



Vlademir Fazio Santos

Princípios do Método de Dimensionamento Dinâmico de Operações com Filas em Tempo Real

Limeira, Fevereiro de 2014



**Universidade Estadual de Campinas
Faculdade de Tecnologia**

Tecgº Vlademir Fazio Santos

Princípios do Método de Dimensionamento Dinâmico de Operações com Filas em Tempo Real

Dissertação de Mestrado apresentada à Faculdade de Tecnologia da Universidade Estadual de Campinas como parte dos requisitos exigidos para obtenção do título de **Mestre em Tecnologia**. Área de Concentração: Tecnologia e Inovação. Linha de Pesquisa: **Engenharia da Informação**.

Prof. Dr. Edson Luiz Ursini (Orientador)
Prof. Dr. Paulo Sérgio Martins Pedro (Co-orientador)

ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE A VERSÃO FINAL
DA DISSERTAÇÃO DEFENDIDA PELO ALUNO
VLADMIR FAZIO SANTOS, ORIENTADO PELO
PROF. DR. EDSON LUIZ URSINI

Limeira, Fevereiro de 2014

Ficha catalográfica
Universidade Estadual de Campinas
Biblioteca da Faculdade de Tecnologia
Vanessa Evelyn Costa - CRB 8/8295

Sa59p Santos, Vlademir Fazio, 1959-
Princípios do método de dimensionamento dinâmico de operações com filas em tempo real / Vlademir Fazio Santos. – Limeira, SP : [s.n.], 2014.

Orientador: Edson Luiz Ursini.

Coorientador: Paulo Sérgio Martins Pedro.

Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Tecnologia.

1. Redes de Jackson. 2. Teoria das filas. 3. Carregamento de commodities. 4. Simulação discreta. 5. Escalonamento de processos. I. Ursini, Edson Luiz. II. Pedro, Paulo Sérgio Martins. III. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Tecnologia. IV. Título.

Informações para Biblioteca Digital

Título em outro idioma: Principles of the method of dynamic sizing of operations with real time queues

Palavras-chave em inglês:

Jackson network

Queueing theory

Commodities loading

Discrete simulation

Process scheduling

Área de concentração: Tecnologia e Inovação

Titulação: Mestre em Tecnologia

Banca examinadora:

Edson Luiz Ursini [Orientador]

Mario de Souza Nogueira Neto

Varese Salvador Timóteo

Data de defesa: 28-02-2014

Programa de Pós-Graduação: Tecnologia

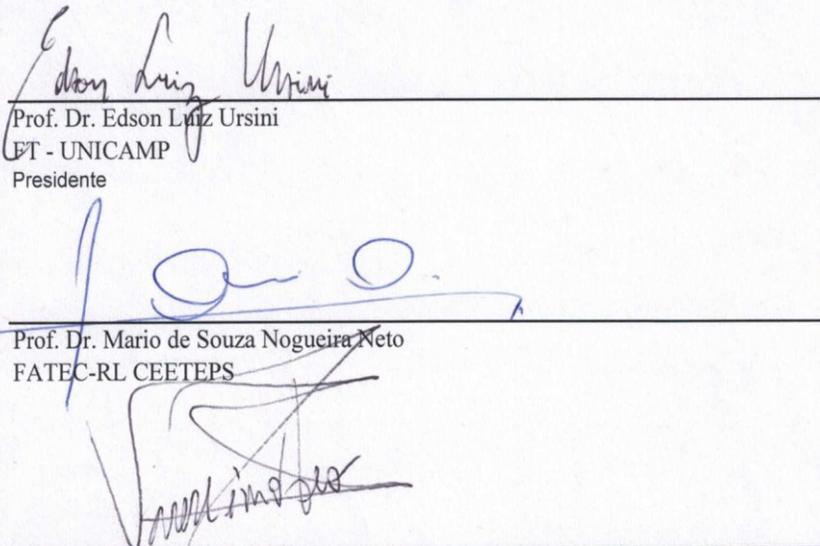
DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM TECNOLOGIA

ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: TECNOLOGIA E INOVAÇÃO

**PRINCÍPIOS DO MÉTODO DE DIMENSIONAMENTO DINÂMICO DE OPERAÇÕES
COM FILAS EM TEMPO REAL**

Vlademir Fazio Santos

A Banca Examinadora composta pelos membros abaixo aprovou esta Dissertação:



Prof. Dr. Edson Luiz Ursini
ET - UNICAMP
Presidente

Prof. Dr. Mario de Souza Nogueira Neto
FATEC-RL CEETEPS

Prof. Dr. Varese Salvador Timoteo
FT - UNICAMP

Este trabalho é realizado para a honra e gloria de um SENHOR que me acolhe, me conforta, me enche de alegria, mas de uma alegria ainda pouco experimentada. Pouco, sim, mas com tamanha intensidade e satisfação que jamais vivi. SENHOR de um conforto prazeroso e radiante, que não é meu, mas que me permite compartilhar e desfrutar da gente de todo tipo e lugar, que ELE me dá de presente plenamente. Há muito presentes indescritíveis do corpo dEste SENHOR. O menor de todos é este projeto, um sonho antigo. Muito melhor são os irmãos que desfrutam isso tudo comigo, Mas há destaques entre estes divinos presentes, alguns que fazem do meu ser o motivo de querer vencer. Minha mulher, Meu Presente Adorado de Deus, pequena, mas de ombros gigantes, coração infinito e alma transbordante do Espírito que nos cria e renova. Meus filhos, motivo da energia que quero ter e desfrutar com eles. Meus pais de meu amor incondicional. Meus mestres acadêmicos, orientadores e pacientes debatedores. Com vocês todos divido essa generosa honra de ser filho do Deus vivo e presente. A vocês esse presente.

AGRADECIMENTOS

Aos professores Dr. Edson Luiz Ursini e Dr. Paulo Sergio Martins Pedro pelas imprescindíveis orientações, sem as quais este projeto não passaria de um sonho sem quaisquer rabiscos. Pela paciência em me ouvir. Pelo cuidado e generoso respeito à minha ignorância. Pelo conhecimento compartilhado comigo.

Aos verdadeiros amigos, Luiz Arioaldo Junior, Fátima Guerra e Laura Beatriz Alves que contribuíram com discussões valorosas e sugestões para o dia-a-dia do trabalho.

À Professora Dra. Marli de Freitas Gomes Hernandez por me receber dignamente nesta instituição e me indicar para aluno do Prof. Ursini.

Meus agradecimentos ao amigo Teclg^o William Paiva pelos cursos e mini-cursos que foram fundamentais para a elaboração deste projeto.

Ao jovem amigo Osvaldo Torrezan pela preciosa colaboração na finalização da redação e impressão deste trabalho.

Enfim, muito obrigado.

"Dê-me uma alavanca e um ponto de apoio e eu moverei o mundo."

Arquimedes de Siracusa

RESUMO

Iniciativas industriais para finalizar a produção de multi-commodities embaladas sem formar estoque requerem inovação tecnológica constante. Atuam sincronizadamente com o múltiplo carregamento simultâneo diretamente em caminhões. Para isso desenvolvemos um modelo de simulação por eventos discretos e apresentamos seu modelo analítico de tráfego validado com Redes de Filas de Jackson e pela Lei de Conservação de Little. Descrevemos os limites do intervalo de variação de tempos máximos e médios de permanência de multi-commodities em sistemas de tempo real para três servidores paralelos. Esse sistema opera com mudanças dinâmicas de diferentes políticas de escalonamento. Um resultado é a confirmação do compromisso entre tempos máximos e médios independentemente de intensidade de tráfego e de políticas de escalonamento a que o modelo seja submetido. Outro é a identificação de uma faixa de relativa estabilidade operacional fora de regiões críticas. Assim, contribuímos com os princípios de um método que pode ser adotado como apoio às decisões de planejamento em ambientes industriais complexos submetidos a filas em tempo real.

Palavras-chave: *simulação discreta, teoria das filas, redes de Jackson, carregamento de commodities, escalonamento de processos.*

ABSTRACT

The industrial initiatives for the production finalization of packed multi-commodities without forming stock require constant technological innovation. They operate a synchronous process to simultaneous multi-loading straightly into trucks. Regarding to this we developed a discrete event simulation model and present its traffic analytical model validated with the theory of Jackson Queueing Networks and the Little's Conservation Law. We describe the limits for the range of multi-commodities throuput-times and maximum waiting time in real-time systems with three parallel servers. These systems operate with dynamical changes of different scheduling policies. A reached result is the confirmation of the average and maximum times mutual commitment despite of traffic intensity and scheduling policies that the model is submitted to. Another is the identification of a range of relative operational stability out of critical regions. As a contribution we offer the principles of a method that can be used to planning decision support in complex industrial environments subject to real-time queues.

Keywords: *discrete simulation, queuing theory, Jackson network, commodities loading, process schedulling.*

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	xix
LISTA DE TABELAS	xxi
1 INTRODUÇÃO.....	1
1.1 Motivação e Relevância	1
1.2 Modelagem do problema.....	4
1.2.1 Objetivos da pesquisa.....	5
1.3 Metodologia do Trabalho	6
1.4 Organização do Trabalho.....	7
2 UM CENÁRIO REAL	9
2.1 Carregamento Simultâneo à Finalização de Produtos	11
3 ASPECTOS TEÓRICOS E CONCEITUAIS GERAIS DO SISTEMA	15
3.1 Classificação da Movimentação de Cargas com Caminhões Transportadores	15
3.2 Rede de Filas	18
3.2.1 Aspectos Gerais.....	18
3.3 Modelagem Simulacional com Software Arena®.....	29
4 DESENVOLVIMENTO DOS MODELOS DE TRÁFEGO	33
4.1 Modelo analítico para carregamento de commodities ensacadas.....	34
4.2 Simulando outras características do sistema	44
5 MUDANÇA DINÂMICA DO MODO DE OPERAÇÃO NO CARREGAMENTO DE <i>COMMODITIES</i> ENSACADAS	51
5.1 Considerações gerais da mudança de modo	51
5.2 Mudança Dinâmica do Modo de Operação: resultados e análise.....	56
6 CONTROLE DE ADMISSÃO E VAZÃO	65
7 OBSERVAÇÕES E CONCLUSÕES.....	73
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	77

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Silos– Multigrain, 36.000 ton – Moinho Pacífico, 90.000 ton – Porto de Santos, SP.....	2
Figura 2 – Análise do Sistema e Abstração da metodologia	6
Figura 3 – Esquema de uma Negociação para Admissão de Veículos.....	9
Figura 4 – Modelo de Carregamento por Bicas.....	10
Figura 5 – Modelo de Sistema de Movimentação Automática de Sacaria.....	10
Figura 6 – Diagrama Esquemático de um Ambiente Industrial de Carregamento.....	11
Figura 7 – Fluxograma de uma Operação de Carregamento	12
Figura 8 – Classificação dos serviços.....	17
Figura 9 – Rede aberta de filas (OQN).....	18
Figura 10 – Rede fechada de filas (CQN)	18
Figura 11 – Rede fechada de filas (CQN) com entradas e saídas simultâneas por um mesmo servidor	19
Figura 12 – Regime Transitório vs. Regime Permanente.....	21
Figura 13 – Curvas de Poisson	22
Figura 14 – Decomposição de Processos de Poisson	24
Figura 15 – Superposição de Processos de Poisson	24
Figura 16 – Modelo de Rede de Jackson.....	25
Figura 17 – Modelo Tridimensional do Sistema Aberto de Rede de Filas Genérico.....	27
Figura 18 – Esquema do Sistema de Rede de Filas no Modelo	28
Figura 19 – Esquema Lógico do Sistema de Rede de Filas no Modelo	28
Figura 20 – Tela de Inicialização do Software Arena®	29
Figura 21 – Modelagem por Blocos Lógicos	31
Figura 22 – Modelo Demonstrativo de Simulação 3D no Arena 14.0	32
Figura 23 – Prioridades de políticas de escalonamento de <i>Jobs</i>	32
Figura 24 – Representação do sistema com 3 bicas	34
Figura 25 – Representação da taxa λ de entrada num sistema com 3 bicas	34
Figura 26 – Representação da realimentação do sistema com 3 bicas	35
Figura 27 – Representação do sistema equivalente com 3 bicas.....	35
Figura 28 – Modelo de simulação do exemplo numérico 4.1.1	37
Figura 29 – Bloco Arrive.....	38

Figura 30 – Subsistema Escolha.....	39
Figura 31 – Designação para as variáveis à entrada das bicas	39
Figura 32 – Processador das bicas (servidores).....	40
Figura 33 – Subsistema Término.....	40
Figura 34 – Bloco Depart	41
Figura 35 – Mudança na disciplina de atendimento da BICA_A.....	44
Figura 36 – Modelo de simulação para testar diferentes disciplinas de serviço.....	46
Figura 37 – Servidor (bica única) para o modelo de fila proposto para teste.....	46
Figura 38 – Bloco Depart na saída das instâncias	46
Figura 39 – Exemplo de saída padrão do sw ARENA para a disciplina LIFO	48
Figura 40 – Subsistema Término com identificadores de Sojourn Time	51
Figura 43 – Incremento de tempos médios inter-políticas	54
Figura 44 – Modelo de simulação com mudança do modo de operação.....	54
Figura 45 – Bloco Assign de entrada no estágio de avaliação crítica.	55
Figura 46 – Submodelos Aval_criticidade.	55
Figura 47 – Submodelos Politica_Inicial, 1 = FIFO, 0 = SJF.	56
Figura 48 – Tempos de permanência Médios (a) e Máximos (b) - Início em SJF	59
Figura 49 – Compromisso TAVG e TMAX.....	59
Figura 50 – Superfície de respostas TAVG – Início em FIFO mudança em L	61
Figura 51 – Superfície de respostas TMAX – Início em FIFO mudança em L	61
Figura 52 – Superfície de respostas TMAX– Início em SJF mudança em L	62
Figura 53 – Superfície de respostas TAVG – Início em SJF mudança em L.....	62
Figura 55 – Modelo com Controle de Admissão (CA) e mudança de modo	66
Figura 56 – Controle dinâmico de Admissão (CA).....	66
Figura 57 – Regiões de bloqueio e perda na admissão de caminhões	67
Figura 58(a) e (b) – Compromisso TAVG e TMAX – cargas e entretempo fixos (22, 23 min)	68
Figura 58(c) e (d) – Compromisso TAVG e TMAX – cargas e entretempo fixos (24, 25 min)	68
Figura 58(e) – Compromisso TAVG e TMAX – cargas e entretempo fixo (30 min).....	68
Figura 59 (a) e (b) – Resultados comparativos entre modelos para 03 instâncias.....	70
Figura 59 (c) e (d) – Resultados comparativos entre modelos para 06 instâncias.....	70
Figura 60 (e) e (f) – Resultados comparativos entre modelos para 10 instâncias	70
Figura 60 (g) e (h) – Resultados comparativos entre modelos para 15 instâncias	71

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Principais tipos de sistemas discretos de manufatura	15
Tabela 2 – Comparação de características de sistemas discretos de manufatura	16
Tabela 3 – Notação de Kendall A/S/M/B/K/SD	20
Tabela 4 – Notação de variáveis nos modelos de fila	20
Tabela 5 – Principais políticas de atendimento	21
Tabela 6 – Parâmetros nos modelos de fila M/M/1 em Estado Estacionário	26
Tabela 7: Disciplinas testadas com chegadas 1=1000seg, 2=700seg e 3=400seg.	47
Tabela 8: Intervalos de tempo para o Sojourn Time.	52
Tabela 9: Disciplinas em <i>long run</i> com chegadas 1=1800seg, 2=1500seg e 3=1200seg.	52
Tabela 10: Parâmetros a longo prazo –a=24min, b=23min, c=22min.	53
Tabela 11: Panorama de tempos médios e máximos para L=1, 2, 3, 4.	57
Tabela 12: Pico de perdas e bloqueios SJF	67

1 INTRODUÇÃO

1.1 Motivação e Relevância

Na indústria de *commodities* ensacadas as melhores práticas de mercado usam técnicas de paletização e movimentação de produtos acabados com empilhadeiras para reduzir o impacto dos custos logísticos como, por exemplo, custo de estoque final e tempo de carregamento de sua frota de transportadores. Ainda assim dependem de grandes áreas, geralmente estratégicas e caras, para formação de estoques. Despachar seus produtos finais requer grandes estruturas para separação de produtos e pré-montagem das cargas para atender o varejo. Regularmente terceirizam essas tarefas o que impacta em maiores custos e desperdício de tempo.

A indústria de processamento de grãos para produção de *commodities*, como as de farinhas que abastecem o varejo (p.ex. farinha de trigo), é estrategicamente grande formadora de estoques de Matéria Prima e de Produtos Semiacabados. Essa dependência é gritante e requer grandes espaços e localização estratégicos. Sua dependência de fornecedores do exterior impõe um grande *leadtime* de ressuprimento, assim como, pesados custos de frete e câmbio. Suas robustas plantas físicas são construídas dentro desse cenário.

Formar grandes estoques de Matérias Primas, de Produtos Semiacabados e estar estrategicamente localizado faz o segmento enfrentar dificuldades crescentes quanto ao espaço disponível para suas operações, ainda que se utilizem intensamente de grandes silos (armazéns verticais). Exemplos podem ser vistos na Fig. 1.



Figura 1 – Silos– Multigrain, 36.000 ton – Moinho Pacifico, 90.000 ton – Porto de Santos, SP
Fonte: Site Google (2012)

Devido aos problemas e custos citados, áreas de carregamento de frota e movimentação de cargas extremamente restritas em espaço são muito comuns e quase uma imposição. A severa restrição de espaço delinea o ambiente real de carregamento estudado impondo um sistema de estacionamentos que atua como *buffers* contentores de tráfego (onde as filas de caminhões para a carga são formadas). Um grande estacionamento contém a oferta de transportadores e alimenta um pequeno bolsão interno de manobra limitado a poucos veículos.

As indústrias buscam disponibilizar sua produção com os menores estoques possíveis. Algumas empresas buscam dispensar suas cargas diretamente de dentro de suas plantas fabris em condições restritas de espaço. Um grupo ousado de empreendedores almeja não formar estoque de produtos finais. Uma solução é sincronizar, em tempo real, o processo de finalização de produtos com o processo de carregamento destes produtos em caminhões de transporte externo sem paletização nem empilhadeiras.

A adoção de veículos transportadores externos (que levam as cargas da indústria para o mercado consumidor) na movimentação industrial interna dos produtos acabados se apresenta como uma opção viável para a operação de carregamento dos produtos acabados. A produção é imediatamente transportada para consumo nos grandes centros urbanos. Essa operação poupa recursos e espaço, vislumbra o atendimento em tempo real a grandes centros urbanos e encurta o *leadtime* de processo (tempo de permanência de cargas no sistema). Contudo traz um alto nível de complexidade operacional. O comportamento estocástico dos fenômenos *entrada de cargas*, *composição de cargas* e *chegada de veículos*

origina problemas de *escalonamento* provocados por *precedências nas atividades e restrições de janela de tempo* (requisitos importantes para o adequado atendimento do carregamento).

Há um grande número de movimentos simultâneos de caminhões. Diferentes quantidades de um conjunto de tipos distintos de produtos compõem as cargas. Cargas e caminhões de capacidade máxima fixa entram sem repetição, sincronizados e em instantes aleatoriamente definidos, e são atendidos por qualquer um dos diferentes servidores paralelos do sistema. Cada servidor dispensa um único tipo de produto. Tal complexidade faz dessa operação um intrigante desafio.

Nesse ambiente, os produtos (diferentes tipos de *commodities*, e. g., tipo 1, tipo 2 e tipo 3) são concluídos, cada qual em um diferente ponto da planta fabril, nos quais os carregamentos das diferentes quantidades acontecem simultaneamente (nesse contexto cada servidor se ocupa de um único tipo de produto). Essa movimentação acontece sob restrições de espaço e tempo para poder seguir imediatamente (i. e., tão rápido quanto possível) ao mercado consumidor.

Restrições de espaço podem ser de três tipos e se referem às disputas pela ocupação de (1) vias de movimentação dos veículos, (2) áreas de carregamento e (3) áreas de espera. Restrições de tempo se dão tanto pelos limites impostos por requisitos operacionais e de qualidade, quanto pelo tempo real de movimentação e ocupação/desocupação dentro e entre áreas de carregamento e áreas de espera.

A partir desse cenário complexo, esta dissertação se propõe a avaliar e procurar contribuir para a elucidação dos limites teóricos que contêm o intervalo de variação de tempos médios de permanência num sistema que, em momentos distintos, é regido por diferentes políticas de escalonamento de *jobs* (cada *job* corresponde à um produto de uma carga) em seus servidores paralelos.

Encontramos pouca produção científica no contexto deste trabalho, trazendo forte interesse para a investigação. Entendemos que esta abordagem pode ser generalizada para outros ramos de atividade que a percebam como uma estratégia de posicionamento de mercado. Entendemos, também, que a abordagem pode ser usada como referência para o uso em outros sistemas que tenham características semelhantes (e. g., em computação para escalonamento de processos em sistemas operacionais).

1.2 Modelagem do problema

Descrevemos a seguir o recorte necessário para o procedimento de modelagem, com uma simplificação imposta ao cenário de carregamento simultâneo de *multi-commodities* embaladas dentro do ambiente fabril para que conclusões significativas possam ser obtidas.

Fatores que interferem no sistema são tanto fixados por necessidades estratégicas organizacionais, quanto por requisitos operacionais. Alguns não podem sofrer interferência da modelagem como por exemplo o tamanho da planta, o número e tipo de *commodities*, etc. Já os requisitos operacionais, tais como a disciplina de atendimento, o tempo médio de permanência, o tempo máximo de permanência podem sofrer interferência do gerenciamento externo.

Este modelo de processo proposto não paletiza produtos, não forma estoque de produtos finais. Ele acontece por movimentos simultâneos de diferentes veículos da uma frota de transportadores, sincronizadamente, com a finalização de produtos em diferentes servidores das linhas de produção.

