



Universidade Federal do Rio de Janeiro
Instituto COPPEAD de Administração
Mestrado em Administração de Empresas

**PLANEJAMENTO DE REDES LOGÍSTICAS VIA SIMULAÇÃO:
ANALISANDO FATORES DETERMINANTES DAS DECISÕES DE
LOCALIZAÇÃO E CENTRALIZAÇÃO DA DISTRIBUIÇÃO**

CIRO MAGALHÃES DE MELO JORGE

Orientador:
Peter Wanke, DSc.

Rio de Janeiro / RJ – Brasil
27 de agosto de 2008

Livros Grátis

<http://www.livrosgratis.com.br>

Milhares de livros grátis para download.

**PLANEJAMENTO DE REDES LOGÍSTICAS VIA SIMULAÇÃO:
ANALISANDO FATORES DETERMINANTES DAS DECISÕES DE
LOCALIZAÇÃO E CENTRALIZAÇÃO DA DISTRIBUIÇÃO**

CIRO MAGALHÃES DE MELO JORGE

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Administração, Instituto COPPEAD de Administração, Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Administração.

Área de concentração: Operações e Logística

Orientador: Peter Wanke, D.Sc.

Rio de Janeiro, 27 de agosto de 2008.

**PLANEJAMENTO DE REDES LOGÍSTICAS VIA SIMULAÇÃO:
ANALISANDO FATORES DETERMINANTES DAS DECISÕES DE
LOCALIZAÇÃO E CENTRALIZAÇÃO DA DISTRIBUIÇÃO**

CIRO MAGALHÃES DE MELO JORGE

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Administração, Instituto COPPEAD de Administração, Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Administração.

Área de concentração: Operações e Logística

Aprovada por:

Prof. Dr. Peter Wanke, D.Sc. (Orientador)
COPPEAD/UFRJ

Prof. Dr. Kleber Fossati Figueiredo, Ph.D.
COPPEAD/UFRJ

Prof. Dr. Rafael Garcia Barbastefano, D.Sc.
CEFET-RJ

Rio de Janeiro, 27 de agosto de 2008.

Jorge, Ciro Magalhães de Melo

Planejamento de Redes Logísticas Via Simulação: Analisando Fatores Determinantes das Decisões de Localização e Centralização da Distribuição / Ciro Magalhães de Melo Jorge. Rio de Janeiro, 2008.

xii, 135 f.: il.

Dissertação de Mestrado em Administração, Área de concentração: Operações e Logística. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Instituto COPPEAD de Administração, 2008.

Orientador: Peter Wanke

1. Planejamento de redes logísticas. 2. Simulação. 3. Centralização da distribuição. 4. Localização de armazéns. – Teses. I. Wanke, Peter (Orientador). II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Instituto COPPEAD de Administração. III. Título.

AGRADECIMENTOS

A meu pai Adílio, minha mãe Adélia, meu irmão Vitor e minha avó Áurea, pelo interminável carinho e suporte. Por se preocuparem com meu futuro e estarem sempre presentes para ajudar em todo o necessário e da forma mais natural do mundo. Qualquer sucesso que eu tenha na vida é devido a vocês!

À minha namorada linda, a Inhinha, pelo companheirismo incondicional e pelos enormes sacrifícios ao longo destes quase três anos de estudos praticamente diários. Te amo demais! Agora é hora de nós curtirmos muito juntos!

Aos amigos todos, por manterem os convites para os programas, mesmo eu estando um chato que não fazia nada a não ser estudar. Agora estou de volta com força total!

À turma de 2006 do COPPEAD. Uma galera ímpar que já formou amizades para o resto da vida!

À banca de avaliadores como um todo, que reservou com dedicação sua atenção para ler e ouvir a obra de pesquisa de um humilde candidato a mestre.

À equipe de professores do COPPEAD, composta 100% por profissionais de altíssima qualidade e competência.

À toda a equipe do COPPEAD, que confere a esta Escola nível internacional de ensino e pesquisa sem sombra de dúvida.

Ao CNPQ, pelo apoio financeiro durante parte do curso de Mestrado.

A ignorância humana tende ao infinito.

Fato permanente e imutável.

A ciência, incrédula, se recusa a aceitar...

Que sua teimosia seja eterna!

RESUMO

A literatura sobre planejamento de redes logísticas freqüentemente ignora os estoques. O presente estudo visa reduzir essa lacuna. Fora o tradicional dilema transporte/instalações, são trazidos para a perspectiva fatores ambientais comumente associados aos estoques (exs: a variabilidade da demanda e do tempo de resposta) a fim de checar se influenciam decisões ligadas ao planejamento de redes, discrimina-se: a localização de armazéns e a centralização da distribuição. Um desenho fatorial de efeitos fixos foi formulado e implementado via simulação por eventos discretos. Os dados de saída, alguns indicadores de desempenho intimamente associados a custos logísticos, foram analisados através de MANOVA (Análise Multivariada de Variância). Foi encontrado que há interação significativa entre os fatores e as decisões citadas quando se foca nos seus impactos sobre uma medida de nível de serviço por unidade de estoque no sistema. Por outro lado, medidas de transporte não sofrem nenhum impacto dessas interações. Os resultados sugerem que uma empresa apresentando altos custos relativos ligados a estoques deve considerar os fatores ambientais estudados no processo de planejamento de sua rede. Esse é o caso de empresas da indústria farmacêutica. Contudo, quando isso não for verdade (ex: indústria alimentícia), eles são negligenciáveis e podem ser desconsiderados a fim de simplificar a análise.

Palavras-chave: planejamento de redes logísticas; centralização da distribuição; localização de instalações; simulação.

