-467.
- Krajewski, L. J.; Ritzman, P. L. (1990). *Operations management: Strategy and analysis*. 2.ed., Addison-Wesley, Reading, MA.
- Ledolter, J.; Swersey, A. J. (2007). *Testing 1-2-3: Experimental design with applications in marketing and service operations*. Stanford University Press, Redwood City, CA.
- Liu, J., Yang, F, Wan, H.; Fowler, J. (2011). Capacity planning through queueing analysis and simulation-based statistical methods: a case study for semiconductor wafer fabs. *International Journal of Production Research*, 49, 15, 4573-4591.
- Montgomery, D. C. (2001). *Design and analysis of experiments*. 3ed. New York: John Wiley & Sons.
- Morabito, R. (1998). Análise de curvas de trade-off baseada em teoria de redes de filas para o projeto e planejamento de sistemas discretos de manufatura. São Carlos, Tese Livre-Docência, EESC/USP, 136pg.
- Morabito, R.; Souza, M. C. (2010). Roteamento de multi-fluxos em redes de filas genéricas. *Pesquisa Operacional*, 30, 3, 583-600.
- Morabito, R., Souza, M. C.; Vazquez, M. (2014). Approximate decomposition methods for the analysis of multicommodity flow routing in generalized queueing networks. *European Journal of Operational Research*, 232, 618-629.
- Myers, R. H.; Montgomery, D. C. (1995). *Response surface methodology: Process and product optimization using designed experiments*. Canada: John Wiley & Sons, Inc.
- Nahmias, S. (1995). *Production and operations analysis*. Richard D. Irwin, Inc.
- Nakano, M.; Ohno, K. (1999). Decomposition algorithm for performance evaluation of AGV systems. *Production and Operations Management* 8, 2, 193-205.
- Plackett, R. L.; Burman, J. P. (1946). The design of optimum multifactorial experiments. *Biometrika* 33, 4, 305-325.
- Reddy, P. B. S.; Nishina, K.; Babu, S. A. (1998). Taguchi's methodology for multi-response optimization: a case study in the Indian plastics industry. *International Journal of Quality & Reliability Management* 15, 6, 646-668.
- Rodrigues, M. I.; Iemma, A. F. (2005). *Planejamento de experimentos e otimização de processos: Uma estratégia sequencial de planejamentos*. 1ed. Campinas: Casa do Pão Editora.
- Ross, P. J. (1991). *Aplicações das Técnicas de Taguchi na Engenharia da Qualidade*. McGraw-Hill Ltda. São Paulo.
- Segal, M.; Whitt, W. (1989). A queueing network analyzer for manufacturing. In: M. Bonatti, *Teletraffic science for new-effective system, networks and services*. North-Holland: Elsevier, 1146-1152.

- Silva, C. R. N. (2005). Aplicação de modelos de redes de filas abertas no projeto e planejamento de sistemas discretos de manufaturas. Tese de Doutorado, Departamento de Engenharia de Produção, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, SP.
- Silva, C. R. N.; Morabito, R. (2007a). Aplicação de modelos de redes de filas abertas no planejamento do sistema job-shop de uma planta metal-mecânica. *Gestão & Produção*, 14, 2, 393-410.
- Silva, C. R. N.; Morabito, R. (2007b). Análise de problemas de partição de instalações em sistemas job-shops por meio de modelos de redes de filas. *Pesquisa Operacional*, 27, 2, 333-356.
- Silva, C. R. N.; Morabito, R. (2009). Performance evaluation and capacity planning in a metallurgical job-shop system using open queueing network models, *International Journal of Production Research*, 47, 23, 6589-6609.
- Shanthikumar, J. G.; Xu, S. H. (2000). Strongly asymptotically optimal design and control of production and service systems. *IIE Transactions* 32, 881-890.
- Smith, J. M.; Cruz, F. R. B.; van Woensel, T. (2010). Topological network design of general, finite, multi-server queueing networks. *European Journal of Operational Research* 201, 427-441.
- Souza, G. S.; Wagner, H. M.; Whybark, D. C. (2001). Evaluating focused factory benefits with queueing theory. *European Journal of Operational Research* 128, 597-610.
- Souza, G. S.; Ketzenberg, M. E.; Guide, V. D. R. (2002). Capacitated remanufacturing with service level constraints. *Production and Operations Management* 11, 2, 231-248.
- Souza, G. S.; Ketzenberg, M. E. (2002). Two-stage make-to-order remanufacturing with service-level constraints. *International Journal of Production Research* 40, 2, 477-493.
- Spiegel (1982). *Théorie et Applications de la Statistique*, Paris: McGraw-Hill.
- Suri, R.; Sanders, J. L.; Kamath, M. (1993). Performance evaluation of production networks in *Handbooks in OR/MS*, S.C. Graves (ed.), vol.4, Elsevier, North-Holland, Amsterdam.
- Ton, L.; Su, T.; Wang, C. H. (1997). The optimization of multi-response problems in the Taguchi method. *International Journal of Quality & Reliability Management*, 14, 4, 367-380.
- Warsing, D. P., Souza, G. C.; Greis, N. P. (2001). Determining the value of dedicated multimodal cargo facilities in a multi-region distribution network. *European Journal of Operational Research* 133, 81-93.
- Whitt, W. (1982). Approximating a point process by a renewal process, I: Two basic methods. *Operations Research* 30, 1, 125-147.
- Whitt, W. (1983a). The queueing network analyzer. *The Bell System Technical Journal* 62, 9, 2779-2815.
- Whitt, W. (1983b). The queueing network analyzer. *The Bell System Technical Journal* 63, 9, 1911-1979.
- Whitt, W. (1995). Variability functions for parametric decomposition approximations of queueing networks. *Management Science* 41, 10, 1704-1715.

PESQUISA OPERACIONAL PARA O DESENVOLVIMENTO

Wu C. F.; Hamada, M. (2000). Experiments: planning, analysis, and parameter design optimization. New York: John Wiley and Sons, Inc.

Wu, K.; McGinnis, L. (2012). Performance evaluation for general queueing networks in manufacturing systems: Characterizing the trade-off between queue time and utilization. *European Journal of Operational Research* 221, 328-339.

Wu, K.; McGinnis, L. (2013). Interpolation approximations for queues in series. *IIE Transactions* 45, 273-290.