Para a modelagem supomos um sistema de três servidores C_i paralelos ($i = 1, 2, 3$). O sistema é alimentado por três diferentes tipos de *Job* que compõem cargas cujos

entretempos de entrada estão distribuídos segundo uma determinada distribuição de probabilidade, inicialmente suposta exponencial negativa com taxa γ . A cada carga está associado um único transportador que movimenta e transporta seus respectivos *Jobs*. Todo transportador está inicialmente limitado a uma mesma capacidade máxima e transporta uma carga igual à soma de seus três *Jobs* (a carga total é composta pelas cargas feitas por cada um dos três servidores). Os três tipos de *Job* têm diferentes tamanhos que seguem diferentes distribuições de probabilidade (inicialmente também supostas exponenciais). A cada tipo i de *Job* esta associada uma diferente média $1/\mu_i$ de tempo de atendimento exponencial por um único servidor C_i . Inicialmente todos os servidores são idênticos em capacidade e velocidade de atendimento.

Toda carga entra no sistema necessariamente pelo primeiro servidor livre e, após a carga, segue diretamente para o próximo servidor livre. Sempre que não haja um primeiro servidor livre, a requisição aguarda numa fila externa. Sempre que não haja um próximo servidor livre, a requisição aguarda em uma fila de espera interna.

As filas de espera são decorrentes tanto das demandas de mercado (característica incontrollável) quanto do número de entidades em fila, ou número de servidores disponíveis, ou, ainda, o tempo total de permanência da entidade no sistema. Esses fatores são gerenciáveis e manipulados (controláveis) a partir de políticas de admissão e/ou escalonamento de *Jobs* nos servidores, modificando tanto os tempos de espera, quanto os perfis de distribuição de saída dos *Jobs*. Diferentes tipos de distribuições de probabilidade e de características dos servidores podem ser relaxadas no modelo de simulação e, portanto, condições bem mais diversificadas poderão ser avaliadas.

1.2.1 Objetivos da pesquisa

Identificaremos um modelo analítico de baixo/médio tráfego que descreva os limites

do intervalo de variação de tempos médios de permanência de multi-*commodities* num sistema de tempo real para três servidores paralelos atuando com diferentes políticas de escalonamento.

A partir do modelo analítico identificado, desenvolveremos e validaremos um modelo de simulação computacional por eventos discretos para aplicação no Carregamento Simultâneo Sem Estoque de *Commodities* Embaladas Dentro do Ambiente Fabril.

1.3 Metodologia do Trabalho

Apresentamos a seguir, iniciando pela Figura 2, a metodologia adotada e um resumo da análise do sistema em questão. As análises dos processos de abastecimento de matéria-prima, de produção de semiacabados, da oferta de transportadores, assim como do perfil de consumo de produtos não são objetos desta dissertação.

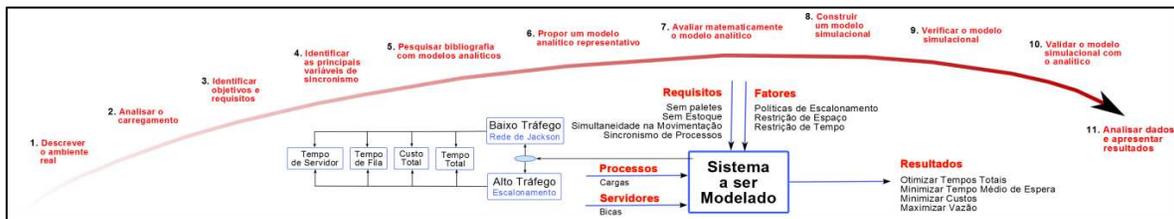


Figura 2 – Análise do Sistema e Abstração da metodologia

Descrevemos o ambiente industrial em pauta baseados em nossa experiência profissional. O entendimento e análise das características produtivas do cenário de carregamento estão baseados nos estudos de Morabito e Souza (2010), Bodek (2004), Sakurada e Myiake (2003) e Morabito (1998), permitindo sua classificação como um serviço tipo *Job-Shop*. A pesquisa por meio desses autores associada aos trabalhos de Saaty (1961) e Banks et al (2010) nos levaram ao modelo analítico que melhor representa o ambiente em estudo: as Redes de Jackson.

O software Arena® Student (http://www.arenasimulation.com/Arena_Home.aspx) da Rockwell Automation foi usado na construção do modelo de simulação. Trabalhamos inicialmente com um modelo básico que nos permitiu verificar e validar o modelo de simulação a partir do modelo analítico proposto. É importante dizer que a validação de um modelo deve ser feita por sua adequação com dados reais. Por outro lado, se não pudermos dispor de dados reais ou se estes não forem confiáveis, o modelo pode ser validado por comparação com um modelo analítico mais simples, mas cujo resultado é conhecido. Essa foi a nossa escolha, já que o modelo de redes de Jackson com distribuições de chegada e de serviço exponenciais e disciplina FIFO (*first in first out*) é bastante conhecido. Dessa maneira, os resultados da simulação foram completamente validados pelo modelo analítico das redes de Jackson. A partir daí estamos prontos para voos mais altos, com variação nas disciplinas de atendimento nas distribuições de probabilidade, etc.

Nossas conclusões são possíveis a partir da análise dos dados obtidos resultantes da simulação de modelos que incluíram módulos de mudança de modo de escalonamento e de controle de admissão de *Jobs* no sistema.

O sistema modelado é alimentado por instâncias, chamadas de processos e servidores, que no modelo real são, respectivamente, cargas (caminhões) e bicas. As instâncias são parametrizadas por: (1) características impostas pela estratégia organizacional e, também, por (2) necessidades comerciais e operacionais que nomeamos de Fatores operacionais. A dinâmica do sistema provoca alterações nos seus estados de tráfego (baixo ou alto) interferindo em variáveis como tempo e custo. Administrar essas características permite que gestores atinjam, ou não, os resultados planejados.

1.4 Organização do Trabalho

Este primeiro capítulo apresenta o ambiente real estudado e o contexto em que o trabalho está inserido, suas características relevantes, os problemas que motivaram a pesquisa. O Capítulo 1 também traz os principais objetivos e requisitos para o desenvolvimento dos modelos que estão sendo propostos, além de uma breve apresentação da metodologia desse trabalho. O Capítulo 2 descreve em detalhes o cenário real de carregamento e, a partir dele, as principais bases teóricas são apresentadas no Capítulo 3. O Item 3.1 aborda uma breve descrição da classificação do modelo de produção que contém esse estudo. A teoria de rede de filas está observada no Item 3.2. O Item 3.3 apresenta sucintamente o software de simulação por eventos discretos ARENA®. O Capítulo 4 traz os resultados do modelo de tráfego. Resultados e desenvolvimento do modelo de mudança dinâmica do modo de operação encontram-se no Capítulo 5. No Capítulo 6 apresentamos o modelo de simulação com controle de admissão e seus resultados. O trabalho se encerra com o capítulo 7 apresentando nossas considerações finais e propostas de projetos futuros.

2 UM CENÁRIO REAL

O modelo de empresa enfocada nesse estudo tem suas operações voltadas para o atendimento de grandes centros urbanos formado por indústrias de panificação, indústrias de alimentos e varejistas de todos os portes.

De forma geral, as empresas operam com uma equipe de transportes que associa cada carga demandada a um transportador por meio de uma negociação comercial de fretes (Fig. 3). Uma equipe de produção que, de posse das ordens de venda e a partir de estoques de semiacabados e/ou matérias primas, conclui os produtos ora demandados.

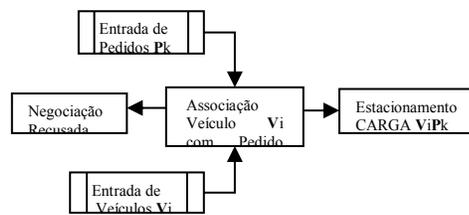


Figura 3 – Esquema de uma Negociação para Admissão de Veículos

Esses produtos processados em pequenos lotes são imediatamente envasados, majoritariamente em sacarias de 50kg, assim que seu transportador aporta no servidor (bica de carregamento) específico.

Outro time atua no carregamento das cargas. Profissionais retiram de esteiras transportadoras (Figura 5) a sacaria que é acomodada diretamente em veículos transportadores (Figura 4) em modo simultâneo e sincronizado com a finalização de produtos.



Figura 4 – Modelo de Carregamento por Bicas

Fonte: Site Calcinacaomax (2007)



Figura 5 – Modelo de Sistema de Movimentação Automática de Sacaria

Fonte: Site Imastec (2011)

Este modelo de carregamento de cargas realizado simultaneamente à finalização de produtos em pequenos lotes sob demanda, faz com que o carregamento seja um componente integrante do processo de finalização dos produtos. Só é possível acabar um produto quando seu transportador está disponível no servidor ou, bica de carregamento (Fig. 4). Assim, a movimentação das cargas é, neste caso, um elemento crítico da formação dos custos de produção.

Todo transportador entra no sistema por um único ponto: uma Balança de Entrada, e; sai por outro ponto único: uma Balança de Saída.

Outros fatores, aqui chamados de fatores potenciais, atuam no ambiente real. A disponibilidade de espaço nas faixas de movimentação de veículos é relevante, contudo não é foco deste projeto. Em plantas fabris com severa restrição de espaço, essas faixas são trechos de uma via que comportam apenas um veículo por vez e por direção. Esse comportamento é semelhante à movimentação por trilhos de trens em um pátio de manobras.

Outro fator potencial é a oferta de espaço nos servidores, que junto à restrição de espaço de movimentação imporá o uso, ou não, de uma das áreas de recuo (estacionamento interno). Este modelo supõe que cada servidor possui apenas uma posição de trabalho, ou seja, comporta apenas um transportador por vez.

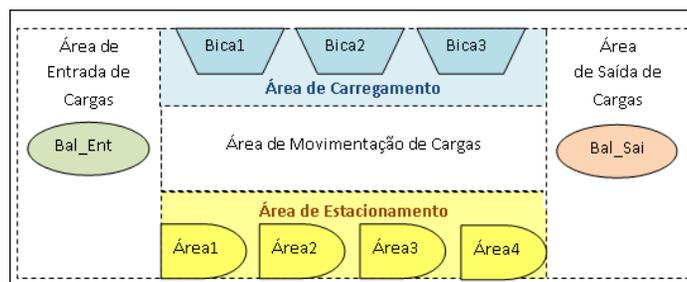


Figura 6 – Diagrama Esquemático de um Ambiente Industrial de Carregamento

2.1 Carregamento Simultâneo à Finalização de Produtos

A partir da disponibilização das informações da equipe de transportes, a equipe de carregamento planeja a movimentação dos veículos pela área de carregamento. Esse plano define a ordem de entrada de veículos na área de carregamento, a ordem de movimentação dos veículos e a sequência de produtos a serem carregados. Contudo há a possibilidade de exceções a essa regra. Conseqüentemente, há veículos que usarão áreas de acostamento, que são áreas de espera para carregar, pois, momentaneamente, não terão espaço para carregar.

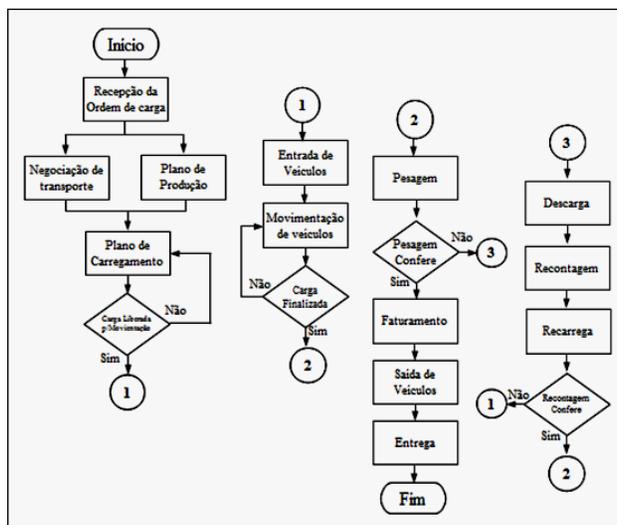


Figura 7 – Fluxograma de uma Operação de Carregamento

Cada transportador de posse de sua carga terá um fluxo de movimentação definido e gerenciado a partir de sua entrada na área de carregamento. Após a entrada, o primeiro ponto usual de parada é qualquer uma das bicas de carregamento. Essa definição depende do andamento da operação, da disponibilidade de espaço. O espaço de manuseio e movimentação das cargas é composto por três áreas bem definidas:

- a. Uma **área de carregamento** (cor azul na Figura 6) imediatamente em frente a cada bica – esta região com aproximadamente 20 metros de comprimento por 04 metros de largura, comporta um único veículo trucado por vez, espaço que toda e qualquer fração de carga é carregada;
- b. Uma área usada para **recuo ou acostamento** (área alaranjada da Fig. 6) de veículos – formada por regiões usadas para aguardar espaço de carregamento.
- c. Área ou via de trânsito – As **linhas de tráfego** (área branca da Fig. 6) e movimentação dos veículos são desenhadas de acordo com o *layout* da planta fabril. Esta é uma característica crítica, pois no geral, espaço é um bem escasso.

Os sacos são levados do envase ao veículo carregador por esteiras transportadoras automáticas. Dessa forma, o primeiro saco geralmente leva poucos minutos para chegar ao

transportador e, em condições ideais, os sacos seguintes, em intervalos de alguns segundos – tempos que dependem do padrão tecnológico adotado pela empresa.

Um trabalhador de uma dupla de carregadores recebe um saco na ponta da esteira, enquanto o outro profissional empilha outro saco no lastro (=assoalho) do caminhão. O processo se repete até que a carga se complete.

A decisão sobre qual o próximo veículo a ser carregado ou, qual a próxima bica em que um veículo encostará, é tomada pela equipe de movimentação. A complexidade da decisão é tão maior, quanto maior for o número de veículos sendo carregados simultaneamente.

Com a carga concluída, o veículo é direcionado para a pesagem final e saída. Eventualmente há divergência entre o peso medido e o peso esperado para a carga. Neste caso, a carga é conferida e pode ser necessário o total descarregamento, recontagem e correção.

3 ASPECTOS TEÓRICOS E CONCEITUAIS GERAIS DO SISTEMA

3.1 Classificação da Movimentação de Cargas com Caminhões Transportadores

Estamos voltados para a movimentação de cargas finalizadas em um sistema de produção de *commodities* em larga escala. Seus diferentes produtos são acabados em pequenos lotes sob demanda. Essa é uma característica de um sistema *discreto* de manufatura nos permitindo chamar de *Job* cada diferente lote de produto (Morabito, 1998, p17) que compõe uma carga. Eles interferem diretamente na operação do sistema, tanto pela variedade (escopo) de tipos de *Jobs* produzidos, quanto pelo volume (escala) de cada um dos tipos. As máquinas onde os *Jobs* são executados são chamadas de *Shops* e, presume-se que jamais tenham sua operação interrompida enquanto houver *Jobs* endereçados e disponíveis. Alguns tipos de sistema discreto de manufatura são descritos na Tabela 1.

Tabela 1 – Principais tipos de sistemas discretos de manufatura

<i>Job-Shop</i>	Processadores agrupados por similaridade de processo ou de função. Estoque próximo dos servidores que não podem parar.
<i>Flow-Shop</i>	Processadores alinhados para que os fluxos de <i>Jobs</i> sigam desde o primeiro até o último servidor de uma linha.
Manufatura Celular	<i>Job-Shop</i> em que os <i>Jobs</i> são agrupados em quantidades suficientes para que se justifique seu processamento em uma instalação exclusiva.
Linhas de Transferência	<i>Flow-Shop</i> automatizado em que todos os servidores atuam simultaneamente com movimentação sincronizada de todos os fluxos.
FMS - Sistema Flexível de Manufatura	Sistema Celular de Manufatura com alto grau de automação flexível em que <i>Jobs</i> visitam servidores em diferentes sequências.
Sistema <i>Flow-Shop</i> Flexível	<i>Flow-Shop</i> com automação flexível em que <i>Jobs</i> saltam servidores, o que provoca perda de sincronismo impondo estocagem intermediária.

Fonte: Adaptado de MORABITO (1998, p17-20)

Nosso sistema de movimentação de cargas tem capacidade de carregar (processar) simultaneamente diferentes tipos de produtos, sofre frequente limitação no volume de processamento, como consequência principal das dificuldades de controle. Sistemas como esse que são operados, caracteristicamente, com dificuldades em se produzir eficientemente

e economicamente grandes volumes, apresentando longos tempos de permanência no sistema (*leadtimes*) e altos níveis de materiais em processo (WIP = *work in process*), são classificados por Morabito (1998, p18) como sistemas do tipo *Job-Shop*.

Tabela 2 – Comparação de características de sistemas discretos de manufatura

Característica	<i>Job-Shop</i>	<i>Flow-Shop</i>	Celular
Tempo de Permanência do Produto no Sistema	alto	baixo	baixo
Estoque intermediário	alto	baixo	baixo
Flexibilidade de Produto	alto	baixo	médio
Flexibilidade de Demanda	alto	médio	médio
Utilização de Servidores	baixo	alto	médio
Custo Unitário de Produção	alto	baixo	médio

Fonte: Adaptado de MORABITO (1998, p20)

O sistema que estamos estudando não transforma matéria prima em produtos. Manuseia artigos já finalizados. Produz serviço. O processo de Movimentação de Cargas é, em si, a produção de um Serviço. Aqui, ele se confunde com o processo de Carregamento de Cargas: não é possível carregar sem que haja movimentação de cargas; não há movimentação sem que haja carregamento de cargas e; uma carga só é dada como carregada se todos os seus *Jobs* estiverem carregados integralmente.

Nossos produtos são *Jobs Carregados*. Sakurada e Myiake (2003) afirmam que um serviço não apenas cria o produto como, também e simultaneamente, o entrega ao cliente. Os clientes, aqui, são os transportadores externos que são carregados diretamente.

Os autores classificam um serviço por quatro características: intangibilidade; perecibilidade; heterogeneidade do produto; simultaneidade entre produção e consumo. Genericamente um serviço de movimentação de cargas é um produto intangível. O processo aqui delineado só pode ser executado se, e somente se, tanto *commodities* quanto transportador estão simultaneamente presentes e disponíveis nas quantidades demandadas; logo, estamos diante de um produto perecível. Cada lote demandado tem composição e quantidades distintas o que faz nosso produto ser altamente heterogêneo. E, para finalizar, ele é um processo que tem na simultaneidade um fator fortemente presente.

Sakurada e Myiake (2003) também definem serviços em três diferentes tipos. A Figura 8 apresenta a representação deste conceito.

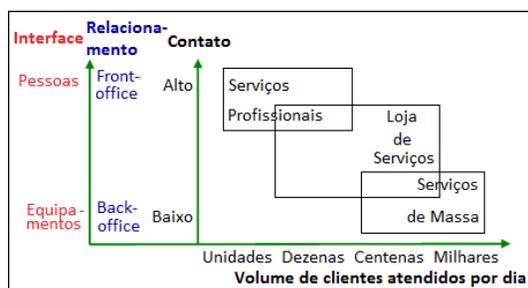


Figura 8 – Classificação dos serviços
 Fonte: Adaptado de Sakurada e Myiake (2003)

Serviços Profissionais são aqueles com intensa participação do cliente, alta especialização de pessoas e repetição de tarefas com baixa especificação. Quando especificação, padronização e divisão de tarefas podem ser feitas em larga escala, antes da entrada do cliente no processo e, com a possibilidade de trocarem-se pessoas por equipamentos, diz-se que há um *Serviço de Massa*. Um tipo intermediário aos anteriores é chamado de *Loja de Serviços* que se caracteriza por semelhança a hotéis, hospitais e restaurantes entre outros. Nesse, há grande especialização na preparação dos serviços, assim como no próprio serviço, que só pode ser prestado assim que o cliente está presente e disponível. Neste momento, o cliente passa a interagir com a operação, ou produção do serviço.

Desta forma podemos afirmar que o nosso processo de carregamento é um serviço tipo *Job-Shop* ou *Loja de Serviços*. Mesmo sendo imprescindível a presença do cliente, que é o transportador, a operação pode ter suas etapas operadas por equipamentos que deem apoio à eliminação de gargalos, como também é possível combinar diferentes níveis de especialização de tarefas na sua realização.

Esta classificação se fortalece com a consideração de que, neste ambiente, a quantidade de clientes atendidos ou, com possibilidade de ser atendido, gira em torno de algumas dezenas ou centenas por ciclo de trabalho (dia).

3.2 Rede de Filas

3.2.1 Aspectos Gerais

O conceito de fila parte da ideia intuitiva de aguardar para ser atendido, experimentada na vida moderna, i.e., ao irmos a um banco, supermercado, médico, quando precisamos de atendimento em serviços de telefonia, ou, quando nosso computador precisa de uma resposta nossa para executar uma tarefa. Da mesma maneira, o sistema *Job Shop* descrito anteriormente passa por problemas de contenção, ou seja, questões de espera, perda ou vazão e, portanto, pode ser modelado como um sistema de filas.

Em geral uma fila se relaciona com o meio externo por meio das entradas e saídas de cliente, tal qual em bancos, supermercados e médicos. Nesse caso os sistemas formam (OQN – *Open Queueing Network*) redes abertas de filas (Fig. 9).



Figura 9 – Rede aberta de filas (OQN)

Documentos que são processados unicamente dentro de um determinado ambiente, como, por exemplo, o controle de cheques dentro de uma câmara de compensação bancária, é um (CQN – *Closed Queueing Network*) sistema de rede fechada de filas (Fig. 10). A característica desse sistema é que o número total de *Jobs* no sistema é constante.

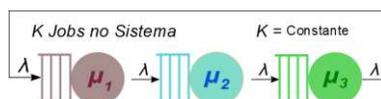


Figura 10 – Rede fechada de filas (CQN)

Também com o número total constante de *Jobs* (Fig. 11) é um sistema (CQN) de rede fechada de filas com entradas e saídas simultâneas pelo mesmo servidor. Esse modelo é comum em sistemas logísticos como, por exemplo, estacionamentos de veículos ou, linhas de produção e/ou manufatura.