ABSTRACT

The logistics network planning literature often disregards inventory issues. The present study aims at reducing this gap. Besides the traditional transportation/location trade-offs, it brings into perspective environmental factors commonly associated with inventory (such as demand and lead-time variability) in order to check if they influence network planning decisions, namely: the location of warehouses and the centralization of the distribution. A factorial experiment with fixed effects was formulated and then implemented via discrete event simulation to answer the research questions. The output data, some frequently used performance measures closely related with logistics costs, was analyzed via Multivariate Analysis of Variance (MANOVA). It was found that there is significant interaction between the factors and the fore mentioned decisions when we focus their impact in a measure of service level per unit of stock in the system. Nevertheless, we find no interaction when transportation measures are used. Results imply that a firm facing inventory costs relatively high should account for these environmental factors in logistics network planning. This is the case of a firm operating in the pharmaceutical industry. However, if this is not true and transportation costs are prevalent (e.g.: food industry), no problem exists in simplifying the analysis by ignoring them.

Keywords: logistics network planning; centralization of distribution; warehouse location; simulation.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1. Relevância.....	2
1.2. Organização do documento.....	3
2. REVISÃO DA LITERATURA	5
2.1. Visão geral do planejamento de redes logísticas.....	5
2.1.1. <i>Instalações</i>	5
2.1.2. <i>Estoque</i> s.....	7
2.1.3. <i>Transportes</i>	8
2.1.4. <i>Decisões integradas</i>	9
2.2. <i>Risk pooling</i> no planejamento de redes logísticas.....	11
2.2.1. <i>A centralização de estoques no sistema de distribuição</i>	11
2.2.2. <i>Múltiplas fontes de fornecimento</i>	28
2.2.3. <i>Transferência de estoques entre centros de distribuição</i>	31
2.2.4. <i>Comparações entre as técnicas de risk pooling</i>	32
2.3. Pesquisa operacional por simulação.....	35
2.3.1. <i>Definição de simulação</i>	36
2.3.2. <i>Características e finalidades da simulação</i>	38
2.3.3. <i>Simulação de eventos discretos</i>	39
2.3.4. <i>Etapas de um projeto de simulação</i>	40
2.3.5. <i>Meios disponíveis para execução de uma simulação</i>	47
2.3.6. <i>Simulação vs. otimização matemática</i>	48
2.3.7. <i>Otimizando a simulação</i>	51
3. OBJETIVOS E METODOLOGIA DE PESQUISA.....	52
3.1. Objetivos do estudo.....	52
3.2. Seleção da técnica de pesquisa.....	54
3.3. Ferramental de simulação utilizado.....	56
4. APRESENTAÇÃO DO MODELO EXPERIMENTAL	60
4.1. A cadeia logística e os dados de entrada.....	60
4.1.1. <i>Estruturas de distribuição e localização do centro de distribuição</i>	60
4.1.2. <i>Políticas de operação dos agentes na cadeia</i>	63
4.1.3. <i>Tempos de resposta</i>	64
4.1.4. <i>Geração das séries de demanda</i>	66
4.2. Replicações e dados de saída	69
4.3. Acabamento do modelo.....	74
4.4. O método de análise dos dados de saída	76

4.4.1. <i>Definição do tamanho da amostra</i>	81
5. ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....	84
5.1. Estatísticas descritivas	84
5.2. Análise da relação entre variáveis dependentes.....	85
5.3. Análise residual.....	87
5.4. Análise Multivariada de Variância (MANOVA)	95
5.4.1. <i>Procedimentos multivariados</i>	95
5.4.2. <i>Procedimentos univariados</i>	99
5.4.2.1. A variável <i>QCRv</i>	100
5.4.2.2. A variável <i>QCRcd</i>	102
5.4.2.3. A variável <i>FRUES</i>	104
6. CONCLUSÃO.....	113
6.1. Limitações do estudo.....	119
6.2. Direcionamentos futuros	121
7. BIBLIOGRAFIA	123
 ANEXO I. Lista de <i>softwares</i> para simulação	131
ANEXO II. Médias marginais e respectivos erros-padrão estimados.....	134

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Impacto da magnitude e da correlação entre as demandas no PE.....	13
Gráfico 2 - Histograma do erro e_{ijklmn} para a variável dependente $QCRv$	89
Gráfico 3 - Histograma do erro e_{ijklmn} para a variável dependente $QCRcd$	90
Gráfico 4 - Histograma do erro e_{ijklmn} para a variável dependente $FRUES$	90
Gráfico 5 - Dispersão dos erros e_{ijklmn} em torno das respectivas médias $\bar{y}_{ijklm}$. para $QCRv$	93
Gráfico 6 - Dispersão dos erros e_{ijklmn} em torno das respectivas médias $\bar{y}_{ijklm}$. para $QCRcd$	94
Gráfico 7 - Dispersão dos erros e_{ijklmn} em torno das respectivas médias $\bar{y}_{ijklm}$. para $FRUES$	94
Gráfico 8 – Efeito principal de $DIST$ em $QCRv$	101
Gráfico 9 - Efeito principal de RSD em $QCRv$	101
Gráfico 10 - Efeito principal de $DIST$ em $QCRcd$	103
Gráfico 11 - Efeito principal de RSD em $QCRcd$	103
Gráfico 12 - Efeito principal de RSD em $FRUES$	105
Gráfico 13 - Efeito da interação entre $DIST$ e $CORR$ em $FRUES$	107
Gráfico 14 - Efeito da interação entre $DIST$ e RSD em $FRUES$	108
Gráfico 15 - Efeito da interação entre $DIST$ e $CORR$ em $FRUES$ num contexto de RSD baixa	110
Gráfico 16 -Efeito da interação entre $DIST$ e $CORR$ em $FRUES$ num contexto de RSD alta...	110
Gráfico 17 - Efeito da interação entre $DIST$ e AMP em $FRUES$	111

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Sistemas alternativos de fornecimento e distribuição.....	34
Figura 2 – Fluxograma de um projeto de simulação.....	45
Figura 3 – Modelo estrutural do Spartan.....	56
Figura 4 – Alternativas para modelagem do tempo de resposta no Spartan.....	58
Figura 5 – Estrutura de distribuição centralizada.....	61
Figura 6 – Estrutura de distribuição descentralizada.....	61

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Informações sobre localização do armazém e o fator <i>RSD</i>	63
Quadro 2 - Parâmetros associados aos fatores <i>AMP</i> e <i>RSD</i> e aos pontos de pedido.....	67
Quadro 3 - Parâmetros de demanda diária para os mercados 1 e 2.....	68
Quadro 4 – Medidas de saída coletadas da simulação	70
Quadro 5 - Variáveis dependentes do modelo experimental.....	71
Quadro 6 - Resumo dos fatores experimentais.....	76
Quadro 7 - Comparação de tamanho de amostra entre estudos anteriores.....	82
Quadro 8 - Avaliação do tamanho da amostra e número de replicações da dissertação	83
Quadro 9 - Estatísticas descritivas das variáveis dependentes	84
Quadro 10 - Estatísticas descritivas das variáveis <i>PPC</i> , <i>FR</i> e <i>EMS</i>	84
Quadro 11 - Matriz de correlação entre as variáveis dependentes	85
Quadro 12 - Estatísticas do erro e_{ijklmn} por variável dependente e testes de normalidade	91
Quadro 13 - Estatísticas de teste por caso de transformação de variável dependente.....	91
Quadro 14 - Transformações indicadas para aproximação à normalidade.....	92
Quadro 15 - Teste Box's M.....	95
Quadro 16 - Resultados da MANOVA	98
Quadro 17 - Resultados da ANOVA para <i>QCRv</i>	100
Quadro 18 - Resultados da ANOVA para <i>QCRcd</i>	102
Quadro 19 - Resultados da ANOVA para <i>FRUES</i>	105
Quadro 20 – Explicação para os efeitos de <i>DIST</i> e <i>RSD</i> em <i>QCRv</i> e <i>QCRcd</i>	115

1. INTRODUÇÃO

O presente trabalho tem por objetivo auxiliar a busca por soluções que melhorem a eficiência da área de operações das organizações. Mais precisamente, pretende-se contribuir para a pesquisa sobre planejamento de redes logísticas, trazendo para a perspectiva também os estoques.

Antes de tudo, deve-se destacar que decisões concernentes à malha logística de uma determinada empresa não são rotineiras. São, muito comumente, isoladas por intervalos significativos, o que demonstra seu caráter de longo prazo. Embora sua implementação ocorra quase que pontualmente no tempo, a dinâmica futura prevista para a organização é obviamente levada em consideração durante o processo decisório, em virtude de seus atos afetarem intensamente a operação da organização e, por consequência, seus custos e saúde financeira. Sobre tais decisões é que recai o foco desta dissertação.

Através da análise de indicadores de desempenho operacionais, foram estudados os efeitos de fatores ambientais comumente ligados a estoques sobre decisões de planejamento de redes. Os fatores ambientais estudados foram: (1) a correlação entre as demandas de mercados distintos; a relação entre os desvios-padrão dessas demandas (a chamada magnitude); e a amplitude de variação do tempo para reabastecimento do centro de distribuição. Os fatores controláveis, por sua vez, foram: a estrutura de distribuição de produtos na cadeia, se centralizada num único armazém¹ ou descentralizada; e a localização deste(s) armazém(ns), se avançado(s) na cadeia logística, no sentido de se aproximar(em) do varejo, ou mais distante(s).

A seleção dos fatores, tanto ambientais como controláveis, se deu com base na revisão bibliográfica, cujas evidências apontavam para a relevância da interação entre os mesmos. A originalidade do trabalho está justamente em considerá-los conjuntamente para testar essas interações.

Apesar da atenção dada aos estoques, não foram esquecidas outras tradicionais variáveis comuns aos problemas logísticos. Procurou-se envolver, na busca de formas

¹ Neste trabalho, os termos armazém e centro de distribuição são utilizados indiscriminadamente como sinônimos.

econômicas de organização da rede logística, informações associadas a custos de: realização de pedidos, transportes, inspeção e manuseio de mercadorias, carregamento de estoques, perda de vendas em função de falta de produtos, investimento e manutenção de instalações, entre outros.

Para o alcance dos objetivos propostos, foi desenvolvido um experimento fatorial. A metodologia experimental aplicada foi a simulação, técnica bastante aceita em projetos de pesquisa operacional em função de sua vasta flexibilidade e capacidade de incorporar movimentos aleatórios à modelagem. Os dados de saída da simulação foram analisados através de MANOVA (*Multivariate Analysis of Variance*).

Os resultados encontrados sugerem que os fatores ambientais estudados só devem ser incluídos na análise do planejamento de redes quando a empresa possuir custos associados a estoques realmente relevantes, pois sua análise, além de se mostrar razoavelmente complexa, não afeta as decisões ótimas ligadas a indicadores de transporte.

Por fim, salientamos que este trabalho se insere num contorno mais amplo de pesquisa em planejamento de redes, o qual vem sendo incentivado pelo Centro de Estudos em Logística (CEL/COPPEAD). Compondo este esforço, podem ser citados os trabalhos desenvolvidos por Jácome e Benzecry (2005), Wanke et al. (2006), Panisset (2007), Florio (2007) e Wanke (2008). Ao leitor mais interessado, indicamos a consulta aos mesmos.