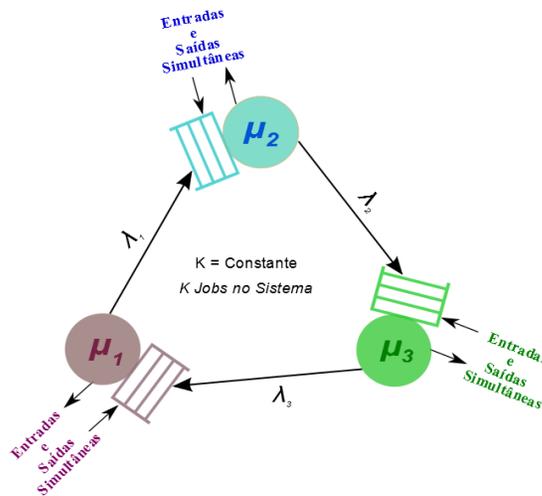


Figura 11 – Rede fechada de filas (CQN) com entradas e saídas simultâneas por um mesmo servidor

Convém ressaltar que os modelos teóricos devem ser validados aos casos práticos. Nem sempre, na prática, todos os aspectos teóricos são verificados. No entanto, muitas vezes é suficiente que o modelo descreva as principais características do problema real e, a partir dele, várias hipóteses possam ser testadas e verificadas.

As teorias sobre filas têm sido desenvolvidas e tratadas desde o final do século XIX por pesquisadores como Erlang, Markov, Poisson, Kleinrock, Jackson, Tàkacs. Nas últimas décadas tem sido foco de trabalhos de matemáticos, engenheiros estatísticos, entre outros, nos mais diversos centros de pesquisa do mundo. Hoje, dispomos de notações específicas sobre o tema. Adotamos a Notação de Kendall, descrita em FREITAS (2008, cap.8), por ser a mais usada no meio acadêmico e aqui apresentada na Tabela 3.

Tabela 3 – Notação de Kendall A/S/M/B/K/SD

A	Distribuição do tempo de chegada;
S	Distribuição do tempo de serviço;
M	Número de servidores;
B	Capacidade do sistema (tamanho da fila);
K	Tamanho da população;
SD	Disciplina de serviço.
	Se não especificado B e K são considerados infinitos e o tipo de disciplina de serviço é definido com FIFO.
	As chegadas são individuais.

Fonte: Adaptado de FREITAS (2008, cap.8)

A Tabela 4 a seguir, apresenta notação e descrição das variáveis e indicadores de desempenho mais usados na teoria das filas e que estarão presentes ao longo do desenvolvimento desse trabalho.

Tabela 4 – Notação de variáveis nos modelos de fila

m	¹ Quantidade de servidores idênticos
λ	¹ Taxa média de chegada, de clientes ($\lambda = 1/E[\tau]$)
s	¹ Tempo de serviço (de atendimento) de um cliente
μ	¹ Taxa média de serviço por servidor ($=1/E[s]$). Para m servidores, a taxa média de serviço é $m\mu$
L	² Quantidade total de clientes no sistema
L_q	² Quantidade de clientes aguardando atendimento
L_s	² Quantidade de clientes em serviço
w	² Tempo de resposta do sistema (<i>sojourn time</i>). Ou tempo total de residência dos clientes dentro do sistema de fila (tempo de espera + tempo de atendimento)
w_q	² Tempo de espera para ser atendido
ρ	¹ Utilização do servidor ($= \lambda / \mu$)
B	¹ Tamanho da fila, quando esta for finita (tamanho do Buffer)
τ	¹ Tempo interchegadas ($E[\tau]= 1/ \lambda$)

Fonte: Adaptado de ¹PINHEIRO (2010, p25) e ²BANKS (2010, p235)

Todo sistema define critérios e regras para ordenar a entrada dos *Jobs* nos processadores. Esses critérios e regras são chamados de Políticas de Escalonamento. A política de enfileiramento mais adotada é a FIFO (Tabela 5), na qual o primeiro *Job* a chegar é o primeiro a ser atendido. Nessa política a característica observada no *Job* é o tempo declarado pelo instante de entrada na fila do servidor ou, no sistema (ver, também, LIFO, SIRO e GD na Tab.5).

Tabela 5 – Principais políticas de atendimento

FCFS/FIFO	<i>First Come First to be Served</i>
LIFS/LIFO	<i>Last In First to be Served</i>
SIRO	<i>Select In Random Order</i> (atendimento aleatório)
GD	Distribuição genérica
RD	Atendimento Baseado em Prioridade
SJF/SPT	<i>Shortest Job First</i>
LJF/LPT	<i>Largest Job First</i>

Fonte: Adaptado de PINHEIRO (2010, p25)

Além do tempo, o tamanho do *Job* é outra característica que pode ser avaliada para a ordenação de filas. SJF e LJF, na Tabela 5, são os principais exemplos de ordenação por tamanho de *Job*. Nos problemas de telecomunicações e/ou computação, em geral não se conhece o tamanho dos *Jobs* e, portanto, não se pode adotar esse tipo de disciplina. No problema de *Job-Shop* em pauta, o tamanho dos *Jobs* é conhecido, o que representa uma boa vantagem para a modelagem. O atendimento baseado em prioridades RD é um tipo de escalonamento que pode observar características de tempo, tamanho, e/ou outras.

Iniciados os trabalhos de um sistema sob alguma condição de partida, o desempenho médio planejado demora algum tempo para ser atingido. Nesse intervalo de tempo as variações de desempenho são maiores que o esperado. A esse intervalo de tempo a literatura chama de regime transiente e, a partir dele, o sistema entra em regime estacionário, ou permanente. No regime permanente os resultados de desempenho se estabilizam. Veja a Figura 12.

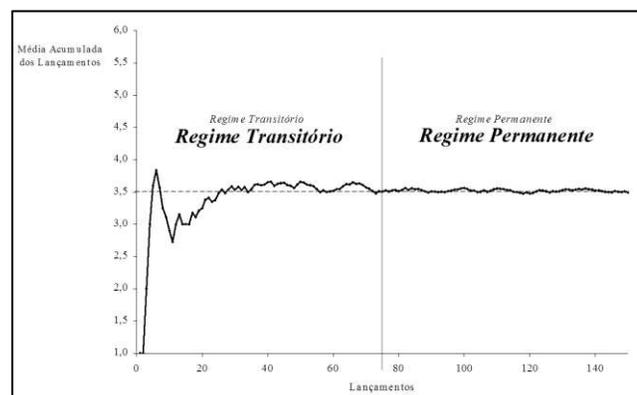


Figura 12 – Regime Transitório vs. Regime Permanente.

Fonte: adaptado de <www.livrosimulacao.eng.br/download/Cap_6_Saida.ppt>

Várias técnicas têm sido desenvolvidas para a determinação do regime transitório ou, tempo de *warm-up*. CHWIF (2010, p136) afirma que o modo mais prático é através da observação como na Figura 12. As práticas de simulação por eventos discretos adotam o tempo de *warm-up* como 10% do tempo total das corridas longas.

3.2.2 Processos de Poisson

Dessa maneira, como apresentado no Item 3.1 o processo a ser modelado é abordado como um serviço tipo *Job-Shop* em que sua operação motiva uma abordagem pela teoria de redes de filas.

Banks et al (2010, p212) definem modelos matemáticos para redes de filas tipo *Job-Shop* quando as distribuições de probabilidade de suas variáveis se apresentam, de forma específica, como curvas exponenciais negativas. Eles são ditos Poissonianos (Fig. 13) quando: (1) as ocorrências das variáveis são independentes entre si e do tipo “uma por vez”, (2) quando as quantidades de ocorrências $N(t)$ por intervalo de tempo $t+s$ dependem apenas do tamanho s do intervalo e não dependem do momento inicial t desses intervalos e (3) quando as i diferentes quantidades de ocorrências $N_i(t)$ de seus respectivos diferentes intervalos s_i são independentes entre si.

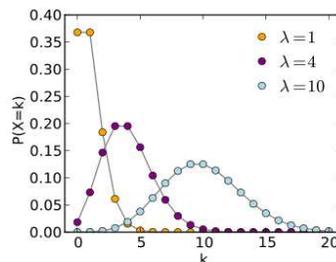


Figura 13 – Curvas de Poisson

Fonte: http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/1/16/Poisson_pmf.svg

A expressão matemática (1) descreve essas funções de distribuição de probabilidade para uma determinada quantidade de ocorrências $N(t) = n$, como função da taxa média total

λ de entrada de *Jobs* no sistema, do tamanho t do intervalo de ocorrência e desta quantidade n .

$$P[N(t) = n] = \frac{e^{-\lambda t} (\lambda t)^n}{n!}, \quad t \geq 0 \text{ e } n = 0, 1, 2, \dots \quad \text{eq.(1)}$$

Os autores demonstram que uma distribuição exponencial negativa (que é contínua) é um caso especial da de Poisson (que é discreta) em que no primeiro intervalo $[0, t]$ não ocorrem chegadas e, assim, ela é descrita pela expressão (2), a partir da expressão (1),

$$P[N(t) = 0] = \frac{e^{-\lambda t} (\lambda t)^0}{0!} = e^{-\lambda t} \quad \text{eq.(2)}$$

Como a distribuição exponencial tem função densidade de probabilidade (PDF) $f(t) = \lambda e^{-\lambda t}$, sua função de distribuição acumulativa (CDF) é dada por sua respectiva integral, ou seja, $F(T \geq t) = 1 - e^{-\lambda t}$ (que representa o tempo entre chegadas maior que um valor t qualquer). Por sua vez, se o tempo entre chegadas é menor que um valor t , $F(T < t) = e^{-\lambda t}$, ele representa exatamente a mesma situação descrita pela equação (2), ou seja, de que haja zero (0) chegadas entre dois instantes consecutivos. Portanto, dizer que há zero chegadas entre dois instantes consecutivos (Poisson) equivale a dizer que a distribuição entre chegadas consecutivas é exponencial. A distribuição exponencial vale para $t > 0$ e possui $E[T] = 1/\lambda$. Portanto, na notação de Kendall M/M/1, ao se utilizar a primeira letra M se diz que o processo de chegadas é Markoviano, ou, sem memória (Memoryless), o que é o mesmo que dizer que entre chegadas consecutivas ele é exponencial ou, que as chegadas seguem a distribuição de Poisson. No caso da segunda letra M, é o mesmo que dizer que o serviço possui distribuição exponencial (como se está falando em serviço, não é necessário, neste caso, mencionar a distribuição de Poisson). Outros aspectos importantes relacionados à modelagem (e compreensão do problema abordado) por redes de Jackson dizem respeito à decomposição ou superposição de processos de Poisson.

Decomposição de Processos – Em um processo de Poisson em que, para $N(t)$ em

que a média é $1/\lambda$, se $N(t)$ é igual a $(N_1(t) + N_2(t))$, sendo $N_1(t)$ com média $1/\lambda_1$ e $N_2(t)$ com média $1/\lambda_2$ para $\lambda_1 \neq \lambda_2$, então $\lambda = \lambda_1 + \lambda_2$. Se as probabilidades de ocorrência de $N_1(t)$ é p e $N_2(t)$ é $(1 - p)$, então o valor de $\lambda_1 = p\lambda$ e o valor de $\lambda_2 = \lambda(1 - p)$. Assim, $\lambda = p\lambda + (1 - p)\lambda$, conforme a Fig. 13.

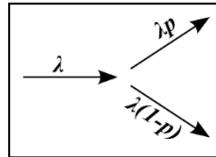


Figura 14 – Decomposição de Processos de Poisson
 Fonte: Adaptado de Banks (2010, p213)

Superposição de Processos – Em um processo de Poisson em que, $N_1(t)$ tem média $1/\lambda_1$ e $N_2(t)$ tem média $1/\lambda_2$ para $\lambda_1 \neq \lambda_2$, se $(N_1(t) + N_2(t)) = N(t)$, e $N(t)$ tem média $1/\lambda$, então $\lambda_1 + \lambda_2 = \lambda$.

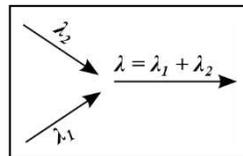


Figura 15 – Superposição de Processos de Poisson
 Fonte: Adaptado de Banks (2010, p214)

3.2.3 Redes de Jackson

Como apresentado no Item 3.1 o processo a ser modelado é abordado como um serviço tipo *Job-Shop* em que sua operação motiva uma abordagem pela teoria de redes de filas. Integrando essa teoria temos as Redes de Jackson. Uma representação gráfica de redes de Jackson pode ser vista na Fig. 16.

O Teorema de Jackson estabelece que em uma rede de filas com m nós, cada nó fornece um serviço com C_i servidores (*Shops*) idênticos e independentes, cada qual atendendo com tempo médio igual a $1/\mu_i$ de uma distribuição probabilística exponencial. As entradas externas em um nó qualquer dessa rede têm os intervalos de tempo, entre

qualquer par de *Jobs* consecutivo, sempre seguindo uma distribuição probabilística exponencial com taxa γ .

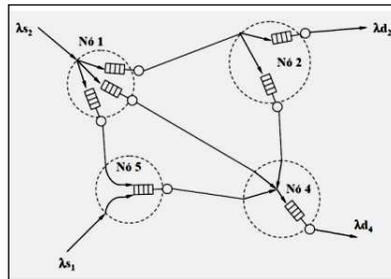


Figura 16 – Modelo de Rede de Jackson
 Fonte: Pinheiro (2010)

Qualquer *Job* que saia de um nó vai imediatamente para o próximo nó, com uma probabilidade k_{ij} , ou sai do sistema com probabilidade $1 - \sum_j k_{ij}$. As filas (*buffers*) têm tamanho infinito e a taxa média total λ_i de entrada de *Jobs* no sistema é dada pela equação [3] (Banks, 2010, p263).

$$\lambda_i = \gamma + \sum_j k_{ji} \lambda_j \quad \text{eq.(3)}$$

No modelo de Jackson, cada servidor se comporta como um sistema M/M/1 e, para serviços de média $1/\mu$, a variância σ^2 em (4) é o quadrado da média e o desvio padrão (5) é igual a média. Essa é uma peculiaridade muito conveniente do modelo M/M/1.

$$\sigma^2 = \frac{1}{\mu^2} \quad \text{eq.(4)}$$

$$\sigma = \frac{1}{\mu} \quad \text{eq.(5)}$$

As equações de cálculo dos parâmetros são bem conhecidas, descritas por BANKS (2010, p250) e apresentadas na Tabela 6.

Tabela 6 – Parâmetros nos modelos de fila M/M/1 em Estado Estacionário

λ	$1/E[\tau]$
s	$\frac{1}{\mu}$
μ	$1/E[s]$
L	$\frac{\lambda}{\mu - \lambda}$
L_q	$\frac{\lambda^2}{\mu(\mu - \lambda)}$
L_s	$L - L_q$
w	$\frac{1}{(\mu - \lambda)}$
w_q	$\frac{\lambda}{\mu(\mu - \lambda)}$
ρ	$\frac{\lambda}{\mu}$
τ	$1/\lambda$

Fonte: Adaptado de BANKS (2010, p250)

Sistemas cujas distribuições de probabilidade de uma ou mais variáveis não são exponenciais ou, quando as taxa de serviço nos servidores não são independentes entre si, são chamados de sistemas de filas genéricas. Nesse caso, a modelagem não pode ser feita por redes de Jackson, mas por simulação por eventos discretos.

O serviço descrito no Item 3.1 é a fase final de um processo que se inicia com demandas diárias reais alimentando linhas de fabricação a partir dos interesses de consumidores. Tanto a frequência dessa alimentação, quanto o intervalo de tempo entre cada pedido colocado na planta fabril, como a combinação de diferentes produtos de um pedido, assim como as quantidades de cada produto por requisição flutuam de acordo com os interesses momentâneos do mercado a cada dia. Produtos distintos em quantidades distintas, lotes que nomeamos de *Jobs* são carregados em diferentes pontos (*Shops*) do layout fabril. Isso é um Modelo de Fila que podemos denominar de Rede de Jackson Genérica. Eles são motivados por casos em que para cada *Shop* associam-se processos de chegada ou de serviço, ou ambos. Seus respectivos intervalos de tempos entre sucessivas chegadas e, ainda, seus respectivos tempos de atendimento ao serviço podem seguir distribuições probabilísticas. Essa aleatoriedade pode provocar filas de espera de *Jobs* a serem carregados em seus respectivos *Shops*.

Dessa forma, o sistema real em estudo pode ser caracterizado como um Sistema Aberto de Redes de Filas Generalizadas com Múltiplas Classes de Produtos. Suas variáveis são os interesses reais de consumo do mercado, cujos comportamentos seguem distribuições probabilísticas. Seus diferentes produtos podem ser agrupados por diversas faixas de quantidades compreendidas como múltiplas classes. Morabito (1998) aponta que esse tipo de sistema é caracterizado por resultados precisos, que demandam pouco esforço computacional e requerem poucos dados de entrada. O modelo delineado é formado em seu núcleo por um Sistema Fechado de Rede de Filas que se diferenciam por apresentar interdependência interna entre as filas. O autor defende que sistemas fechados de redes de filas podem ser representados artificialmente com chegadas e saídas externas de *Jobs*, definindo-se estações de carga e descarga instantânea (Fig. 17).

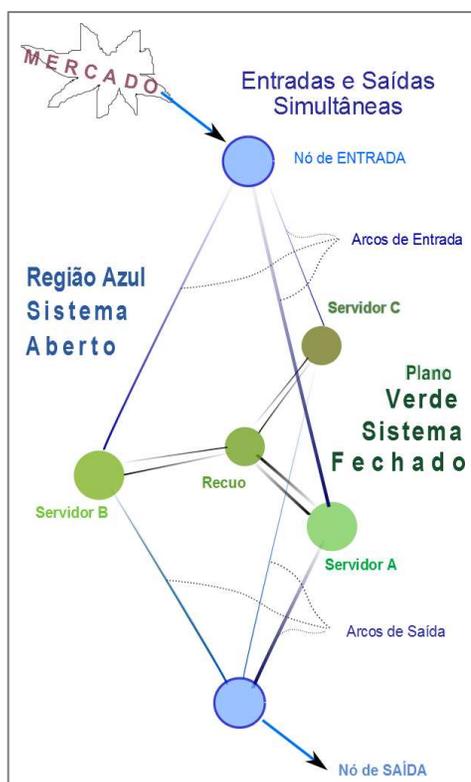


Figura 17 – Modelo Tridimensional do Sistema Aberto de Rede de Filas Genérico

Para isso, para cada saída de um *Job* de uma estação, deve ocorrer uma entrada instantânea de outro *Job* na mesma estação. Uma dada política de escalonamento define a tomada de decisão sobre qual *job* será o próximo a ser servido em uma das estações de trabalho.

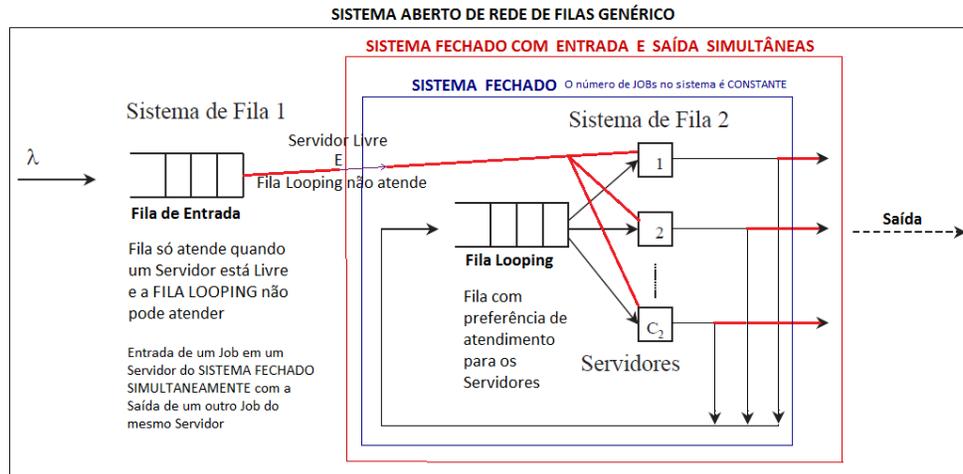


Figura 18 – Esquema do Sistema de Rede de Filas no Modelo

Essa política será adotada depois do teste de alguns algoritmos ou, pelo uso de algumas funcionalidades do Arena®. Morabito (1998) discute que “uma alocação insuficiente de capacidade nesses sistemas” (tipo *Job-Shop* modelados com Redes de Jackson Generalizadas), “pode causar altos níveis de *WIP* e longos *leadtimes*, por outro lado, o excesso de capacidade pode resultar em desperdício de recursos onerosos, devido aos baixos níveis de utilização”.

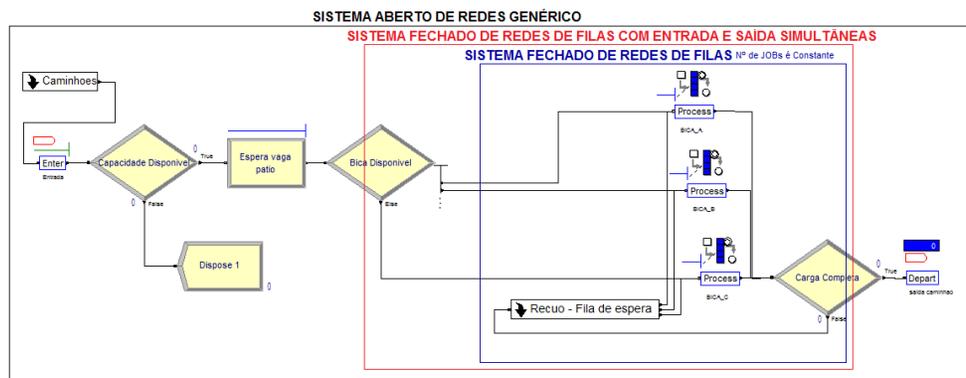


Figura 19 – Esquema Lógico do Sistema de Rede de Filas no Modelo

3.3 Modelagem Simulacional com Software Arena®

O ARENA® é um ambiente gráfico integrado de simulação, que contém todos os recursos para modelagem de processos, desenho & animação, análise estatística e análise de resultados.



Figura 20 – Tela de Inicialização do Software Arena®

Fonte: Rockwell Automation (2012)

O ARENA® une os recursos de uma linguagem de simulação à facilidade de uso de um simulador, em um ambiente gráfico integrado. A linguagem incorporada ao ARENA® é o SIMAN. A tecnologia diferencial do ARENA® é a criação de templates, ou seja, uma coleção de objetos/ferramentas de modelagem, que permitem ao usuário descrever o comportamento do processo em análise, através de respostas às perguntas pré-elaboradas, sem programação, de maneira visual e interativa. Pela utilização de templates (cartuchos de customização), o ARENA® pode transformar-se facilmente em um simulador específico, sendo ele para reengenharia, transporte de gás natural, manufatura, mineração e outros. Abaixo algumas das principais funcionalidades do sw ARENA®:

- 1 Modelagem por Fluxogramas.
- 2 Compatível com MS Office e Windows 7.
- 3 **CONEXÕES:** Excel, PowerPoint, Access, incluindo C++, Visual Basic e Java.

- 4 **TECNOLOGIAS:** ActiveX / OLE 3.0 Automation.
- 5 **VBA:** Automatizar tarefas, inserir multimídia, desenvolver ferramentas de treinamento.
- 6 **WIZARD/ASSISTENTE:** Ajuda na criação de modelos.
- 7 **HELP:** Manuais on-line e help com novos recursos.
- 8 **BIBLIOTECAS:** Extensa biblioteca de desenhos para interface animada.
- 9 **MACROS:** Suporta gravação de macros para automação de tarefas.
- 10 **FINDING ERRORS:** facilita e encontro de erros no modelo.
- 11 **REPORTS:** Relatórios do modelo.
- 12 **SYMBOL FACTORY:** Uma biblioteca com mais de 4 mil imagens para indústria, incluindo bombas, tubulações, válvulas, tanques, motores e outros. Para cada representação em imagem pode ser incluídos dados de entrada, capacidade, vazão e outros que diferem conforme o tipo.
- 13 **INPUT ANALYZER:** Ferramenta auxiliar para tratamento de dados e análises de resultados. Podem ser gerados de números aleatórios dentro de uma distribuição pré-estabelecida pelo usuário, e também o encontrar a melhor distribuição para os dados de entrada fornecidos pelo usuário.
- 14 **SMART:** Biblioteca de arquivos (exemplos) desenvolvidos para treinamento ou uso como ferramenta de referência para auxiliar na construção de modelos. São modelos prontos com explicação.
- 15 **EXCEL:** Leitura e gravação facilitada em planilhas Excel. A linguagem do ARENA® possui comandos que fazem esta troca de dados sem a necessidade de codificação em VBA, lendo ou gravando diretamente entre variáveis do modelo e células de dados da planilha.

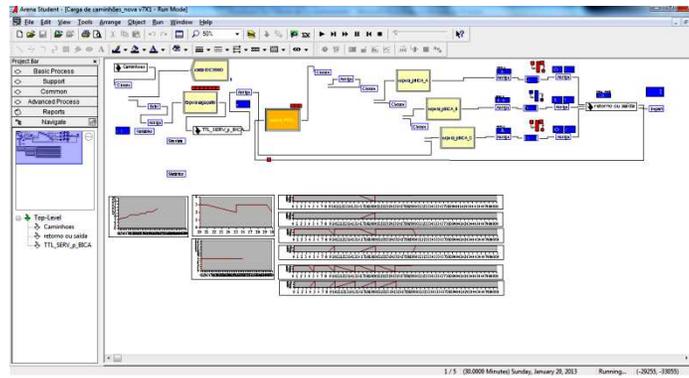


Figura 21 – Modelagem por Blocos Lógicos

Para que um modelo retrate um determinado ambiente é preciso que este ambiente seja decodificado através de alguns conceitos, aqui descritos por Banks et al (1996) apud Sakurada e Myiake (2003):

Elementos de Modelagem – Qualquer objeto ou elemento do sistema que requer representação explícita no modelo de Simulação (Ex.: funcionário, cliente, máquina, etc.);

Atributo – Propriedades das entidades (Ex.: tipo de cliente, tipo de pedido);

Filas – Coleções de entidades, ordenadas de acordo com alguma lógica (ex.: FIFO, LIFO);

Eventos – Ocorrências que alteram o estado do sistema considerado (ex.: chegada de um cliente);

Atividades – Durações de tempo especificado (ex.: tempo de atendimento, intervalo de chegadas). Podem ser definidas de maneira: A) determinística; B) estatística; C) através de uma função que dependa das variáveis do sistema ou de atributos das entidades;

Movimentações – Roteamento das entidades e recursos do sistema.

Estes elementos e conceitos permitem que o ambiente estudado seja devidamente traduzido para uma interface lógica e gráfica que executa a simulação no ambiente computacional como mostra a Figura 22.



Figura 22 – Modelo Demonstrativo de Simulação 3D no Arena 14.0

Fonte: Rockwell Automation (2012)

O entendimento do ambiente em suas condições normais de trabalho permite ao profissional de modelagem e simulação que abstraia suas principais características e requisitos da modelagem. A Figura 23 traz uma abstração sobre a definição de requisitos para políticas de escalonamento de *Jobs*.

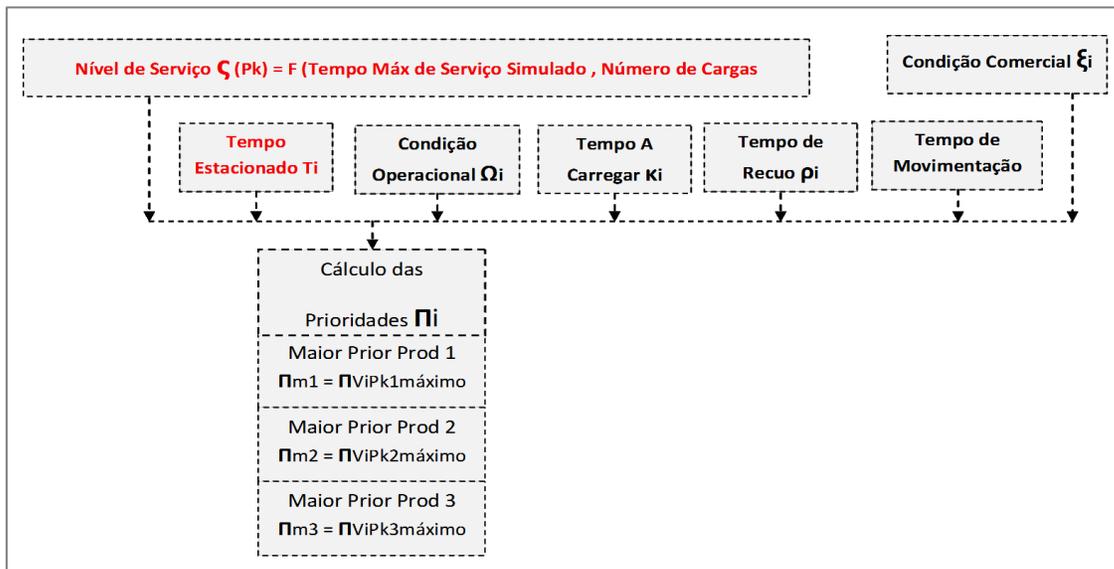


Figura 23 – Prioridades de políticas de escalonamento de *Jobs*

Os aspectos teóricos e conceituais trazidos nos permitem seguir com o desenvolvimento dos modelos analítico e simulacional de tráfego do capítulo 4 para a realização dos experimentos.

4 DESENVOLVIMENTO DOS MODELOS DE TRÁFEGO

Os modelos desenvolvidos consideram simplificações e restrições em relação ao sistema real, tais como: três servidores, seis ordens de carregamento em operação simultânea, seis veículos de transporte, seis recuos (vagas para espera por carregar), um ponto de entrada e um ponto de saída distintos entre si, três tipos de produto, sendo um único tipo para cada servidor.

Uma vez definidas as condições do problema, para fazer a modelagem é necessário abstrair suas principais características (sem deixar de lado os principais conceitos e aspectos teóricos) sem que se percam os aspectos fundamentais relacionados aos vários tipos de requisitos do sistema: espera, perda, vazão, etc. Os requisitos de espera estão ligados aos tempos médio e máximo de permanência no sistema e os requisitos de perda e de vazão estão ligados à questão do volume de tráfego e ao emprego do controle de admissão.

Um modelo de simulação deve ter referências da operação do sistema no mundo real. Isso é muito importante para efeito de validação do modelo. Uma vez validado e verificado, o modelo de simulação tem flexibilidade suficiente para que outras situações não possíveis de observar no mundo real sejam reproduzidas e testadas. Mas há situações em que os dados reais (de campo) são poucos, insuficientes ou não-confiáveis. Nesse caso, um modelo analítico que possua resultado conhecido pode ser utilizado como referência (no caso é o de redes de Jackson). No presente caso, como o modelo de referência é o analítico, o modelo de simulação deve procurar reproduzi-lo para posteriormente ir se tornando mais sofisticado e mais próximo do problema real. Lembrando que quanto mais simples o modelo de simulação, melhor (desde que reflita corretamente o problema real, ou seja, de que seja devidamente verificado e validado).

4.1 Modelo analítico para carregamento de commodities ensacadas

Antes mesmo de iniciar a modelagem de simulação por eventos discretos, deve-se avaliar se o modelo analítico de fato representa as características do problema levantado nos itens anteriores, ou seja, se a rede de Jackson descreve adequadamente o problema proposto. Para desenvolvimento do trabalho supõe-se que os caminhões têm três tipos de produto: A, B e C. Cada produto tem sua bica (servidor) específica para ser abastecido (Bicas A, B e C).

Podemos imaginar o sistema como formado por três bicas com três estágios. Quando uma carga inicial chega ao sistema com λ , cada uma das bicas recebe um produto com $\lambda/3$. Podemos imaginar um sistema em que as bicas tenham três estágios, como na Fig. 24. Quando uma bica recebe uma taxa $\lambda/3$, na próxima vez ela também pode receber a mesma taxa $\lambda/3$, agora devido a cada uma das outras duas bicas. As figuras Fig.25 e Fig.26 mostram que cada bica recebe, de fato, uma taxa total λ .

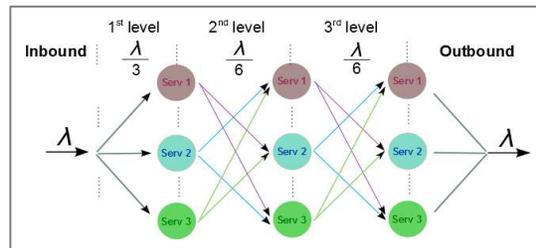


Figura 24 – Representação do sistema com 3 bicas

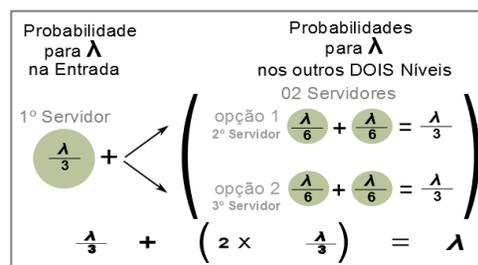


Figura 25 – Representação da taxa λ de entrada num sistema com 3 bicas

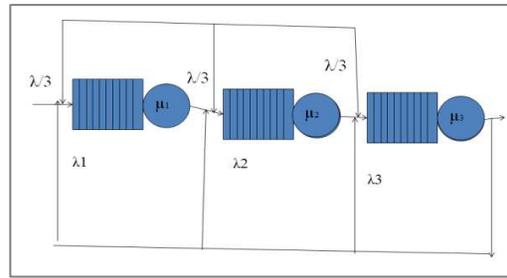


Figura 26 – Representação da realimentação do sistema com 3 bicas

Simplificando, poderíamos representar as três bicas em série, cada uma recebendo uma mesma taxa λ , como na Fig. 27.

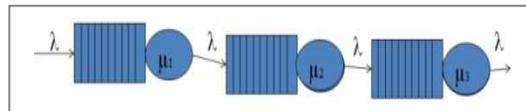


Figura 27 – Representação do sistema equivalente com 3 bicas

Para que um sistema de filas possa ser avaliado como uma rede de Jackson, é preciso que:

- 1 Uma rede de filas possui m nós, cada nó fornece um serviço independente com distribuição exponencial;
- 2 Todos os itens que entram na rede de filas (de fora) possuem distribuição de Poisson (ou seja, exponencial entre chegadas consecutivas);
- 3 Qualquer item que sai de um nó vai imediatamente para o próximo nó, com uma probabilidade p , ou sai do sistema.

Dessa maneira, para ser tratada como uma rede de Jackson, em cada nó, tanto a distribuição de serviço quanto a distribuição entre-chegadas devem ser exponenciais, ou seja, o sistema deve ter comportamento markoviano. Pelas hipóteses das distribuições serem markovianas e pelas propriedades da **Decomposição** e da **Agregação** vistas anteriormente, podemos supor que o modelo em pauta é de fato uma Rede de Jackson.

Neste ponto é importante ressaltar a importância do modelo de simulação porque, na prática, podemos encontrar vários outros tipos de distribuição de probabilidade, tanto para as chegadas quanto para o serviço (por exemplo, lognormal, Weibull, Pareto, etc.), o que inviabilizaria a utilização do modelo analítico simplificado. No entanto, a importância desse modelo é a de servir como referência para o modelo de simulação e, portanto, ajudar a validá-lo. Nas mesmas condições do modelo analítico, o modelo de simulação deve apresentar resultados similares. Cabe ressaltar que o modelo da rede de Jackson fica sem validade (talvez valha aproximadamente) quando uma mesma instância transita novamente por uma mesma fila (não permite realimentação da instância) porque no seu retorno a chegada não mais será poissoniana (será não-markoviana). No nosso exemplo, temos o retorno da instância (que é o caminhão), mas não para a mesma fila, porque o caminhão transita entre bicas diferentes. O exemplo numérico a seguir poderá ajudar-nos a avaliar por meio de simulação se o problema é equivalente a uma Rede de Jackson.

4.1.1 Exemplo numérico Caminhões

Tempo médio de carga na Bica A = 20 min, na Bica B = 15 min e na Bica C = 10 min. A taxa de chegadas é de 2 caminhões/hora ou 1/30 caminhão/min. Portanto, $\mu_1 = 1/20$ atendimentos/min, $\mu_2 = 1/15$ atendimentos/min e $\mu_3 = 1/10$ atendimentos/min. A suposição, para a aplicação do teorema de Jackson é de que o sistema seja todo markoviano (tanto as chegadas quanto o serviço).

4.1.2 Resultado do modelo analítico

Conforme o teorema de Jackson, pela Fig. 27 (notem que a probabilidade de passar de um nó para outro, nesse caso, é $p = 1$), o tempo de residência em cada nó será $E[r_i] = \frac{1}{\mu_i - \lambda_i}$. Para o nó 1, $E[r_1] = 1/(1/20 - 1/30) = 60$ min, para o nó 2, $E[r_2] = 1/(1/15 - 1/30) = 30$ min, e para o nó 3, $E[r_3] = 1/(1/10 - 1/30) = 15$ min. Portanto, o total da espera

média nesse sistema (tempo de residência) será $E[r] = 60 + 30 + 15 = 105$ min na condição de disciplina de atendimento FIFO. Esse valor deve ser o mesmo para o modelo de simulação, nas mesmas condições. Para esta fase inicial dos testes, a variável que parece mais significativa e, portanto, foi escolhida, é o tempo de permanência ou de residência no sistema.

4.1.3 Modelo de simulação equivalente à rede de Jackson

Para efeito de comparação, os tempos serão os mesmos do modelo analítico:

tempo médio de carga na Bica A = 20 min, na Bica B = 15 min e na Bica C = 10 min. A taxa de chegadas é de 2 caminhões/hora ou 1/30 caminhão/min. Portanto, $\mu_1 = 1/20$ atendimentos/min, $\mu_2 = 1/15$ atendimentos/min e $\mu_3 = 1/10$ atendimentos/min. Neste caso, as chegadas também são poissonianas (exponencial entre chegadas consecutivas) e a duração do serviço é exponencial. A Fig. 28 mostra a visão geral do modelo de simulação no sw Arena®:

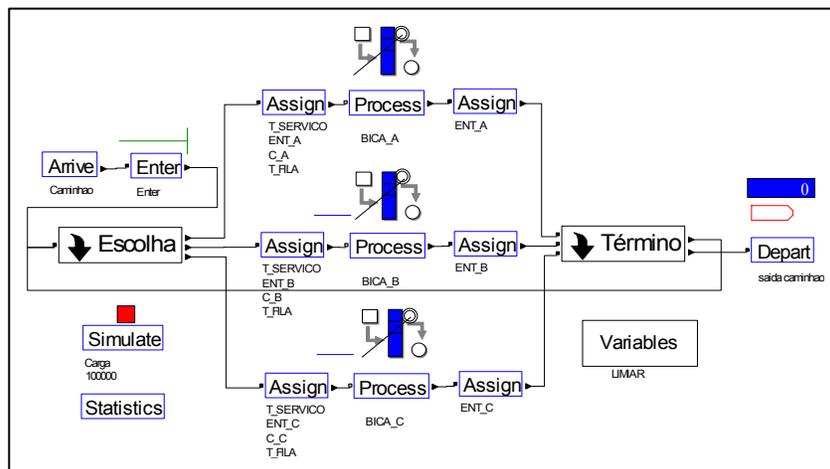


Figura 28 – Modelo de simulação do exemplo numérico 4.1.1

O bloco *Arrive* é o responsável pela geração das solicitações e é mostrado na Fig. 29. Notar o campo *Time Between* que mostra o tempo entre gerações consecutivas (30 min). Também aparece o campo *Mark Time Attribute*, com o nome *chegada*, que vai marcar o tempo decorrido desde a chegada até a saída do caminhão ou seja, (o tempo de

residência ou *soujourn time*). Ainda na Fig. 29 aparecem as variáveis locais (atributos) que correspondem às diferentes cargas, com durações também exponenciais e denominadas C_A, C_B e C_C. Também são mostradas as variáveis ENT_A, ENT_B e ENT_C, que são fundamentais para evitar que um mesmo caminhão seja escolhido para duas bicas diferentes. A variável T_SERVICO é auxiliar apenas para receber a quantidade de carga a ser efetuada pela respectiva bica. Na Fig. 29 também aparecem seus valores iniciais estabelecidos pelo bloco *Assign*.

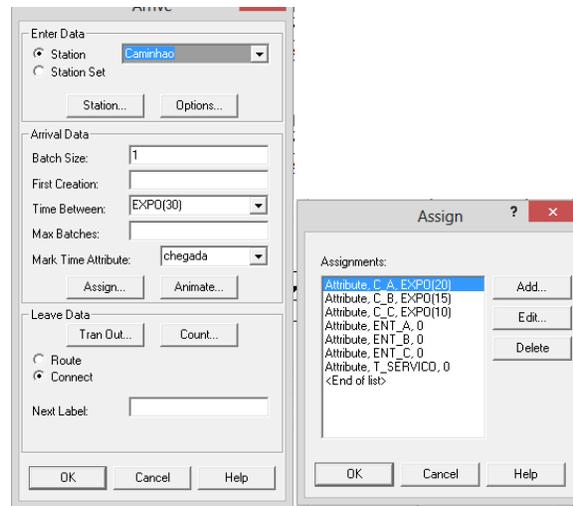


Figura 29 – Bloco Arrive

O Bloco *Enter*, neste caso, é apenas um coadjuvante e pode ser importante como referência de *Label* de entrada no caso de muitas entradas diferentes.

Dada a sua importância com relação às políticas adotadas (das disciplinas de atendimento de serviço, conforme a Tabela 5), foi criado um subsistema chamado *Escolha*, mostrado na Fig. 30.

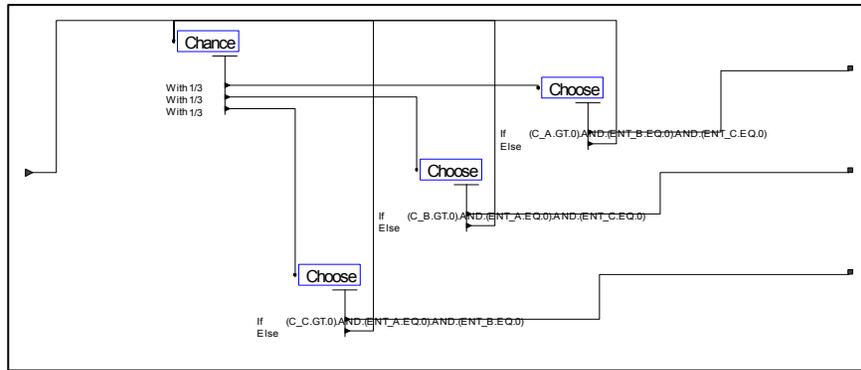


Figura 30 – Subsistema Escolha

Neste primeiro exemplo de simulação relativo ao exemplo 1, a suposição é de que as escolhas das bicas são feitas aleatoriamente e com a mesma probabilidade de serem escolhidas. Observem na Fig.29, que as variáveis C_A , C_B e C_C ajudam a identificar os produtos que ainda não foram carregados e as variáveis ENT_A , ENT_B e ENT_C evitam que um caminhão que já esteja na fila de uma bica seja colocado para atendimento também em outra bica.

Os blocos *Assign* na entrada das bicas servem para atribuir a uma variável local $T_SERVICO$ ($T_SERVICO=C_A$) o valor da quantidade a ser processada na bica, a seguir, essa variável é zerada ($C_A=0$), mas a variável correspondente à entrada na bica é estabelecida = 1 ($ENT_A=1$). A Fig. 31 mostra o Bloco *Assign* correspondente para a $BICA_A$ (para as duas outras bicas o procedimento é semelhante).