1.1. Relevância

Não é requerido muito esforço de observação para se verificar que o processo decisório ligado ao planejamento de redes logísticas está, em geral, sob a condução direta de altos escalões hierárquicos nas empresas. Os vultosos investimentos despendidos no projeto, construção e operação destas redes representam parcela significativa do orçamento organizacional e é por isso que demandam tanta atenção (Lacerda, 2000). Adicionalmente, tais decisões, por serem estruturais e tipicamente caracterizadas por custos impeditivos de mudança, impactam a eficiência de inúmeras outras atividades da organização por períodos relevantes de tempo (Wanke, 2003a; Davariz, 2006). Isso

implica que ganhos de produtividade bastante expressivos no longo prazo podem advir de um bom planejamento.

Lima (2006), por exemplo, traz uma idéia da magnitude dos custos logísticos no Brasil, os quais estima que representem cerca de 17% do Produto Interno Bruto (PIB). Especificamente com relação aos estoques, estimou que, em 2004, atingiram montante de R\$69,8 bilhões, o que, à época, significavam 3,9% do PIB brasileiro. Diante de tal ordem de grandeza, qualquer redução relativa traz, em termos absolutos, economia significativa. Sendo assim, é relevante que se envolva os estoques em estudos de redes logísticas.

Cumpre mencionar também que a adequada calibragem dos estoques na rede serve também como instrumento à manutenção e conquista de mercados, através da prestação de um bom atendimento a clientes, assegurando disponibilidade de produtos e entregas completas (Ballou, 2001).

1.2. Organização do documento

O capítulo 2 apresenta a revisão bibliográfica, oferecendo primeiramente uma visão geral das dimensões existentes no planejamento de redes logísticas, para então tratar mais exclusivamente das práticas de *risk pooling*. Ao final, é discutida a técnica de simulação num contexto de pesquisa operacional, devotando especial atenção à simulação por eventos discretos, e comparando também os atributos da simulação aos de outras técnicas como, por exemplo, a programação matemática.

O capítulo 3 define os objetivos do estudo, com base no que foi estudado na revisão bibliográfica. Posteriormente, apresenta os motivos da seleção da simulação como técnica de pesquisa e descreve a ferramenta utilizada para desempenhar os experimentos.

O capítulo 4 inicia detalhando a estruturação do modelo e dos experimentos, informando as premissas assumidas e os parâmetros utilizados. Trata, na seqüência, da definição das variáveis de interesse, da forma de coleta dos dados de saída da simulação e do método de análise desses dados.

O capítulo 5 expõe todo o processo de análise, indo desde a avaliação das premissas e da relação entre as variáveis dependentes até a apresentação e discussão dos resultados encontrados, os quais foram separados por tipo de procedimento utilizado para análise, primeiro, o multivariado e, posteriormente, o univariado.

O capítulo 6 traz as conclusões do estudo, destacando, contudo, suas limitações, e aproveitando para indicar oportunidades futuras de desenvolvimento do tema.

2. REVISÃO DA LITERATURA

2.1. Visão geral do planejamento de redes logísticas

Conforme colocado na seção 1.1, a configuração econômica de redes logísticas desperta grande interesse no ambiente dos negócios. Em resposta, a academia tem mostrado intensa produção de material sobre o assunto. Diversas formas de se tratar problemas normalmente enfrentados pelas organizações foram e continuam sendo exploradas. O objetivo com a revisão a seguir foi expor quais são as decisões envolvidas no processo de planejamento logístico, segregando-as em três dimensões: instalações, transportes e estoques. Ao final desta seção, é trazida também uma breve discussão sobre a interdependência dessas dimensões.

2.1.1. *Instalações*

Num projeto logístico *greenfield*, ou seja, que inicia da construção das plantas de produção e/ou distribuição, o primeiro desafio que surge ao gestor logístico é definir o número, a capacidade e a localização de instalações. Estas são decisões clássicas do desenho de redes logísticas amplamente mencionadas na literatura (Brandeau e Chiu, 1989, Lacerda, 2000a; Bowersox et al., 2002, Wanke, 2003a).

Outras decisões ligadas à localização de instalações são: a alocação de clientes a centros de distribuição (ou a delimitação de áreas de influência) e a alocação de centros de distribuição às fábricas, além da definição da combinação de produtos que deve ser distribuída ou fabricada a partir de cada instalação (Brandeau e Chiu, 1989, Lacerda, 2000a; Wanke, 2003a).

Lacerda (2000a) classifica as decisões mencionadas no primeiro parágrafo como decisões estratégicas dos estudos de localização de instalações, enquanto que as demais, classifica como decisões de nível tático.

Segundo Wanke (2003a), as decisões de número, capacidade e localização de instalações dão a forma e a estrutura de um sistema logístico. Por esse motivo, impactam fortemente não apenas os custos fixos de manutenção das mesmas, mas

também diversos outros custos das empresas. Segundo o autor, o objetivo do planejador do sistema deve ser minimizar os custos totais atentando para os diversos *trade-offs* envolvidos.

Muito embora a idéia de minimização de custos pareça a mais intuitiva e lógica, Brandeau e Chiu (1989) relatam que, em estudos de localização, também são comuns outros objetivos, tais como: minimização do tempo médio de viagem ou da distância entre pontos da rede, minimização do tempo máximo de viagem entre dois pontos na rede ou, até mesmo, a maximização do tempo mínimo de viagem. O fato de o critério único e exclusivo na literatura não ser a minimização de uma função de custo total deve estar relacionado à afirmação de Wanke (2003a): “a localização de instalações, em geral, é determinada por um fator mais crítico que os demais”. A existência de um fator predominante é uma possível explicação para a heterogeneidade de objetivos identificada na revisão literária de Brandeau e Chiu (1989), pois a otimização desse fator tenderia a paralelamente minimizar a função custo.