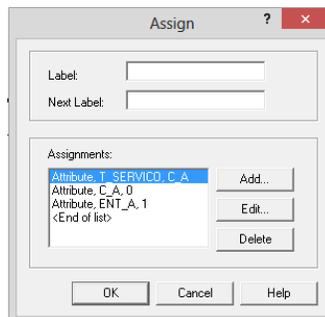


Figura 31 – Designação para as variáveis à entrada das bicas

Conforme a Fig. 32, cada bica tem um único servidor, o seu processamento depende

do valor de T_SERVICO e sua disciplina é (“First In First Out”, FIFO). A BICA_A é mostrada em detalhes, mas as três bicas são semelhantes.

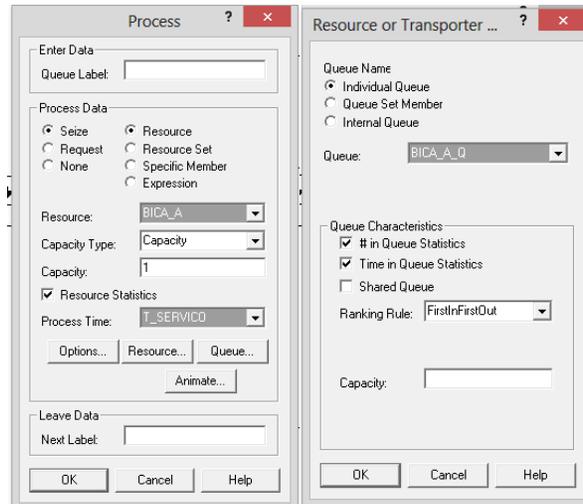


Figura 32 – Processador das bicas (servidores).

Os blocos *Assign* à saída das bicas são muito simples e apenas marcam que a bica foi liberada por aquela carga (ENT_A, ENT_B ou ENT_C feitas iguais a zero novamente).

O Subsistema Término existe apenas para avaliar se a carga do caminhão está completa ou, se ainda é necessário passar em alguma bica. A Fig. 33 mostra a configuração desse subsistema. Quando as cargas estão completadas, a instância (caminhão) é encaminhada para a saída (Bloco *Depart*).

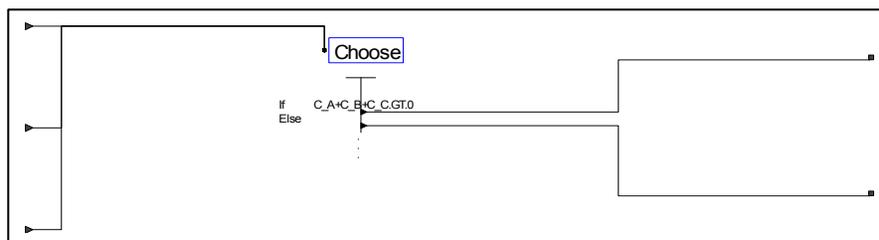


Figura 33 – Subsistema Término

O Bloco *Depart* pode ser visto na Fig. 34. Sua função mais importante é computar o intervalo entre a chegada e a saída dos caminhões por meio da “Individual Tally” chamada saída caminhão_Ta, que inspeciona o atributo chegada de cada instância (que são os

caminhões) que está saindo do sistema. Esse bloco possui também um contador (saída caminhão_C) que mostra a quantidade de caminhões que saíram do sistema durante o período de observação.

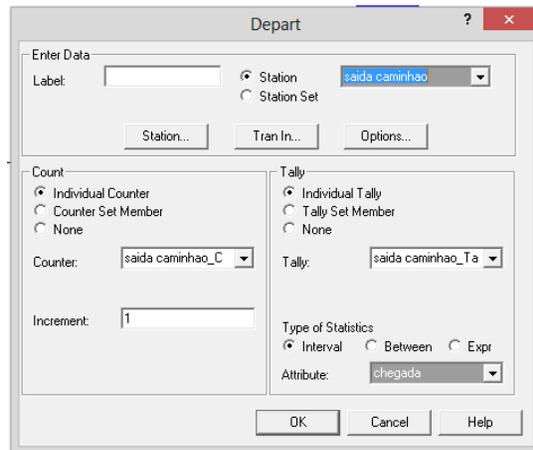


Figura 34 – Bloco Depart

Existe ainda o bloco *Simulate*, chamado Carga, que estipula a duração da simulação em 100000 minutos, mas com um tempo de “warm-up” de 10000 minutos (as estatísticas válidas têm duração de 90000 minutos). O bloco *Statistics* está colocado nesta simulação, mas neste estágio inicial não teve nenhuma variável estabelecida para a coleta de estatísticas. O mais correto, segundo Paulo José de Freitas Filho, seria fazer pelo menos um *warm-up* de 10% do total da simulação (mas ainda assim é apenas uma regra prática). Aspectos relativos tanto à duração da simulação quanto à duração do período de *warm-up* podem ainda ser mais aprofundados. No entanto, não são objetos deste modelo relativo ao exemplo 1.

4.1.4 Tempo de permanência no sistema em FIFO

Diferentemente do modelo analítico, o modelo de simulação não fornece um valor único para a variável em estudo. No entanto, o modelo fornece um intervalo de confiança em que teremos com maior ou menor precisão (dependendo do tempo de simulação e do

número de replicações) o valor da variável em observação. O critério para a parada da simulação para o tráfego de *commodities* deve ter um valor tal que $\frac{\beta}{\hat{x}} \leq \nu$, em que β , \hat{x} e ν denotam, respectivamente, metade do intervalo de confiança de 95% para a média aritmética das observações obtidas durante o tempo de simulação e o nível de precisão desejado. Os valores de β e $\hat{x} = \bar{x}$ são obtidos do relatório de saída do software ARENA nas colunas chamadas “*Half Width*” e “*Average*”, respectivamente quando se tratar de uma única replicação. Para mais de uma replicação é necessário o procedimento a seguir.

$$\bar{x}_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n x_{ij}, i = 1, 2, \dots, n \quad \text{eq.(6)}$$

A expressão (6) dá a média de cada replicação. Esse valor já é fornecido pelo modelo de simulação na coluna AVERAGE da variável “tally” *saída_caminhão_Ta* para cada uma das replicações. O valor da média geral, de todas as replicações será dado por (7) (no nosso caso, $m = 5$).

$$E(\bar{x}) = \hat{x} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \bar{x}_i \quad \text{eq.(7)}$$

O resultado no nosso caso é $\hat{x} = 108,81$ min que é um valor bem próximo dos 105 min do modelo analítico. No entanto, a variância de pode ser calculada como em (8).

$$\text{var}(\bar{x}) = \frac{1}{m-1} \sum_{i=1}^m (\bar{x}_i - \hat{x})^2 \quad \text{eq.(8)}$$

O desvio padrão é a raiz desse valor, que no nosso caso é 10,13 min. O correspondente intervalo de confiança para o tempo de permanência é calculado por (9).

$$\hat{x} \pm \beta = \hat{x} \pm \frac{t_{1-\frac{\alpha}{2}; m-1} \text{var}(\bar{x})^{\frac{1}{2}}}{\sqrt{m}} \quad \text{eq.(9)}$$

Devemos utilizar a distribuição t de Student, ao invés da distribuição normal padrão (sempre que tivermos menos que 30 observações), pois temos apenas 5 replicações e, portanto, 4 graus de liberdade. O valor da distribuição t de Student é $t_{97,5;4} = 2,776$. Portanto, o valor do Intervalo de Confiança resultou em IC = [96 – 121] min, que mostra que o valor 105 min do modelo analítico pertence a essa faixa. Para estreitar a faixa é necessário fazer $\frac{\beta}{\hat{x}} \leq \nu = 2\%$ bem maior número de replicações, mas o valor está coerente com o modelo analítico (para $m > 30$ já podemos usar a normal padrão). Com exatamente 30 replicações obtemos o IC = [103 – 110] min. É importante observar que, se estipulássemos como exemplo, teríamos que dimensionar adequadamente os valores de n (dependendo do tamanho de cada rodada) e de m (do número de replicações). Como curiosidade, adotamos o valor e 2% por se tratar de um valor adotado na maioria das pesquisas de intenção de voto.

4.1.5 Modelo de simulação considerando a disciplina SJF

Uma vez que o modelo é considerado válido, outras considerações podem/devem ser feitas. Inicialmente, nosso objetivo é atuar na política de atendimento dos caminhões nas bicas. A única mudança neste caso é em relação ao atendimento nas bicas. Neste modelo, a política para cada bica é o “Low Value First”, sendo que o menor valor nesse caso é o do tempo de serviço, portanto, esse é o “Shortest Job First” (SJF) e as demais condições anteriores do modelo anterior são mantidas. Essa mudança pode ser vista na Fig. 35 para a BICA_A (a mudança é a mesma para as outras duas bicas):

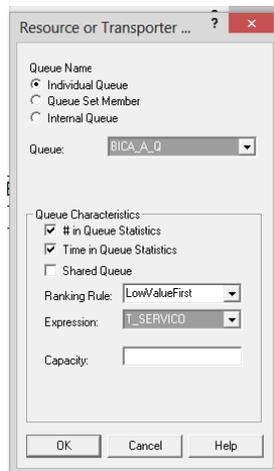


Figura 35 – Mudança na disciplina de atendimento da BICA_A

4.1.6 Tempo de permanência no sistema em SJF

Neste caso, fazendo as contas de maneira semelhante à do modelo anterior, teremos o seguinte Intervalo de Confiança para o tempo de residência, ou seja, $IC = [79,5 - 87,6]$ min (t de Student é $t_{97,5;4} = 2,776$). Os valores de média e variância são $\hat{x} = 83,56$ e $\text{var}(\hat{x}) = 3,265$. Da mesma maneira que no caso anterior, para estreitar o Intervalo de Confiança é necessário aumentar o número de replicações. Até este ponto pode-se perceber que a disciplina SJF para as bicas leva uma boa vantagem em relação à disciplina FIFO com relação ao tempo de permanência no sistema.

4.2 Simulando outras características do sistema

Depois de explorar o exemplo em 4.1.1, o objetivo deste item é o de avaliar outros parâmetros relacionados com a espera no sistema.

4.2.1 Exemplo numérico Chamadas Telefônicas

Esse exemplo traz uma variável Tempo de Permanência no Sistema cujo tempo de atendimento nos servidores é o mesmo para todas as instâncias. Isso nos permite observar o comportamento de indicadores de desempenho em diferentes políticas de atendimento.

Além dos parâmetros média e variância, é importante avaliar os parâmetros TMAX (tempo máximo de permanência no sistema) e o TMIN (tempo mínimo de permanência no sistema) para que possamos melhor avaliar o comportamento da variável Tempo de Permanência em um Sistema.

4.2.2 Modelo para teste comparativo de diferentes políticas

Um simples modelo de simulação para comprovar experimentalmente a relação entre as disciplinas FIFO, SJF e LIFO foi implementado no sw ARENA, como na Fig. 36, como se tivéssemos um serviço genérico de Chamadas Telefônica denominado VoIP.

Ele é avaliado apenas na sua característica de chamada telefônica, com a mesma duração média de 180 segundos para toda chamada, seguindo uma distribuição exponencial para λ . O programa rodou para 16 milhões de segundos com uma geração, em média, a cada 1000 segundos, a cada 700 segundos e a cada 400 segundos, em todos os casos seguindo também distribuições exponenciais (foram três opções de tráfego, denominados baixo, 1, médio, 2, e alto, 3).

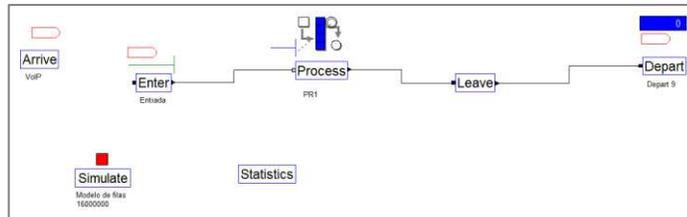


Figura 36 – Modelo de simulação para testar diferentes disciplinas de serviço.

A Fig. 37 mostra o processador, cuja variação será na disciplina de atendimento específica. Na SFJ, o critério é o *Low Value First* para o tempo de serviço. Na disciplina FIFO e na disciplina LIFO (ver Tabela 5) o atendimento não depende da duração do tempo de serviço e sim do momento de entrada do cliente na fila.

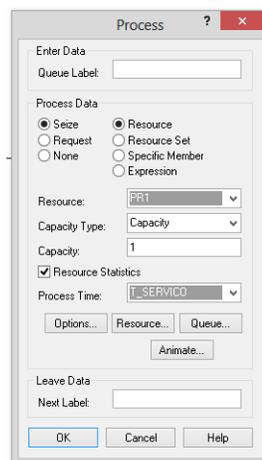


Figura 37 – Servidor (bica única) para o modelo de fila proposto para teste

O bloco **Depart** mostra o attribute (variável local) `sis_time 2` a ser utilizado pelo bloco **Statistics** como na Fig. 37.

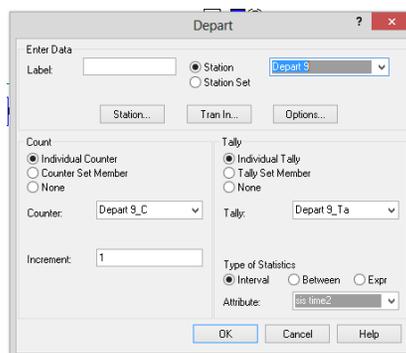


Figura 38 – Bloco Depart na saída das instâncias

O bloco *Statistics* realiza cálculos na saída de cada instância, após o trânsito no sistema (verifica o tempo de permanência), para um atributo colocado logo na geração para cada nova requisição de serviço (entrada de nova instância) chamado sis time 2: TAVG (tempo médio de permanência que foi descrito no texto como $E[W]$), TSTD (desvio-padrão médio do tempo de permanência, $\sqrt{\text{Var}[W]}$), TMAX e TMIN. Os valores do segundo momento e da variância para as três disciplinas, são calculados em função de TAVG ($E[W]$) e TSTD ($\sqrt{\text{Var}[W]}$).

4.2.3 Resultados do modelo de comparação

A Tabela 7 que segue, apresenta cálculos para as disciplinas SJF, FIFO e LIFO com diferentes tempos entre chegadas (a cada 1000, 700 ou 400 segundos, denotados por 1, 2 ou 3 nas colunas correspondentes às disciplinas) para exprimir o aumento do tráfego correspondente.

Tabela 7: Disciplinas testadas com chegadas 1=1000seg, 2=700seg e 3=400seg.

Disciplina/ Parâmetro	SJF1	FIFO1	LIFO1	SJF2	FIFO2	LIFO2	SJF3	FIFO3	LIFO3
TAVG	213,81	217,31	220,96	241,92	252,77	253,43	284,83	319,15	319,05
TSTD	213,59	216,62	228,34	243,01	249,45	280,27	302,80	313,56	408,89
TMAX	1930,6	1858,3	2703,0	2740,3	2374,6	5073,8	5842,5	2703,4	7167,8
TMIN	0,0169	0,0169	0,0169	0,0169	0,0169	0,0169	0,0169	0,0169	0,0169
$E[W^2]$	91335,4	94147,9	100962,5	117579,1	126118,0	142778,0	172816,0	200176,6	268983,9
Var[W]	45620,7	46924,2	52139,2	59053,9	62225,3	78551,2	91687,8	98319,9	167191,0

Conforme as seções anteriores, tanto a média quanto a variância da disciplina SJF são melhores (menor tempo médio de residência e menor dispersão) que quaisquer outras disciplinas. Esses resultados foram comprovados pelo modelo de simulação, tanto para tráfego baixo, 1, quanto para o médio, 2, quanto para o alto, 3, como mostram os valores em **negrito** da Tabela 7. O que se nota claramente é que os menores valores para os tempos máximos de permanência no sistema (TMAX) ocorrem para a disciplina FIFO e esse é o único quesito em que a disciplina SJF não é superior. Os resultados indicam que, embora a

disciplina SJF tenha a menor média e a menor variância, sua distribuição dos tempos de permanência no sistema é de cauda longa, diferentemente da distribuição da disciplina FIFO. Dessa maneira, a disciplina SJF pode causar elevados atrasos quando o tráfego é alto, como mostra o modelo SJF3 da Tabela 6. Para o caso de baixo tráfego, como mostra o modelo SJF1 da mesma tabela, a diferença para o TMAX em relação à disciplina FIFO é pequena. Portanto, esse estudo é fundamental para o estabelecimento da estratégia de serviço a ser adotada. Por exemplo, para baixo tráfego (como para o tráfego 1), o modelo SJF pode ser adotado. Para alto tráfego, o ideal seria um chaveamento (mudança de modo de operação) entre a disciplina SJF e a disciplina FIFO a partir de um determinado valor de TMAX (essa possibilidade será abordada por meio de um modelo de simulação de carregamento de commodities no Capítulo 5). Outra possibilidade seria a adoção de alta prioridade para clientes preferenciais e permitir um maior atraso para os demais clientes. Também, a partir de um determinado valor de tráfego, é possível introduzir um controle de admissão para evitar que o sistema seja sobrecarregado. O parâmetro TMIN não mostrou influência no presente estudo. A Fig.28 mostra um exemplo de relatório padrão de saída do sw Arena® para o caso da disciplina LIFO com 15742 requisições de serviços geradas.

TALLY VARIABLES					
Identifier	Average	Half Width	Minimum	Maximum	Observations
PR1_Q Queue Time	41.297	4.0748	.00000	2675.2	15742
Depart 9_Ta	220.96	5.5578	.01692	2703.0	15742
DISCRETE-CHANGE VARIABLES					
Identifier	Average	Half Width	Minimum	Maximum	Final Value
PR1 Available	1.0000	(Insuf)	1.0000	1.0000	1.0000
PR1 Busy	.17677	(Conn)	.00000	1.0000	.00000
# in PR1_Q	.04063	.00406	.00000	5.0000	.00000
COUNTERS					
Identifier	Count	Limit			
VoIP_C	15742	Infinite			
Depart 9_C	15742	Infinite			
OUTPUTS					
Identifier	Value				
TSTD(Depart 9_Ta)	228.34				
TAVG(Depart 9_Ta)	220.96				
TMAX(Depart 9_Ta)	2703.0				
TMIN(Depart 9_Ta)	.01692				

Figura 39 – Exemplo de saída padrão do sw ARENA para a disciplina LIFO

Até aqui mostramos que o modelo em estudo corresponde a uma Rede de Jackson Genérica e que a grande vantagem da modelagem é o fato de se conhecer a priori a duração dos tempos de serviço (o que não ocorre, em geral, com os serviços de telecomunicações, por exemplo). Por outro lado, a disciplina SJF é superior à FIFO em todos os aspectos, com exceção do tempo máximo de serviço. Nas próximas seções serão abordados os aspectos da mudança dinâmica do modo de operação para minimizar (atender os requisitos) o problema de tempo máximo de espera.

5 MUDANÇA DINÂMICA DO MODO DE OPERAÇÃO NO CARREGAMENTO DE *COMMODITIES* ENSACADAS

Tendo em vista as conclusões das seções anteriores, este capítulo aborda os aspectos da mudança dinâmica do modo de operação para minimizar o problema de tempo máximo de espera, em outras palavras, para que o sistema possa melhorar o atendimento aos requisitos estabelecidos. Para isso precisamos medir o comportamento da variável de saída *Sojourn Time*, ou, o tempo médio que um caminhão permanece no sistema.

5.1 Considerações gerais da mudança de modo

A observação do *Sojourn Time* requer um modelo de simulação que revele maiores detalhes dos resultados de saída. Partimos do modelo de simulação apresentado na seção 4.1.3, representado pela Fig. 28. O subsistema *Término* representado na Fig. 30, aqui é modificado para identificar a distribuição de saída (*Sojourn Time*) dos tempos de permanência no sistema (Fig. 40) sempre que uma carga é finalizada.

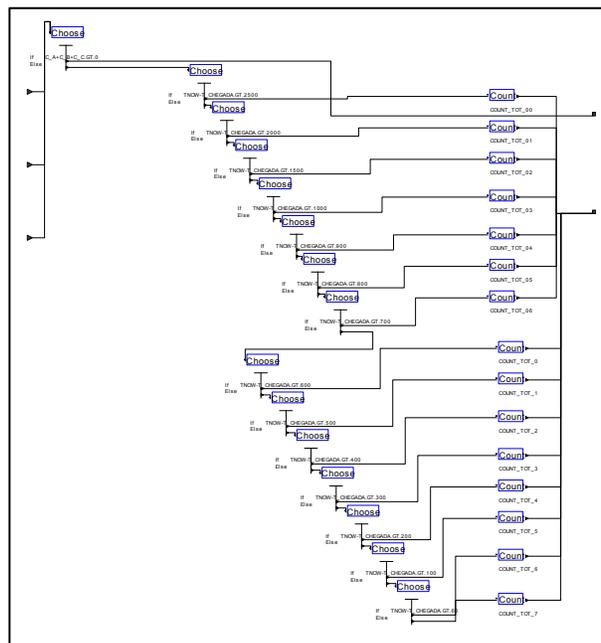


Figura 40 – Subsistema *Término* com identificadores de *Sojourn Time*

O subsistema Término está construído por meio de blocos *Count* para contar o número de *cargas* na saída do sistema, distribuídas entre 15 intervalos de tempo tal qual mostra a Tabela 8.

Tabela 8: Intervalos de tempo para o Sojourn Time.

Contador	Intervalo (min)
Count_Tot_7	até 60
Count_Tot_6	até 100
Count_Tot_5	até 200
Count_Tot_4	até 300
Count_Tot_3	até 400
Count_Tot_2	até 500
Count_Tot_1	até 600
Count_Tot_0	até 700
Count_Tot_06	até 800
Count_Tot_05	até 900
Count_Tot_04	até 1000
Count_Tot_03	até 1500
Count_Tot_02	até 2000
Count_Tot_01	até 2500
Count_Tot_00	acima 2500

Os entretempos definidos no bloco *Arrive* do modelo 4.1.1 são modificados no campo *Time Between* (ver Fig. 41) para simularmos, em *long run* (como tem sido feito até aqui), três intensidades de tráfego, baixa, média e alta, respectivamente 1=1800seg (~30min), 2=1500seg (~25min) e 3=1200seg (~21min). Os valores em minutos entram no parâmetro de tempo (*mm*) do campo.

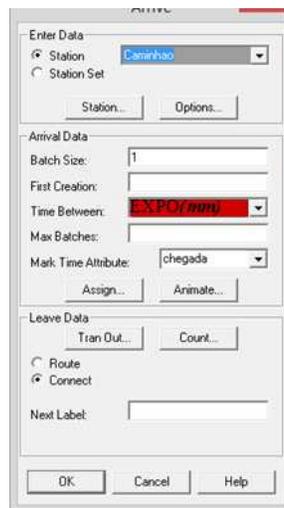


Figura 41 – Bloco Arrive com diferentes Time Between: 30, 25 e 21min

Tabela 9: Disciplinas em long run com chegadas 1=1800seg, 2=1500seg e 3=1200seg.

Disciplina/ Parâmetro	SJF1	FIFO1	SJF2	FIFO2	SJF3	FIFO3
TAVG	83,250	104,83	102,05	155,38	172,09	444,76
TSTD	66,630	68,550	117,66	106,68	600,47	294,07
TMAX	1054,1	461,90	2625,3	656,75	16978,0	1376,4

Tabela 10: Parâmetros a longo prazo –a=24min, b=23min, c=22min.

Disciplina/ Parâmetro	SJF1	FIFO1	SJF2	FIFO2	SJF2a	FIFO2a	SJF2b	FIFO2b	SJF2c	FIFO2c	SJF3	FIFO3
TAVG	83,250	104,83	102,05	155,38	108,19	175,82	119,88	214,84	136,65	285,44	172,09	444,76
TSTD	66,630	68,550	117,66	106,68	140,58	121,44	195,22	151,61	305,05	200,69	600,47	294,07
TMAX	1054,1	461,90	2625,3	656,75	3339,8	724,31	4878,4	850,15	8319,3	1032,2	16978,0	1376,4

A Tabela 7 nos mostra que dentre as políticas que avaliam tempos máximos de permanência, os melhores resultados em todos os quesitos, para baixo, médio e alto tráfego são da política FIFO. Observando a Tabela 9 com seus resultados para as políticas FIFO e SJF, nos permite adotá-las (SJF e FIFO) como fronteiras de uma banda (faixa) de flutuação (Fig. 42) entre os menores valores (baixo tráfego) das variáveis de desempenho $TAVG=E[w]$ e TMAX. A banda de flutuação sugere que os resultados que queremos alcançar estão contidos nela. Regiões mais escuras representam valores mais altos.



Figura 42 – Fronteiras dos menores valores para TAVG e TMAX

A abstração da Fig. 42 mostra que os resultados do tempo médio de permanência no sistema (TAVG) recebem incrementos em valor na medida em que a política de escalonamento de caminhões muda de SJF para FIFO. Os resultados do tempo máximo de permanência no sistema (TMAX) incrementam no sentido contrário, ou seja, de FIFO para SJF.

Note que quanto maior o tráfego apresentado na Tabela 9, maiores são os incrementos de TAVG e TMAX (Fig. 43), sendo que os aumentos em TMAX são ainda mais acentuados. Tomando o tráfego 1 como referência, o incremento de TAVG2 é aproximadamente o dobro e, de TMAX2, é aproximadamente 2,3 vezes. Quanto ao tráfego

3, o incremento de TAVG3 é de aproximadamente 6 vezes, enquanto que o de TMAX3 é de 9 vezes.

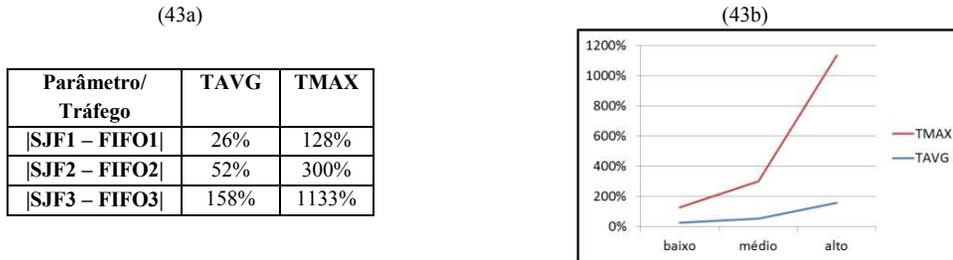


Figura 43 – Incremento de tempos médios inter-políticas .

Sabemos que a distribuição dos tempos médios de permanência no sistema (TAVG) segue uma curva exponencial. Vemos, a partir da Figura 43, que na distribuição dos tempos máximos, os maiores valores plotados à direita da curva estão proporcionalmente mais distanciados da sua média, quando os comparamos com a TAVG. Podemos esperar, portanto que a curva TMAX siga uma distribuição de cauda longa.

O modelo inicial recebe outras duas modificações para que realizemos a mudança de modo de operação (Fig. 44). A primeira é a introdução de variáveis (LIMIAR, N_CRITICOS e varINPOLITICA) de controle da mudança de modo, inicializadas pelo bloco *VARIABLES*. Essas variáveis permitem que os novos submodelos *Aval_criticidade*, que compõem um estágio de avaliação crítica do sistema, identifiquem o momento efetivo para promover a mudança almejada. Os submodelos *Politica_Inicial* formam o estágio de seleção da política inicial a partir da qual o modo de operação é mudado.

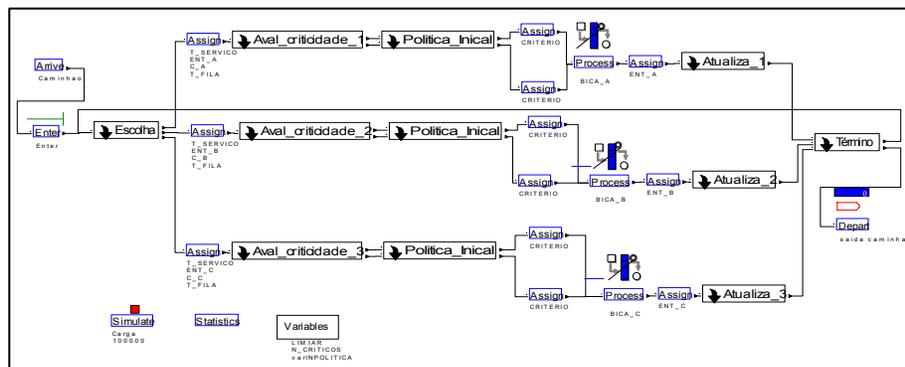


Figura 44 – Modelo de simulação com mudança do modo de operação.

Cada submodelo é antecipado por um bloco *Assign* (Fig. 45) que atribui valores para quatro atributos do *Job* que entra no servidor.

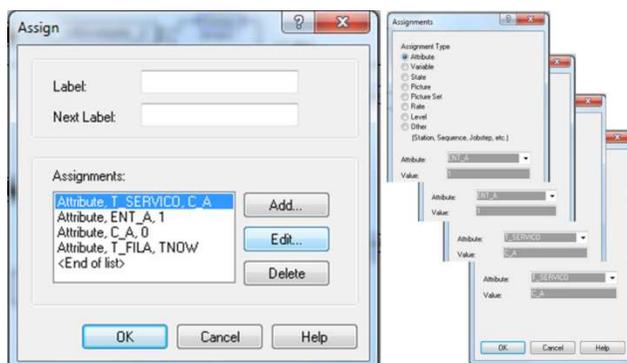


Figura 45 – Bloco Assign de entrada no estágio de avaliação crítica.

Alguns desses atributos são avaliados junto com a variável *N_CRITICOS* nos submodelos *Aval_criticidade_1*, *Aval_criticidade_2* e *Aval_criticidade_3* (Fig. 46), cada qual alimentando um servidor.

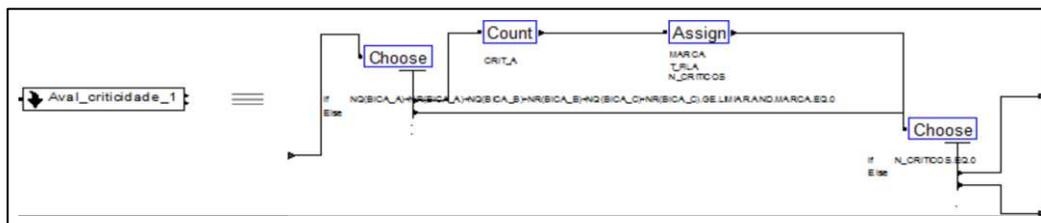


Figura 46 – Submodelos *Aval_criticidade*.

Aval_criticidade testa se o número total de entidades no sistema de servidores (fila mais serviço) ultrapassa o valor da variável *Limiar* e, se o Job em questão já esteve em atendimento em algum dos outros servidores. Quando a resposta é positiva para as duas condições, o sistema muda de política de chamada. *Aval_criticidade* usa o bloco *Choose*, na sua saída, para determinar qual o critério de chamada que o servidor usará. Dependendo da avaliação, um bloco *Assign* da saída do estágio avaliador especifica qual atributo será observado na chamada, se é o tempo de permanência no sistema ou, se é o tempo de serviço para o servidor à frente.

O próximo estágio do modelo, o submodelo *Politica_Inicial* da Fig. 47, o usuário define sob qual opção de política de chamada o sistema inicia sua operação. Na condição 1 o sistema inicia FIFO e, na condição 0, inicia SJF.

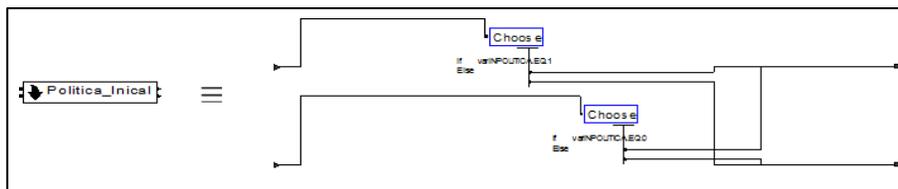


Figura 47 – Submodelos *Politica_Inicial*, 1 = FIFO, 0 = SJF.

Em relação ao modelo básico inicial, essas são as características que completam as diferenças do modelo de simulação com Mudança Dinâmica do Modo de Operação. O próximo item traz seus resultados.

5.2 Mudança Dinâmica do Modo de Operação: resultados e análise

A versão Student do software Arena[®] limita os modelos a 150 instâncias. Essa característica é interpretada como um limite operacional do sistema modelado, como, por exemplo, o limite de capacidade física de um estacionamento ou, da área de movimentação de cargas. Assim, temos três instâncias (três servidores) que ficam ativas durante todo o processo e podemos atuar com um máximo de 147 instâncias nos servidores (fila mais atendimento).

Para entendermos o comportamento desse modelo com mudança do modo de operação do sistema, simulamos, nas mesmas condições do modelo inicial, seis diferentes taxas λ de entrada com até doze pontos de mudança distintos (de $L = 1$ até $L = 70$ caminhões em fila) para cada uma das duas políticas de chamada (SJF e FIFO) contempladas conforme Tabela 9.

A Tabela 9 nos mostra que, para limiares de mudança menores que 5 *Jobs*, os tempos médios se mantêm sensivelmente próximos ao limite da banda. Desta forma, dentro dessa faixa usaremos apenas L=1 e L=5. Os testes aplicados indicaram o conjunto de valores {1, 5, 7, 10, 15, 20, 25, 30, 40, 50, 60,70} como relevantes para as análises dos resultados. Para alguns experimentos, foi necessário apenas um subconjunto desses valores para que o sistema atingisse o limite superior da banda.

Tabela 11: Panorama de tempos médios e máximos para L=1, 2, 3, 4.

Modo Inicial	Limiar de Mudança	Indicadores	Baixo	Médio	Transição		Alto
			Tráfego (min)	Tráfego (min)	Médio/Alto (min)	Tráfego (min)	
			$\lambda = 1/30$	$\lambda = 1/25$	$\lambda = 1/24$	$\lambda = 1/23$	$\lambda = 1/22$
FIFO	sem mudança	TAVG	104,83	155,38	175,82	214,84	285,44
		TMAX	461,90	656,75	724,31	850,15	1.032,20
SJF	sem mudança	TAVG	83,25	102,05	108,19	119,88	136,65
		TMAX	1.054,10	2.625,30	3.339,80	4.878,40	8.319,30
F I F O	L = 1	TAVG	83,26	102,05	108,19	119,88	136,65
		TMAX	1.054,10	2.625,30	3.339,80	4.878,40	8.319,30
	L = 2	TAVG	84,23	103,18	109,36	121,00	137,34
		TMAX	1.148,60	2.825,50	3.581,70	5.343,90	8.247,00
	L = 3	TAVG	86,24	104,95	112,56	121,59	141,82
		TMAX	1.330,50	2.027,50	4.034,10	5.547,50	9.717,70
	L = 4	TAVG	88,99	109,05	116,57	126,76	143,57
		TMAX	1.364,60	3.348,30	4.408,60	6.122,30	10.036,00
S J F	L = 1	TAVG	105,74	154,25	176,76	211,24	291,35
		TMAX	601,42	904,48	1.033,80	1.169,80	1.539,50
	L = 2	TAVG	105,57	152,06	175,65	214,34	285,15
		TMAX	607,51	884,25	1.015,20	1.209,40	1.489,60
	L = 3	TAVG	104,43	153,87	177,77	211,84	284,70
		TMAX	603,68	884,23	1.005,50	1.209,50	1.469,10
	L = 4	TAVG	102,76	153,58	177,54	211,75	275,73
		TMAX	606,97	900,29	1.018,90	1.210,30	1.471,40

Iniciando o experimento com FIFO e adotando valor de Limiar igual a zero ou 1 (veja FIFO, L1 na Tab.11) obtemos os melhores tempos médios de permanência com SJF puro. Ao começarmos com SJF, também mudando o modo em L0 e L1, o sistema atinge os melhores TMAX em FIFO puro.

Como o modelo foi validado de forma incremental a partir do modelo teórico de Redes de Jackson, as pequenas mudanças vão sendo incorporadas e podem descrever com mais realidade as diversas situações dos diferentes casos práticos (por exemplo, se as distribuições de cargas forem diferentes, digamos uniformes ou constantes, etc.). Lembramos que tanto a média quanto a variância da distribuição SJF são menores que os mesmos parâmetros da distribuição FIFO. No entanto, por resultados anteriores já sabemos que a distribuição de tempo máximo segue uma distribuição de cauda longa. Esses atrasos, provocados por tempos máximos extremamente longos, podem ter valores dramáticos em alguns casos e serem inaceitáveis em outros.

Os dados mostram que a mudança de modo de operação com limiares L de 1 a 4, apresenta resultados próximos das regiões de fronteira da banda para todos os tráfegos. Isso quer dizer que atuando com pequenas filas o modelo apenas desloca seus resultados da política inicial para a outra política.

A Fig. 50 mostra os resultados do tempo médio e do tempo máximo, para distintos tráfegos no sistema com diferentes valores da variável Limiar. Nesse experimento observamos resultados deslocados entre as duas bandas limite. Como exemplo, destacamos o desempenho em alto tráfego ($\lambda = 1/22$). Para ele, a figura apresenta resultados de TMAX no entorno de 1000 minutos para $L = 70$, contudo com forte impacto negativo em TAVG que atinge valores próximos de 300 minutos.

Observemos que cada analista poderá construir uma diferente função de custo relacionando tempo médio e tempo máximo. Portanto, cada um pode optar por um diferente ponto de operação. O mais notório é que há grandes aumentos no valor do tempo máximo. Importante notar que pequenos aumentos de tráfego, i.e., variando de uma instância a cada trinta minutos para uma a cada 22 minutos, os tempos máximos podem sair da ordem dos 1000 minutos e saltar para a casa dos 10000 minutos. Dessa maneira, o aumento do tráfego

pode influenciar sobremaneira o momento de efetuar a mudança no modo de operação. A Fig. 48 ilustra esse caso de aumento de tráfego.

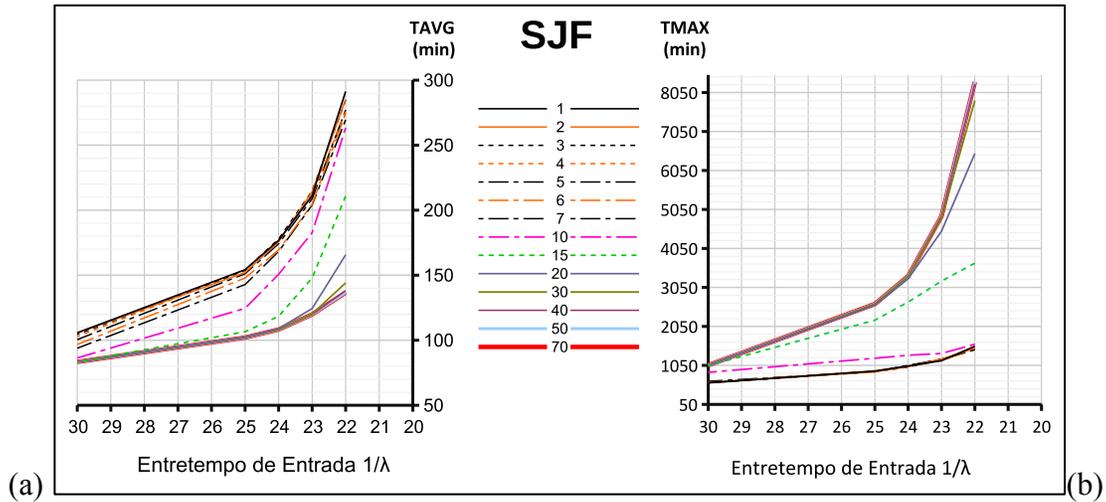


Figura 48 – Tempos de permanência Médios (a) e Máximos (b) - Início em SJF

A Fig. 48 ratifica que, independentemente das diferentes intensidades de tráfego e das políticas de chamada testadas, os padrões de comportamento de TAVG e TMAX se mantêm inalterados. Isso nos permite afirmar que existe compromisso entre TAVG e TMAX, o que se confirma nos gráficos das Figs. 49a e 49b. Elas apontam claramente que quando o sistema provoca incremento em uma delas, a outra é decrementada.

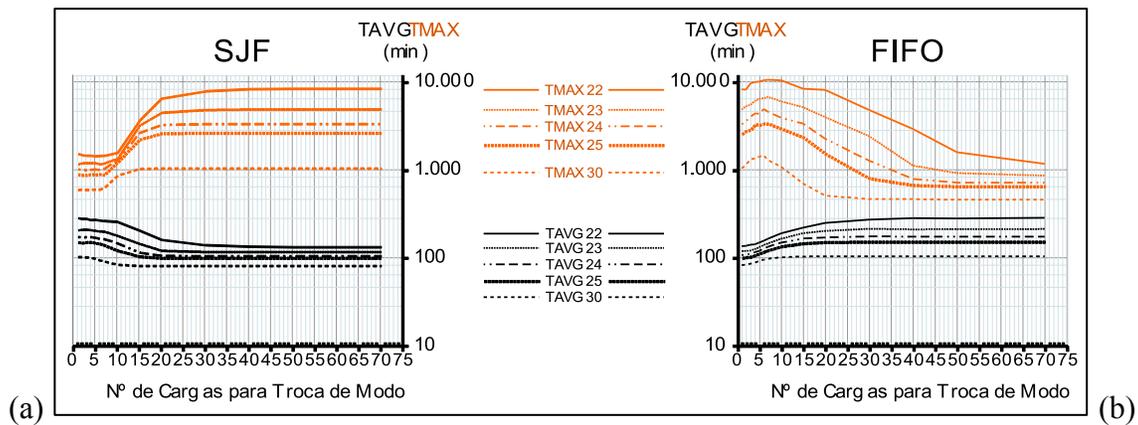


Figura 49 – Compromisso TAVG e TMAX

Quando o processo se inicia com política FIFO e mudança de modo realizada com o sistema de filas carregado de 1 a 5 instâncias, ou seja, com limiar L de 1 a 5 (ver Fig. 49b), os tempos máximos aumentam drasticamente com pequenos aumentos de tempo médio. Essa característica sistêmica evidenciada pela Fig. 49b já foi anteriormente apontada. Limiares associados a filas a partir de cinco caminhos respondem com quedas dos tempos máximos para todos os tráfegos. Tráfegos maiores respondem com menores quedas mostrando que FIFO é um modo de operação restritor da vazão de cargas. Essa característica faz FIFO atuar com maior inércia na redução dos tempos máximos, com exceção relativa ao baixo tráfego ($\lambda = 1/30$ min). Outro destaque apresentado pelas figuras 49 (a) e (b) é que o sistema iniciado por SJF é pouco sensível a variações de TAVG e TMAX, quando há formação de filas até 10 instâncias. É seguido de variações abruptas com mais sensibilidade à redução do tempo médio para todos os tráfegos testados durante filas entre 10 e 20 caminhos. Contudo, com esta mesma sensibilidade, ele aumenta rapidamente os tempos máximos. A mudança de modo acusa resultados idênticos para filas acima de 20 instâncias mantendo altíssimos TMAX. Temos, assim, os tempos médios e máximos sendo influenciados por duas variáveis, a saber: entretempos de entrada, ou, de outra forma, a taxa λ ; e o limiar L de mudança do modo de operação. Assim, podemos formalizar algebricamente as equações (10) e (11) em função de λ e L.

$$TAVG = f(\lambda, L) \quad \text{sendo} \quad \begin{cases} 0 < \lambda < \mu \\ L \in N^* \end{cases} \quad \text{eq.(10)}$$

$$TMAX = f(\lambda, L) \quad \text{sendo} \quad \begin{cases} 0 < \lambda < \mu \\ L \in N^* \end{cases} \quad \text{eq.(11)}$$

Os resultados nos permitem plotar essas funções como Superfícies de Resposta para TAVG e TMAX, para o sistema com mudança de modo sendo iniciado pelas políticas de escalonamento FIFO e SJF. Os gráficos resultantes estão nas Figs. 50, 51, 52 e 53. As áreas de alto relevo mostram os maiores tempos que se separam por cores e tons diferentes como curvas de nível identificando regiões de mesma faixa de valores. Elas podem servir de ferramenta de apoio às tomadas de decisão rápidas. Pode-se localizar a região de um

determinado par de tempos (TAVG, TMAX) como função de um dado tráfego e do tamanho das filas que se planeja enfrentar.