Nesse contexto, tanto Lacerda (2000b) quanto Wanke (2003a) comentam que uma variável que exerce particular influência na decisão do gestor logístico quando da localização do centro de distribuição é a distância até o cliente. Os autores continuam a argumentação dizendo que, inclusive por isso, muitas vezes as empresas avançam os centros de distribuição na cadeia a fim de se aproximarem do cliente e assim estarem aptos a proporcionar melhor nível de serviço.

Wanke (2003a) informa que tal pré-concepção é conhecida como a “premissa da presença local” e que algumas transformações no ambiente competitivo e tecnológico dos serviços de transportes vêm suscitando reavaliação da mesma, pois geraram maior confiabilidade no tempo de entrega e também a possibilidade de monitoramento contínuo dos veículos e carregamentos.

Lacerda (2000b) defende que, em última instância, somente a elaboração de uma análise econômica pode definir a melhor estrutura, pois nada garante *a priori* que armazéns avançados sejam realmente a opção mais eficiente.

Os estudos de localização de instalações caracterizam-se, contudo, por serem extremamente complexos e dependentes de densa massa de dados (Lacerda, 2000a; Bowersox et al., 2002; Wanke, 2003a). O número de alternativas de localização disponíveis às empresas, e conseqüentemente, de formas de organização do fluxo de produtos, cada uma com inúmeros parâmetros, é geralmente bastante grande, o que requer um esforço significativo de coleta e preparação de dados para análise. Não só isso, a adequada modelagem desses problemas envolve também o conhecimento profundo em técnicas sofisticadas de pesquisa operacional. Dentre alguns parâmetros geralmente utilizados na modelagem, podem ser citados: dados de demanda, número e características de produtos, distâncias ou tempos de viagem entre pontos por modal, capacidade das instalações, capacidade de filas, etc. (Brandeau e Chiu, 1989, Lacerda, 2000a; Bowersox et al., 2002, Wanke, 2003a).

2.1.2. Estoques

Segundo Peterson e Silver (1979) e Bowersox et al. (2002), as empresas utilizam estoques basicamente pelos seguintes motivos: (a) evitar que o tempo necessário ao recebimento de mercadorias seja repassado ao cliente, logo, permitindo atendê-lo instantaneamente; (b) proteger o nível de atividade da empresa e o nível de serviço ao cliente de incertezas, respectivamente, na oferta e na demanda; (c) aproveitar economias de escala, como por exemplo, desconto no preço unitário de mercadorias na aquisição de grandes lotes.

Os custos envolvidos na operação de estoques e a relação entre eles são fatores que devem ser considerados na tomada de decisões gerenciais (Peterson e Silver, 1979). Tais custos são derivados do carregamento de estoques (tanto o disponível como o estoque em trânsito), da falta de produto para atendimento à demanda ou de pedidos de reposição/reabastecimento².

Focando em empresas com atividades de intermediação comercial, logo, desconsiderando fabricantes, esses custos podem ser descritos da seguinte maneira,

² Na presente dissertação, nos referimos a pedidos de reposição como aqueles realizados pelo varejo perante o centro de distribuição, ao passo que os pedidos de reabastecimento são aqueles realizados pelo centro de distribuição perante a fábrica.

segundo Peterson e Silver (1979). Os custos de carregamento referem-se ao custo de oportunidade do capital, a despesa incorrida com a armazenagem da mercadoria (custo do espaço, não de movimentação), o custo da obsolescência, do seguro e das perdas. O custo da falta refere-se à perda de margem de contribuição decorrente de uma venda não efetuada e também aos custos associados à deterioração da imagem da empresa ou da marca do produto. Por último, o custo de pedir está ligado a todas as atividades administrativas empreendidas desde o momento em que se descobre a necessidade de reposição/reabastecimento até o momento em que o pedido é recebido, aí incluídas a cotação e negociação de preços, a abertura do pedido, o registro e controle da transação, a inspeção de recebimento, a atualização do sistema de estoques e o processamento do pagamento ao fornecedor.

Inúmeros tipos de decisão estão diretamente associadas aos estoques. Entretanto, apenas as decisões no âmbito das estratégias de *risk pooling* podem ser consideradas como realmente impactantes da estrutura do sistema logístico, logo, estando intimamente conectadas ao processo de planejamento de redes. Tais decisões serão melhor discutidas na seção 2.2.

As demais decisões sobre estoques ou não afetam o planejamento de redes ou exercem influência menos relevante, não merecendo destaque nesta revisão. Tais decisões estabelecem: a política de gestão de estoques (se reativa à demanda ou baseada em previsão de vendas), a quantidade e o momento de realização de pedidos de reposição/reabastecimento e a quantidade mantida em estoque de segurança.

De qualquer forma, visto que nossa proposta – conforme mencionado no preâmbulo do capítulo 1 – é trazer para a perspectiva do planejamento de redes também os estoques, fez-se imprescindível a determinação de parâmetros para as mesmas visando operacionalizar o modelo empregado no estudo. O modelo será descrito no capítulo 4.

2.1.3. Transportes

Jayaraman (1998), ao discorrer sobre decisões estratégicas em transportes num contexto de planejamento de redes logísticas, citou: a escolha dos modais de transporte, a decisão sobre propriedade da frota e a política de consolidação de cargas. Brandeau e Chiu,

1989, por sua vez, citaram também, como uma importante decisão nesse contexto, a definição dos macro-fluxos entre os nós da rede.