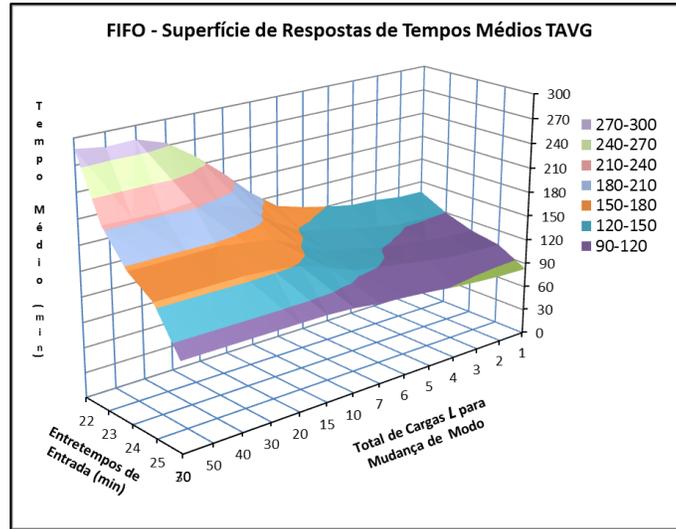


Figura 50 – Superfície de respostas TAVG – Início em FIFO mudança em L

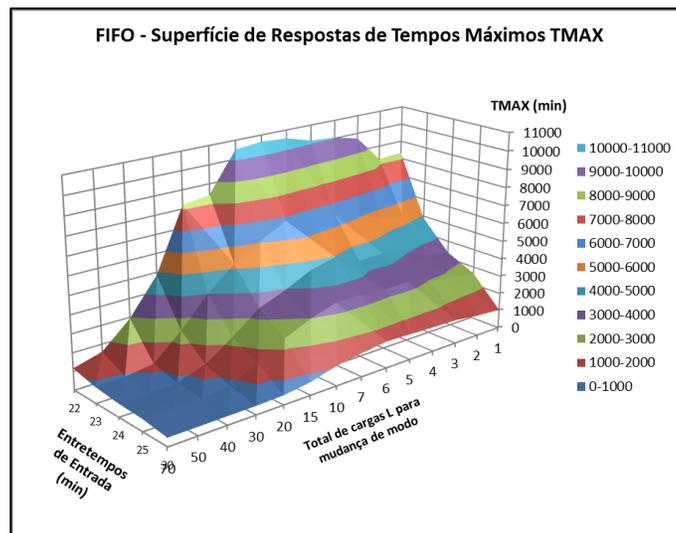


Figura 51 – Superfície de respostas TMAX – Início em FIFO mudança em L

Vemos que as Figs. 50 e 51 apresentam as respostas para o sistema iniciado com FIFO. Abstraindo a sobreposição das duas superfícies das regiões de TMAX mínimo com TAVG mínimo, percebemos apenas uma restrita e crítica área aplicável entre L10 e L15 e baixo tráfego com λ em torno de 1/30. A região é crítica, pois encontra-se numa área com

aclices que levam TMAX abruptamente para 3000 minutos. As possíveis alternativas com menores TMAX apontam para filas superiores a $L = 20$ e TAVG ultrapassando 150 minutos.

As Figs. 52 e 53 trazem os resultados do modelo iniciado com política SJF. Ainda que os valores de TMAX subam abrupta e rapidamente entre os valores de L10 e L15 (filas de 10 a 15 caminhões) para atingir seu máximo, há uma grande área formada entre L1 a L7 e entretempos de 30 a 24 minutos. Nela, temos resultados satisfatórios abaixo de 1000 minutos. Grande parte dessa área está dentro de regiões de TAVG de até 180 minutos.

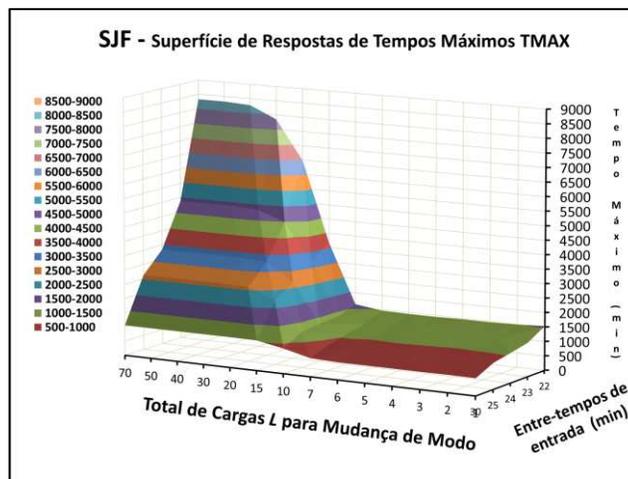


Figura 52 – Superfície de respostas TMAX– Início em SJF mudança em L

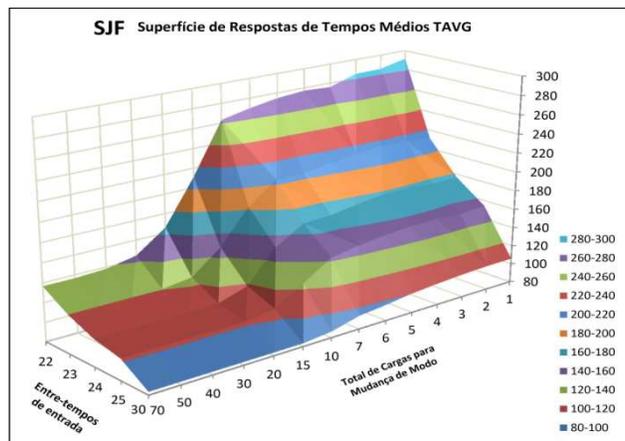


Figura 53 – Superfície de respostas TAVG – Início em SJF mudança em L

Isto posto, podemos afirmar que o sistema com Mudança Dinâmica do Modo de Operação oferece melhores resultados de TMAX com desempenho satisfatório de TAVG e razoável margem de manipulação quando iniciado em política SJF. Tal qual proposto, o modelo oferece resultados dentro da banda FIFO/SJF (Fig. 54). Contudo esses resultados são limitados.

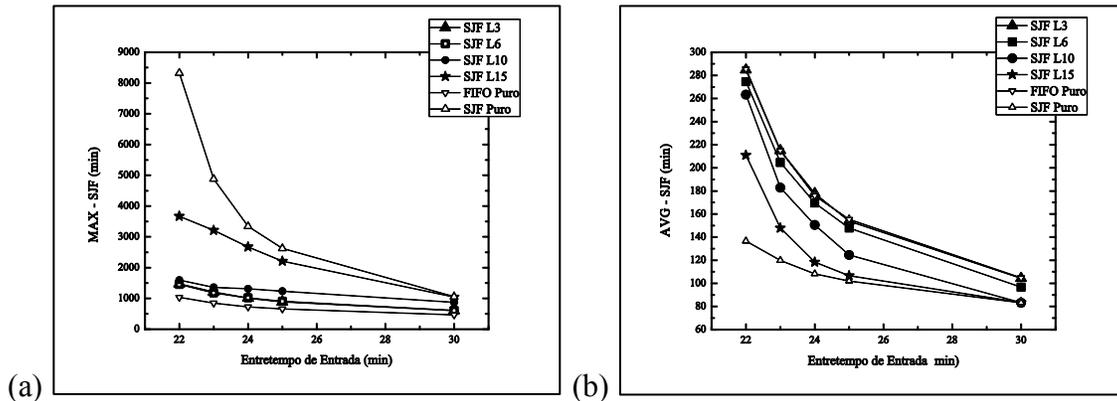


Figura 54 – Comparativo dos resultados do modelo de mudança de modo

A ocorrência de filas maiores do que 10 ($L \geq 10$) são frequentes e provocam indesejáveis aumentos de TAVG e TMAX simultaneamente, requerendo mais investigação. Em uma operação real cada ambiente associa custos específicos a TAVG e TMAX. As decisões são tomadas em função dos requisitos estabelecidos e outras variáveis pertinentes à necessidade gerencial. Assim, avaliaremos no próximo capítulo o uso de um controlador de tráfego de entrada de instâncias no sistema de servidores para o sistema iniciado com política SJF.

6 CONTROLE DE ADMISSÃO E VAZÃO

Os sistemas de carregamento que atuam com fila de espera perseguem o controle de perdas com tempo de espera. Nosso modelo não é diferente e propomos um controle das filas nos servidores a partir da sua entrada no sistema. Controlar o tamanho das filas nos servidores decorre da necessidade de controlar os excessos de tempos TAVG e TMAX.

A Fig. 55 mostra o modelo de simulação com controle de admissão (CA) implementado no software Arena[®] Student. A ideia foi fazer o modelo de maneira similar ao caso sem controle de admissão em que também há uma limitação de 150 instâncias no programa. Desta maneira, 3 instâncias ficam ativas durante o tempo todo de simulação (os 3 servidores) e 147 é o número total máximo de caminhões que pode haver no sistema. Como parte do projeto dos modelos de simulação, este modelo também tem variação incremental em relação aos anteriores. Em relação ao modelo da Fig. 44 há um submodelo chamado de “Espera fora” em que quando o número de caminhões supera o valor da variável LIMITE, estes esperam em um bolsão (vide o bloco *Hold* na Fig. 56). LIMITE determina qual a quantidade máxima de entidades na área do sistema dos servidores. Para isso, há necessidade de uma variável de controle chamada de N_CAM e inicializada no bloco *Variables*, que mostra o número de caminhões no sistema, e que é incrementada na entrada e decrementada na saída de cada caminhão. A variável N_CAM controla a entrada e a saída de caminhões quando o sistema está com alto tráfego.

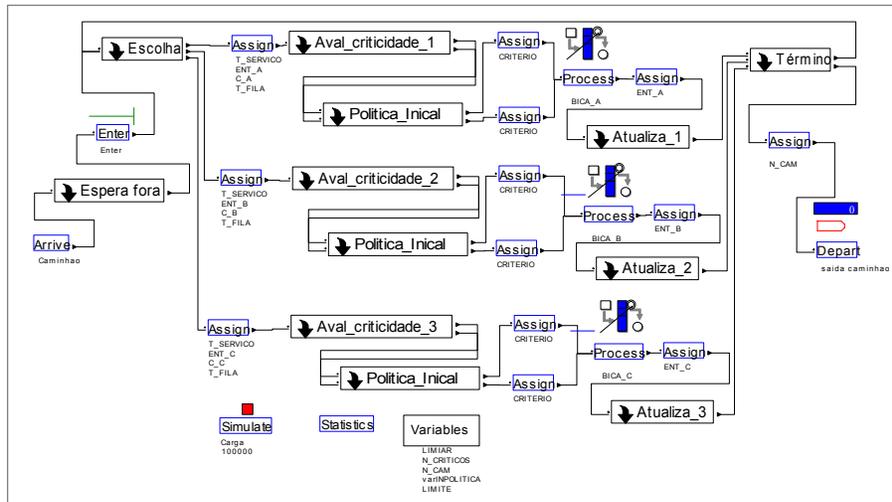


Figura 55 – Modelo com Controle de Admissão (CA) e mudança de modo

A variável LIMITE além de incrementar a complexidade do modelo, e limitar o tamanho do bolsão interno de espera, também atua sobre o fluxo de saída de cargas. Esse é um problema do modelo principalmente na disciplina FIFO pura, como anteriormente destacado, em que o número de caminhões no sistema cresce muito. Para compatibilizar o controle de admissão natural de 147 caminhões com o valor da variável LIMITE (que determina o tamanho do bolsão) foi necessário criar um bloco *Dispose* (Fig. 56) para eliminar o excesso de instâncias. Isso de fato caracteriza um sistema de perda ou bloqueio, que na prática não é o objetivo desse trabalho.

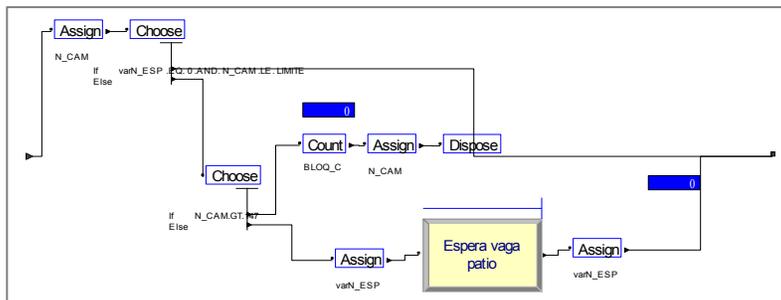


Figura 56 – Controle dinâmico de Admissão (CA)

O controle dinâmico de admissão garante no máximo 147 caminhões no sistema e, que entrem livremente para carregar apenas quando exista disponibilidade de vaga no pátio interno e, que não exista fila na entrada.

Ainda que o bloqueio imposto tenha caráter meramente analítico e observando os resultados apontados na Fig. 57, quando os tempos médios e máximos atingem picos altíssimos, temos um sistema com baixíssimas perdas (veja Tab. 12 adiante).

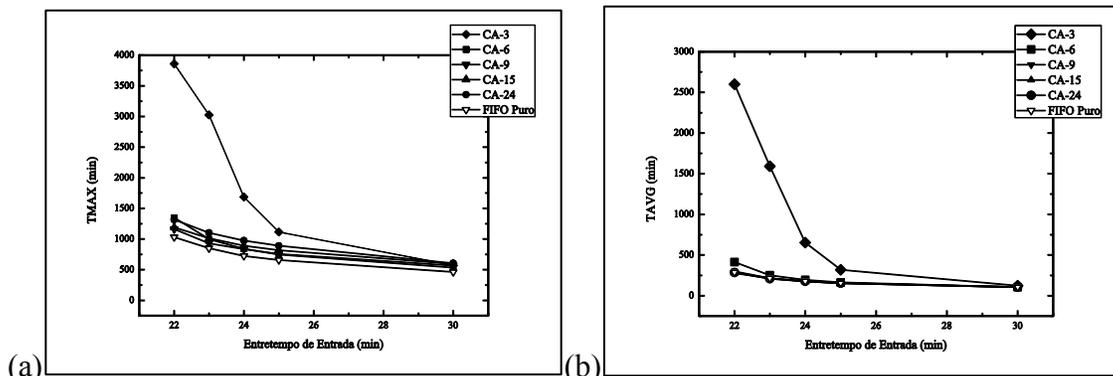


Figura 57 – Regiões de bloqueio e perda na admissão de caminhões

Quando restringimos a admissão para 3 ou 6 caminhões e o modelo atua com λ igual a $(1/22)$ cargas por minuto (Figura 61a), o sistema iniciado em FIFO resulta em perdas inferiores a 4,0% para ocorrências simultâneas de TAVG e TMAX superiores a 2500 minutos. Não há registros de perdas para o sistema iniciado em SJF.

Tabela 12: Pico de perdas e bloqueios SJF

$1/\lambda = 22$							
admissão (# caminhões)	3			6			
mudança (# caminhões)	1	2	3	1	2	3	6
vazão total (# caminhões)	4089,20	4086,90	4090,20	4091,90	4092,10	4092,00	4093,60
perda (# caminhões)	159,45	151,78	154,70	0,08	0,00	0,00	0,00
perda percentual	3,9%	3,7%	3,8%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
TAVG (min)	2589,70	2555,90	2601,10	404,75	403,24	388,74	388,81
Desvio Padrão (min)	791,87	802,04	779,07	279,52	280,82	276,59	276,57
TMAX (min)	3866,20	3850,80	3858,60	1331,20	1323,40	1311,10	1304,50

O modelo de simulação pode ser um auxiliar no dimensionamento e no planejamento do sistema e, uma vez detectado o problema do bloqueio, é possível, por exemplo, reduzir o tráfego oferecido (ou limitar o tráfego oferecido). Existem outras opções a partir dos resultados da simulação como, por exemplo, o excesso de caminhões seria atendido no dia seguinte e, nesse dia haveria uma redução no total de requisições.

O incremento do controle de admissão poderia trazer dúvidas quanto à manutenção do compromisso observado entre TMAX e TAVG. Diversos experimentos foram conduzidos e os resultados estão apresentados em forma gráfica a seguir na Fig. 58.

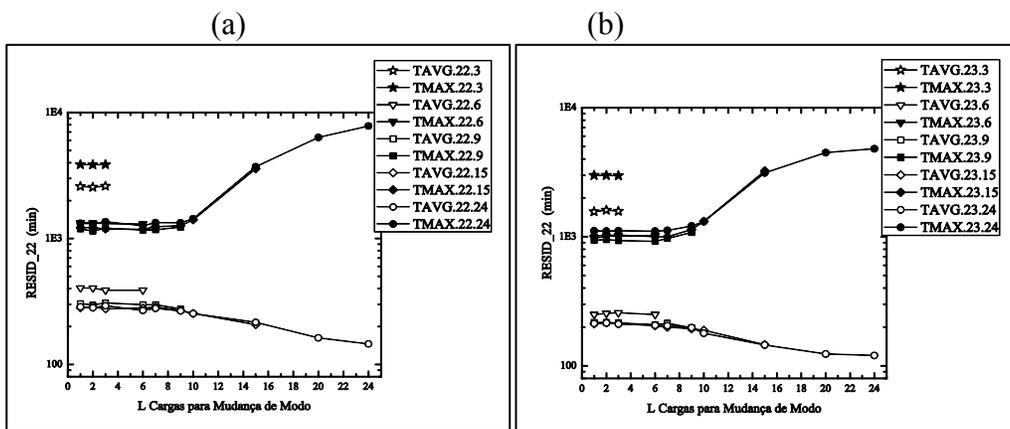


Figura 58(a) e (b) – Compromisso TAVG e TMAX – cargas e entretempo fixos (22, 23 min)

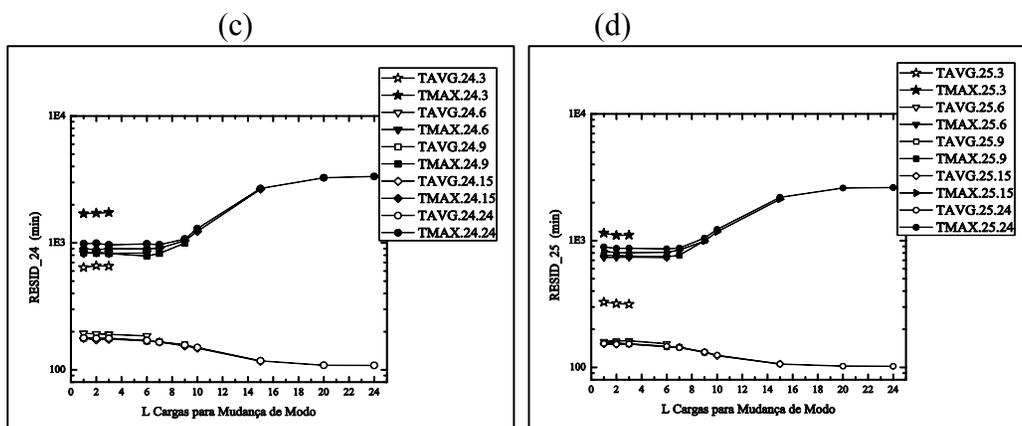


Figura 58(c) e (d) – Compromisso TAVG e TMAX – cargas e entretempo fixos (24, 25 min)

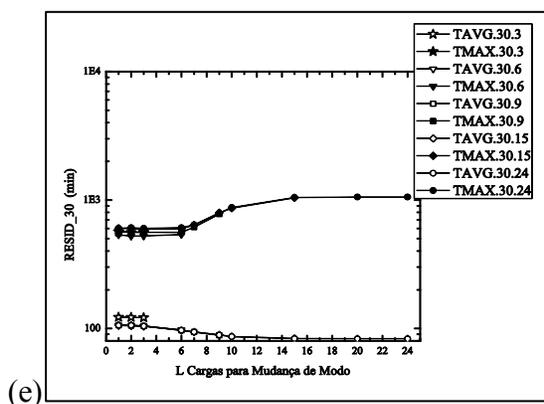


Figura 58(e) – Compromisso TAVG e TMAX – cargas e entretempo fixo (30 min)

Os resultados mostram que o controle de admissão não interfere no compromisso entre TMAX e TAVG. A Fig. 58 mostra isso para todos os valores de tráfego testados. Vemos claramente que os pares de curvas (TMAX, TAVG) de tempos médios e máximos aparecem em formato espelhado tal qual o compromisso originalmente identificado.

Importante destacar que em todos os resultados apresentados pelas figuras 58 de (a) até (e), existe uma região de mínima flutuação. Ele pode ser identificado pelo formato de “gargalo de garrafa” que se apresenta no gráfico logarítmico. Seus valores começam a se afastar relativamente um do outro (veja Fig. 58e), a partir de 6 instâncias de mudança de modo de operação, sendo postergados com o aumento da intensidade de tráfego. O valor limite desta região de “estabilidade” aponta para um número de instâncias que é múltiplo ($k*c$) do número de servidores paralelos do sistema.

Observamos que quando o tráfego aumenta na direção do limite de saturação do sistema (Fig. 58a com L tendendo a 1) os tempos médios se aproximam dos tempos máximos, ambos tendendo a valores superiores a 2500 minutos. A figura 52 também nos mostra a existência de grandes tempos máximos sempre que o número de instâncias no sistema é maior do que 10. Essas considerações nos levam a investigar a atuação do sistema operando sobre 3 a 6 instâncias. No intervalo de 3 a 6 instâncias avaliamos três situações: o controle de admissão sem mudança de modo; o modo de mudança sem controle de admissão; e controle de admissão com mudança de modo. As figuras 59 e 60 apresentam esses resultados.