Tais decisões são caracterizadas por diversos parâmetros que, num modelo perfeito de planejamento de redes logísticas, deveriam ser incluídos. A decisão de modal, por exemplo, é influenciada pelas seguintes variáveis, segundo Fleury (2003): velocidade, consistência (confiabilidade), capacitação (possibilidade de trabalhar com diferentes volumes e variedades de produtos), disponibilidade (número de localidades onde se encontra presente) e frequência.

Como era de se esperar, a dimensão transporte mantém estreita conexão com as demais dimensões ligadas ao planejamento de redes logísticas. Esta interação é discutida na subseção seguinte.

2.1.4. *Decisões integradas*

As subseções anteriores expuseram, individualmente, as três principais dimensões presentes no planejamento de redes logísticas³. Decisões acerca das mesmas possuem, porém, forte interdependência e devem ser tratadas em conjunto (Lacerda, 2000). O problema nisso é que as inúmeras variáveis envolvidas tornam a tarefa de integrá-las eficientemente bastante complexa.

A lacuna está justamente aí. Constan relativamente poucos artigos que buscam analisar globalmente o problema. Jayaraman (1998) e Croxton e Zinn (2005) relatam que, em estudos de planejamento de redes, os estoques são geralmente deixados de lado. Segundo esses autores, o que predomina na literatura é a busca pelo balanceamento entre custos fixos da abertura de armazéns e custos de transporte. A análise de estoques é inserida acessoriamente e apenas após a montagem da rede. Eles mostram, contudo,

³ Outra dimensão bastante importante, e que no Brasil tem mostrado preponderância sobre as demais em diversos casos concretos, se refere aos incentivos fiscais de ICMS (imposto sobre operações relativas à circulação de mercadorias e prestação de serviços de transporte interestadual, intermunicipal e de comunicação) concedidos por governos estaduais. Apesar de relevantes, regras tributárias são, no entanto, efêmeras. O que é válido hoje, num futuro próximo pode não ser. Uma vez que o presente estudo visa contribuir para o conhecimento a respeito dos fundamentos do planejamento de redes logísticas, impostos foram ignorados.

que negligenciar a decisão a respeito de estoques durante o planejamento pode gerar resultados bem inferiores ao ótimo.

Mesmo quando se tem a intenção de integrá-las todas, invariavelmente ocorre falha no tratamento adequado de algum aspecto de custo. Jayaraman (1998), por exemplo, construiu um modelo de programação matemática, denominado FLITNET – Facility Location, Inventory, Transportation Network – que abarcava as três dimensões. Todavia, por considerar a demanda determinística e plenamente atendida, não embutiu em sua análise custos de falta de produto e os *trade-offs* associados, em especial, o custo do estoque de segurança, tendo tratado somente os estoques de ciclo e em trânsito. Croxton e Zinn (2005), por outro lado, fizeram o inverso: incluíram estoques de segurança, porém ignoraram estoques de ciclo e em trânsito. Tais autores também formularam seu modelo através de programação matemática.

Ao apresentarmos as deficiências dos modelos acima, de modo algum pretendemos tirar o mérito de suas propostas. Até porque muitos outros trabalhos ignoram deliberadamente a interdependência das três dimensões e restringem seus estudos a somente duas ou até mesmo a uma exclusivamente. Nem assim, há de se destacar, perdem necessariamente qualidade e validade. A questão fundamental é se existe defesa robusta à utilização do modelo em determinado contexto.

Certamente, tomar as variáveis como um conjunto é importante durante o processo decisório. Deve-se focar, contudo, aquelas que apresentam flexibilidade para serem manipuladas e, simultaneamente, aparentam maior relevância sob as circunstâncias do momento. Soluções logísticas ótimas, a partir de modelos de planejamento de redes plenamente integrados e completos, não estão disponíveis até a data. Esse é mais um incentivo para o surgimento de estudos que desenvolvam o conhecimento ora vigente.

2.2. Risk pooling no planejamento de redes logísticas

Dentro das amplas possibilidades apresentadas na seção anterior, esta seção tem como fim mostrar o que a literatura traz a respeito de um tema particular: *risk pooling*⁴ no planejamento de redes logísticas.

A bibliografia sobre *risk pooling* pode ser considerada como um conjunto de quatro assuntos mais específicos. São eles: a centralização de estoques, a análise de múltiplas fontes de fornecimento, a transferência de estoques entre centros de distribuição e a padronização de componentes e peças para produção ou reposição.

Observando, todavia, o escopo do presente estudo, não se pretende exaurir o conhecimento existente sobre todas estas práticas. Propõe-se apresentar, de maneira aprofundada, o que a academia vem desenvolvendo para o caso da centralização. Dentre as outras abordagens, a padronização de peças foi a única completamente ignorada durante a discussão da literatura⁵. As demais, por contribuírem em grau menor do que a centralização para a discussão dos resultados, terão apenas uma breve exposição sobre suas características.

É importante mencionar que, embora não trabalhadas na modelagem empregada nesta dissertação, tais técnicas podem ser alternativas ou complementares à centralização, dependendo da situação particular da empresa. Vale acrescentar, inclusive, que alguns artigos discutidos adiante têm justamente por objetivo comparar a efetividade de combiná-las.