As figuras 59a e 59b ratificam que esse sistema, atuando sobre três instâncias, restringe a vazão provocando resultados com elevados tempos máximos e médios. Isso restringe a região de estabilidade para 4 a 6 instâncias. Os resultados apresentados para a atuação do sistema sobre mais de 10 instâncias (Fig. 60g e Fig.60h) com mudança de modo se aproximam dos resultados básicos de FIFO puro.

Os resultados apresentados nas figuras 59c, 59d e 60e, 60f mostram que, ainda que dentro da região de estabilidade entre 4 e 6 instâncias, tráfegos com entretempos inferiores a 23 minutos são responsáveis por tempos médios e máximos elevados.

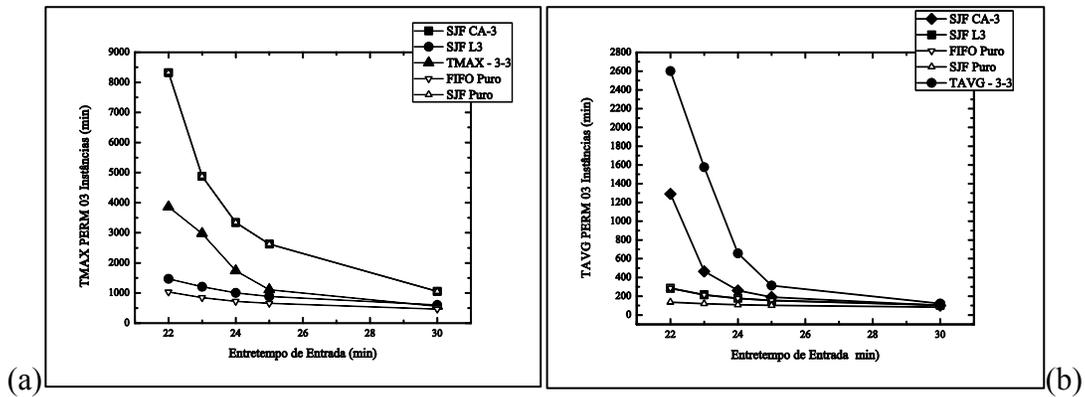


Figura 59 (a) e (b) – Resultados comparativos entre modelos para 03 instâncias

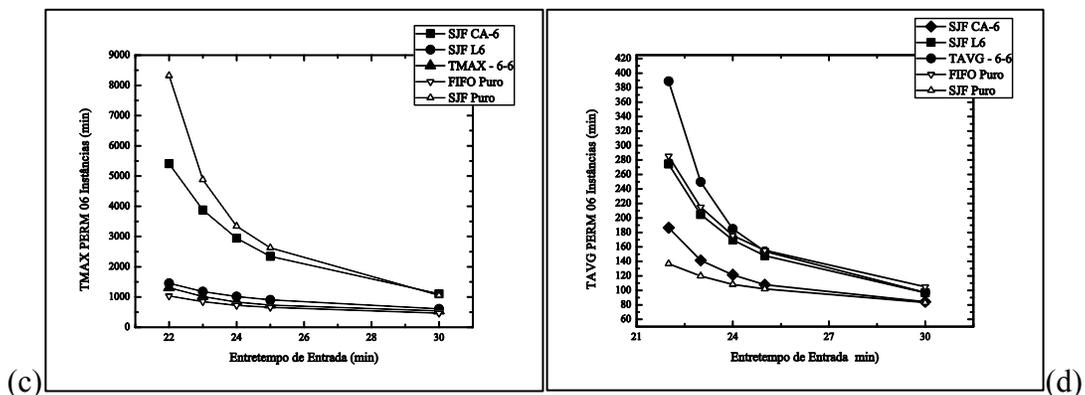


Figura 59 (c) e (d) – Resultados comparativos entre modelos para 06 instâncias

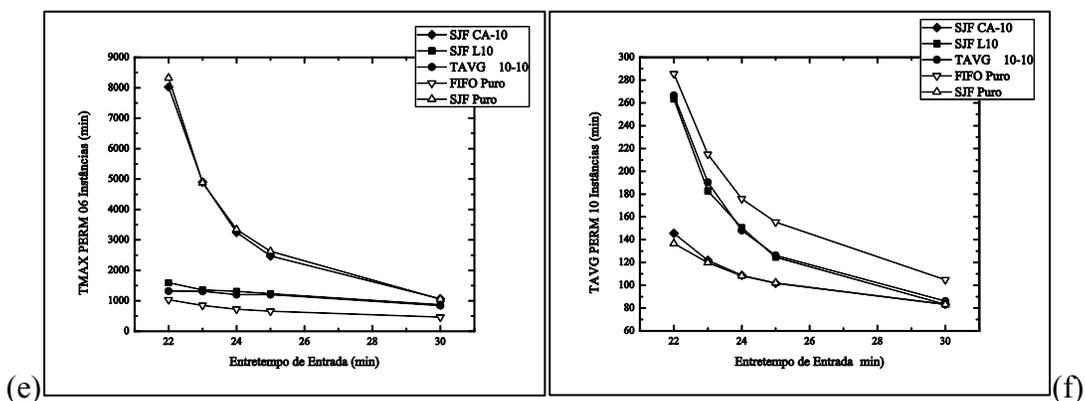


Figura 60 (e) e (f) – Resultados comparativos entre modelos para 10 instâncias

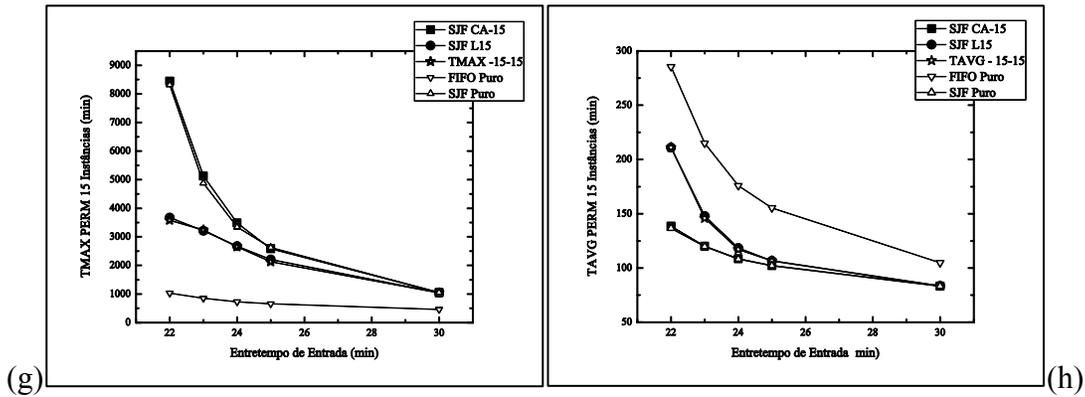


Figura 60 (g) e (h) – Resultados comparativos entre modelos para 15 instâncias

Assim, o controle de admissão impõe a formação de fila fora dos servidores e contribui para a redução dos tempos máximos oferecendo tempos médios abaixo do limite FIFO da banda (Figs. 60g, 60h). Oferece, também, significativa contribuição na identificação dos limites de uma região de operação dentro da banda FIFO/SJF. Desta forma caracteriza (no nosso caso de 4 a 6 instâncias) limites para o número de instâncias simultâneas em processamento nos servidores.

7 OBSERVAÇÕES E CONCLUSÕES

Apresentamos um problema de escalonamento de caminhões com restrição de espaço de manobra para o carregamento de *commodities* ensacadas que acontece diretamente no ambiente industrial formado por três servidores paralelos, simultaneamente à finalização de produtos. Problemas dessa natureza são usualmente tratados por teorias de otimização com o uso de redes de filas na busca por soluções ótimas. Nossa abordagem está focada em simulação por eventos discretos para a identificação de gargalos que levam a baixos desempenhos. O tratamento desta questão nos reporta à busca por redução de custos e aumento de eficácia em sistemas logísticos envolvidos por inaceitáveis índices de desperdício. A crescente necessidade de melhoria nos sistemas logísticos e de transporte de cargas é um importante motivador desse trabalho. A pesquisa às principais bases acadêmicas não retornou trabalhos relevantes que tratem o problema em questão. Extensa literatura aborda soluções que envolvem unitização, paletização, roteirização e, principalmente otimização de problemas logísticos, de produção e manufatura em geral voltados para containerização. A eliminação de processos intermediários, como o uso de centrais de distribuição (CD), procedimentos de separação e unitização não aparecem como soluções frequentes na literatura.

Iniciativas reais como o carregamento industrial sem formação prévia de estoques finais são intrigantes. Usar a movimentação simultânea de caminhões sincronizadamente com a finalização de produtos para o atendimento em tempo real ao mercado de varejo diretamente pela indústria requer atenção da academia e inovação tecnológica.

Identificamos que o modelo de carregamento, em que o problema está inserido, se caracteriza como um serviço tipo *job-shop* largamente estudado pela teoria das filas. Os modelos que elaboramos e verificamos, estão validados com a teoria de Redes Abertas de Filas de Jackson. Nosso estudo identificou que o núcleo desse modelo é formado por um sistema fechado de redes de filas com entradas e saídas simultâneas pelo mesmo servidor.

Desenvolvemos modelos de simulação computacional por eventos discretos que representam o problema descrito. A complexidade do modelo final foi evoluída de forma incremental a partir de um modelo básico validado com a teoria de Redes de Filas de Jackson. Por sua vez, o modelo também foi verificado quando submetido a condições de tráfego extremo (um erro de lógica somente apareceu quando se considerou alto tráfego com saturação de fila única de entrada para um bolsão de caminhões a serem atendidos).

Os resultados descritos nos permitem identificar os limites de tempos máximos e tempos médios (*Sojourn time*), como uma banda de flutuação das políticas de escalonamento. Dentro dessa banda identificamos uma região de relativa estabilidade de resultados caracterizando limites para o número de instâncias em processamento simultâneo. Esses limites se apresentam com valores em torno de múltiplos do número total de servidores.

Outro resultado do modelo é a confirmação do compromisso entre tempo máximo TMAX e tempo médio TAVG independentemente do modelo adotado e do modo de operação testado. Ainda que os resultados apresentem valores elevados para TMAX, eles estão reduzidos em relação aos limites da banda e representam uma importante contribuição para a contenção de picos de espera indesejáveis. O aumento nos valores médios TAVG é consequência do compromisso citado, assim como a diminuição do TMAX e vice-versa.

A melhor política a ser adotada numa operação real dependerá dos requisitos estabelecidos tanto de tempo, quanto de custos. Sabe-se que operações com escalonamento FIFO retornam resultados de baixa vazão, assim como no SJF resultam em alta vazão de saída para tráfegos acima de determinado valor (não se aplicam a tráfego relativamente baixo). O modelo aqui desenvolvido oferece resultados intermediários atuando substancialmente abaixo do limite superior da banda FIFO/SJF para tempos máximos.

Além das contribuições descritas, o modelo possibilita o planejamento de um sistema de carregamento com outras condições de distribuições de chegadas, distribuições de serviço, e de outras possíveis disciplinas de atendimento. Por outro lado, o modelo pode ser facilmente incrementado para possibilitar um número maior de *commodities* (servidores ou bicas), aumentando para quatro, cinco, seis, etc.

Uma implicação desses resultados é o uso industrial desta técnica para a elaboração de procedimentos de apoio à gestão que minimizem gargalos indesejáveis em processos de enfileiramento.

Como trabalho futuro a proposta é a de desenvolver um modelo que seja capaz de se auto ajustar a partir de requisitos estabelecidos, sem depender das distribuições de chegada e de serviço e da disciplina de serviço. Para isso, a proposta seria utilizar um controlador *Fuzzy* e um preditor adequado para a taxa de chegada e para o número de instâncias (caminhões) no sistema. A partir desses valores preditos, o controlador *Fuzzy* atuaria baseado no atraso computado por meio do Teorema de Little.

Outra proposta de trabalho futuro é o uso do conceito de Troca Rápida de Ferramenta no estudo da aplicação de um único servidor para mais de um produto com chaveamento acionado por demanda.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BANKS, J.; CARSON II, J. S.; NELSON, B. L.; NICOL, D. M.; 2000. **Discrete-Event System Simulation**. 3rd ed. Upper Saddle River, New Jersey: Prentice-Hall, Inc.

BALLOU, R.H. ; **Gerenciamento da cadeia de suprimentos: logística empresarial**. 2006. São Paulo. Ed. Artmed Bookman. 619p.

BODEK, N.; KAIKAKU: **The Power and Magic of Lean – A Study in Knowledge Transfer**. PCSPress. Vancouver, CA. 2004. Disponível em: <<http://books.google.com/books?id=v1T9WWgatHwC&pg=PA27&dq=taiichi+ono+just-in-time&lr=&hl=pt-BR&cd=6#v=onepage&q=taiichi%20ono%20just-in-time&f=false>> Acessado em: 13 jul. 2010.

CALMAX, Calcinação Max; **Carregamento de Cal Hidratada**. 2007. 1 Foto. Galeria de Imagens. Disponível em: <<http://www.calcinacaomax.com.br/main.php?link=002b>> Acesso em: 24 abr. 2011.

CARVALHO, Leonardo Sanches de; **Análise das potencialidades e vantagens do uso da simulação computacional em operações logísticas complexas, como ferramenta de auxílio à tomada de decisões: estudo de caso em uma organização industrial**. 2006. Dissertação Mestrado Profissional. Universidade Federal da Bahia. Escola de Administração. Disponível em: <http://www.bibliotecadigital.ufba.br/tde_arquivos/44/TDE-2008-08-12T124921Z-691/Publico/Dissertacao%20Leonardo%20Sanches%20de%20Carvalho%20seg.pdf>. Acesso em: 07 abr. 2010.

CHENG, T.C.E.; et al; **Just-in-time Manufacturing**. An Introduction. Second Edition. Chapman & Hall. 1996. Disponível em: <<http://books.google.com/books?id=WL95yzpj1TIC&pg=PA2&dq=taiichi+ono+just-in-time&lr=&hl=pt-R&cd=9#v=onepage&q&f=false>> Acessado em: 01 ago. 2010.

DIAS, João Carlos Quaresma; **Logística Global e Macrologística**. Lisboa, Edições Sílabo, 2005.

FIORONI M.M. ; **Estudo estratégico de dimensionamento da infra-estrutura do pátio ferroviário de Tubarão através de simulação**. Escola Politécnica, USP. Disponível em: <http://www.cbtu.gov.br/estudos/pesquisa/anpet_xviiiCongrpesqens/ac/arq87.pdf> Acesso em: 05 abr. 2010.

GEORGETTI, Alexandre Davini; **Implementação da manufatura enxuta em um ambiente com diversidade de componentes e kits de entrega**. Dissertação de Mestrado. Faculdade de Engenharia Mecânica. UNICAMP. 2004. Campinas, SP. Acessado em: 01 mar. 2011.

HILLIER, Frederick S. ; LEEBERMAN, Geraldo J. ; **Introdução à pesquisa operacional**. tradução de Helena L. Lemos. 1998. Rio de Janeiro. Editora Campus/Editora da Universidade de São Paulo. Págs. 296-316.

IMASTEC; **Acessório de Roletes 03**. (2011?). 1 Foto. Esteiras e Acessórios. Disponível em: <http://www.imastec.com.br/img/produtos/galeria/acessorios/acessorios_03.jpg> Acesso em: 24 abr. 2011.

JUNIOR, O.S.S.; LEAL, J.E.; Roteirização Dinâmica de Veículos com Janela de Tempo Usando um Algoritmo de Colônia de Formigas. In: CONCURSO DE MONOGRAFIAS CBTU. 5. 2009. Rio de Janeiro. **Anais Eletrônicos** ... Rio de Janeiro. 2009. CBTU. 1. Disponível em: <http://www.cbtu.gov.br/monografia/2009/trabalhos/artigos/logistica/3_73_AC.pdf> Acesso em: 21 set. 2010.

JUNQUEIRA, Fabrício; **Modelagem de Sistemas Flexíveis de Movimentação de Materiais através de Redes de Petri Interpretadas**. São Paulo. 2001. 128p. Dissertação (Mestrado). Escola Politécnica da USP. Departamento de Engenharia Mecatrônica e Sistemas Mecânicos. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3132/tde-22032001-150541/pt-br.php>>. Acesso em: 26 set. 2010.

MARGARIDO, M. A.; et al ; **Utilizando modelos de séries temporais para determinação de mercado geográfico: O caso da farinha de trigo na Cidade de São Paulo**. 2007. Passo Fundo. Revista Teoria e Evidência Econômica. v. 14. n. 28. Disponível em: <http://www.upf.br/cepeac/download/rev_n28_2007_art6.pdf>. Acessado em: 18 abr. 2010.

MARTINS, C.F.; **Evolução Funcional do Planejamento e Controle da Produção: Um estudo de Múltiplos Casos**. 2007. 208f. Tese (Doutoramento em Engenharia Mecânica). Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis. Out. 2007. Disponível em: <http://www.tede.ufsc.br/tesesimplificado//tde_busca/arquivo.php?codArquivo=244>. Acesso em: 22 ago. 2010.

MONTANÉ, F. A. T. ; GALVÃO, R. D. ; **A tabu search algorithm for the vehicle routing problem with simultaneous pick-up and delivery service**. 2006. Computers & Operations Research. Nº 33. Págs. 595–619. Disponível em: <<http://www.po.ufrj.br/projeto/papers/A%20tabu%20search%20algorithm%20for%20the%20vehicle%20routing.pdf>>. Acesso em: 06 abr. 2010.

MORABITO, Reinaldo. ; SOUZA, Mauricio C. de; **Roteamento de Multi-fluxos em Redes de Filas Genéricas**. 2010. Pesquisa Operacional, v.30, n.3, p.583-600, Setembro a Dezembro de 2010.

MORABITO, R.; **Trade-off curve analysis based on queueing network theory for the**

design and planning of discrete manufacturing systems. 1998. Tese de Livre-Docência, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 136p.

NAYLOR, Thomas H. ; et al. ; **Técnicas de simulação em computadores.** Trad. Edmundo Emanuel Teixeira, São Paulo, editora Vozes, 1971. 400 p.

OLIVEIRA, GUNNAR R.; **Aplicação da Gestão Baseada em Atividades à Distribuição Urbana de Bebidas.** 2008. 239p. Tese Dsc Engenharia de Transportes. COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro , Disponível em <http://www.pet.coppe.ufrj.br/index.php/producao/dissertacoes-de-msc/doc_details/116-aplicacao-da-gestao-baseada-em-atividades-a-distribuicao-urbana-de-bebidas/producao/dissertacoes-de-msc>. Acesso em: 19 abr. 2010.

PIDD, Michael ; **Computer simulation in management science.** John Wiley & Sons, Chichester, England, 1992. 351p.

PINHEIRO, Gil; **Teoria de Filas e sistemas de comunicação.** rev/Set.2010. Apostila de aulas. Rio de Janeiro, RJ. UERJ. Faculdade de Engenharia. DETEL. 2010. 141p.

PRADO, Darci Santos do; **Usando o Arena em Simulação.** Série Pesquisa Operacional vol.3. Belo Horizonte, MG. 1999. Ed. Do Desenvolvimento Gerencial. 1999. 284p.

PRADO, Gisele Esteves; FIANDRA, Regina Elena; Manual Institucional da Fatec Rubens Lara de Normas para Elaboração de Trabalhos de Conclusão de Curso. 3. ed. Santos; Fatec Rubens Lara. 2010. 93 p.

REIS, N.G.; **Como Calcular Custos de Armazenagem e Movimentação de Materiais.** NTC – Associação Nacional de Transportes de Cargas e Logística. São Paulo. 2003. Disponível em <www.ntc.org.br>. Acessado em: 21 abr. 2010.

SAKURADA, N.; MYIAKE, D.I.; **Estudo comparativo de softwares de simulação de eventos discretos aplicados na modelagem de um exemplo de Loja de Serviços.** Ouro Preto, MG. 2003. 8p. XXIII ENEGEP – Encontro Nacional de Engenharia de Produção. Disponível em: <http://www.simulacao.net/upload/artigo/ENEGEP2003_TR0104_0436.pdf>. Acesso em: 17 jan. 2011.

SELLITTO, M., et al. ; **Análise de uma operação logística de carregamento e expedição de cimento por simulação computacional.** Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, Revista Gestão Industrial v. 05, n. 04: p.130-151, 2009. Disponível em: <<http://www.pg.utfpr.edu.br/depog/periodicos/index.php/revistagi/article/view/491/390>>. Acessado em: 02 abr. 2010.

SULE, Dileep R. ; **Logistics of Facility Location and Allocation.** New York, Marcel Dekker, 2001. Disponível em: <<https://ecommerce.tandf.co.uk/catalogue/DetailedDisplay.asp?ISBN=0824704932&ResourceCentre=DUNITZ&RedirectPage=PerformSearch%2Easp&curpage>>

=1>. Acessado em: 18 abr. 2010.

TUBINO, D.F., et al.; **Automação e Sistemas de Produção: O Kanban Eletrônico**. Departamento de Engenharia de Produção e Sistemas. UFSC. 1994. Florianópolis, SC. Disponível em <<http://www.eps.ufsc.br/teacher/dalvio/artigo2.htm>> Acesso em: 27 fev. 2011.

ZANQUETTO F°, H.; et al.; **Os custos logísticos de uma distribuidora de alimentos não perecíveis**. Ouro Preto, MG. 2003. XXIII ENEGEP – Encontro Nacional de Engenharia de Produção. Disponível em: <http://www.abepro.org.br/biblioteca/ENEGEP2003_TR0112_0719.pdf>. Acesso em: 18 jul. 2010.

ZEE, van der D.J.; VORST, van der J.G.A.J.; **A Modeling Framework for Supply Chain Simulation**: Opportunities for improved Decision Making. Production Systems Design Group. Faculty of Management and Organization. University of Groningen. The Netherlands. Copyright American Institute for Decision Sciences, 2005. Disponível em: <<http://irs.ub.rug.nl/dbi/435798f94afcd>> Acessado: em 13 jul. 2010.