2.2.1. A centralização de estoques no sistema de distribuição

Em pioneiro trabalho, Maister (1976) identificou a possibilidade de redução no nível de estoque de segurança de um produto através da centralização do atendimento à sua demanda, sem que isto impactasse negativamente o nível de serviço ao cliente. O resultado encontrado em seu artigo, conhecido como a Regra da Raiz Quadrada (*Square*

⁴ Tradução perfeita e única para esta expressão é improvável de existir. Dependendo do contexto, contudo, *risk pooling* poderia ter seu sentido melhor aproximado por “diluição de riscos” ou “mitigação de riscos”.

⁵ A padronização de componentes não foi explorada na revisão bibliográfica porque, conforme será visto mais a frente, a modelagem de pesquisa utilizou somente um produto para facilitar as análises.

Root Law), relacionava a quantidade mantida em estoque de segurança com o número de instalações utilizadas para estocagem no sistema de distribuição.

Desde então, surgiram diversos estudos correlatos, muitos com o intuito de relaxar as restritivas simplificações realizadas por Maister (1976). Zinn, Levy e Bowersox (1989), desenvolveram um modelo mais flexível e provaram matematicamente que a Regra da Raiz Quadrada era um caso particular do mesmo. O *Portfolio Effect (PE)*, como foi nomeado, informava a redução percentual que era obtida no nível de estoque de segurança ao serem centralizados estoques de duas ou mais instalações, *ceteris paribus*. A fórmula do *Portfolio Effect*, para uma rede de distribuição com somente duas localidades iniciais e uma final, é dada abaixo:

$$PE = 1 - \frac{SS_a}{\sum_{i=1}^2 SS_i} = 1 - \frac{\sqrt{M^2 + 1 + 2 \cdot M \cdot \rho_{12}}}{M + 1}, \text{ e} \quad (1)$$

$$M = \sigma_1 / \sigma_2, \text{ para } \sigma_1 \geq \sigma_2 \text{ e } \sigma_2 > 0, \quad (2)$$

onde:

SS_a = estoque de segurança agregado para um determinado produto após a consolidação dos estoques das unidades descentralizadas,

SS_i = estoque de segurança para um determinado produto na unidade descentralizada i ,

M = magnitude,

σ_1 = desvio-padrão da demanda na unidade descentralizada 1,

σ_2 = desvio-padrão da demanda na unidade descentralizada 2,

ρ_{12} = coeficiente de correlação entre as demandas das unidades 1 e 2.

O Gráfico 1 ilustra bem a relação entre as variáveis especificadas acima:

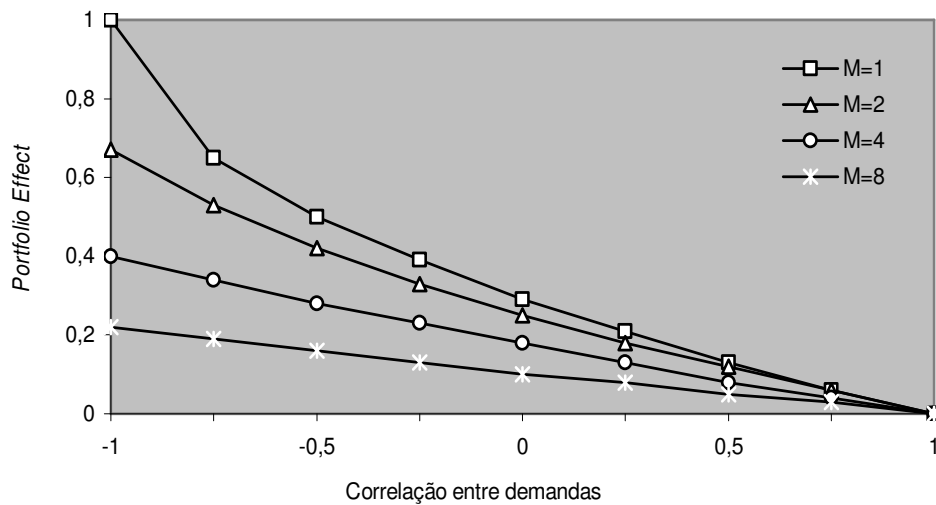


Gráfico 1 - Impacto da magnitude e da correlação entre as demandas no PE
Zinn, Levy e Bowersox (1989)

Tais resultados são, no entanto, sujeitos à observação de algumas importantes premissas: (a) inexistência de transferências de estoque entre as unidades descentralizadas; (b) o tempo de resposta dessas unidades é determinístico, igual para todas e não varia com a centralização; (c) o nível de serviço, medido pela probabilidade de não faltar estoque em cada ciclo de pedido, é constante e independente do número de instalações para estoque na rede; (d) a demanda, em cada um dos mercados atendidos, possui distribuição Normal; (e) o estoque de segurança da unidade i é igual a $k\sigma_i$, onde k é um fator de segurança comum à todas as unidades utilizadas para estocagem; (f) os tempos de resposta são iguais a uma unidade de tempo antes e após a centralização⁶; (g) a quantidade de pedido é igual ao consumo estimado no tempo de resposta⁷.

A explicação para a possibilidade de redução no custo com estoque de segurança mantendo-se nível de serviço constante, está ligada à mitigação do risco de demanda (medido por sua oscilação em torno da média). Quando a distribuição é centralizada, torna-se viável, exceto em situações de correlação perfeitamente positiva ($\rho_{12} = 1$), explorar compensações nas quantidades demandadas pelos diferentes mercados atendidos pela organização. Em períodos de consumo acima da média num determinado

⁶ A modelagem matemática contida em Zinn, Levy e Bowersox (1989) que define o estoque de segurança leva em consideração o desvio-padrão da demanda para aplicação do fator de segurança e não o desvio-padrão da demanda no tempo de resposta. Desta forma, assume-se implicitamente tempo de resposta como sendo igual a uma unidade de tempo.

⁷ Esta última premissa também estava implícita em Zinn, Levy e Bowersox (1989) e foi explicitada somente em Zinn, Levy e Bowersox (1990), como resposta à crítica de Ronen (1990).

mercado, outro poderia apresentar recessão. O estoque poderia então ser dimensionado para aproveitar este fato, sendo isto especialmente válido quando a magnitude se aproxima de 1. Já no caso de distribuição descentralizada, o potencial para tais compensações é eliminado porque cada unidade deve estar preparada para enfrentar oscilações na demanda isoladamente.

Zinn, Levy e Bowersox (1989) demonstraram também qual seria o *PE* ao se consolidar, em uma única instalação, um subgrupo qualquer de instalações da rede composto por três ou mais localidades descentralizadas. Aproveitaram então para propor um método de análise (a matriz *PE*) para auxiliar a seleção entre as diferentes alternativas existentes. Apesar disto, não desenvolveram uma regra geral que indicasse ao gestor logístico quais unidades deveriam ser centralizadas e nem em quantas, de modo a permitir a otimização dos estoques na consolidação. Dependendo do número de instalações iniciais, o processo decisório poderia tornar-se demasiadamente custoso, pois as interações entre as demandas dos diversos mercados e o potencial de redução de estoque teriam que ser analisados para cada par de instalações.

Mahmoud (1992) estendeu a fórmula do *Portfolio Effect*, utilizando a definição de magnitude (*M*), para múltiplas localidades, muito embora tenha criticado a plenitude informacional contida no *PE*. Alegou que por esta ser uma medida percentual e, portanto, relativa, se mostrava incapaz de indicar, sozinha, o esquema ótimo de consolidação, ou seja, qual o conjunto de unidades descentralizadas que combinadas resultariam no maior ganho em uma eventual centralização. Para resolver este problema, propôs a utilização da medida *Portfolio Quantity Effect (PQE)*. Tal inovação, demonstrada abaixo, simplesmente transformava a fórmula original em uma medida absoluta que permitisse uma melhor comparação entre alternativas de consolidação de estoques.

$$PQE_{I'} = PE_{I'} \left(\sum_{i \in I'} SS_i \right), \quad (3)$$

onde:

n = número de instalações de estoque indexadas por i , $i \in I = \{1, \dots, n\}$,

SS_i = estoque de segurança localizado na instalação i ,

I' = subconjunto das instalações I a serem consolidadas, $I' \subset I$, $I' = m$, $2 \leq m \leq n$,

$PE_{I'}$ = *Portfolio Effect* gerado ao se consolidar as instalações I' .

A crítica de Mahmoud (1992) é pertinente, porém a fórmula original do PE é incompleta do ponto-de-vista de informação gerencial mais pela maneira como foi definida do que por se tratar de uma medida relativa. Conforme Evers e Beier (1993) observaram, é possível tirar conclusões sobre o esquema ótimo de consolidação a partir do PE dado de forma percentual, desde que sua derivação leve em conta não só o subgrupo de unidades a serem centralizadas, mas todo o conjunto de instalações integrantes da rede logística. A versão de Evers e Beier (1993) para o PE será apresentada mais adiante.

Voltando ao PQE , Mahmoud (1992) provou, através de exemplos numéricos, que nem sempre uma consolidação integral das unidades descentralizadas é mais efetiva na redução dos estoques de segurança do que consolidações parciais. Pode, inclusive, ser pior. Quando são tratados os demais fatores de custo logístico que não o carregamento de estoques, isso pode se acentuar. Tais fatores, na visão de Mahmoud (1992), são transporte, investimento e despesas em instalações e, finalmente, compras/suprimento. Alegando que a preocupação do gestor logístico é com o custo total do sistema, o critério de redução no estoque de segurança (PQE) ainda seria incompleto para tomar decisões envolvendo mudanças na estrutura da rede de distribuição. Sendo assim, o mesmo autor sugeriu também a utilização da medida *Portfolio Cost Effect* (PCE), a qual representaria a economia de custo ocasionada com a consolidação e seria a soma de $PHCE$ com $PTCE$, $PICE$ e $PPCE$, onde:

- $PHCE$ (*Portfolio Holding Cost Effect*) = diferença líquida nos custos de carregamento de estoque entre os casos descentralizado e centralizado;
- $PTCE$ (*Portfolio Transportation Cost Effect*) = diferença líquida nos custos de transporte entre os casos descentralizado e centralizado;
- $PICE$ (*Portfolio Investment Cost Effect*) = diferença líquida nos custos de investimento em instalações, bem como de despesas recorrentes, entre os casos descentralizado e centralizado;

- *PPCE (Portfolio Procurement Cost Effect)* = diferença líquida nos custos de compras entre os casos descentralizado e centralizado.

Para $2 \leq m \leq n$, o número de alternativas de consolidação e, portanto, de diferentes medidas de *PCE* é igual a $\sum_{m=2}^n m \binom{n}{m}$. Isso porque Mahmoud (1992) assume a premissa de que a centralização ocorrerá em umas das localidades pré-existentes. Caso contrário, as alternativas tenderiam a infinito. Mesmo com esta premissa, quando n for grande, avaliar todas as estratégias para cada uma das n localidades em busca do esquema ótimo se tornaria muito custoso, senão impossível. Mahmoud (1992) propôs, então, um modelo de programação matemática para auxiliar esta tarefa. A eficácia e efetividade do modelo estão, contudo, limitadas à seguinte condição: é sabido em que localidade m a consolidação deve ocorrer para cada subconjunto I' de modo a se obter um *PCE* ótimo no respectivo subconjunto. Sendo esta premissa verdadeira, o número de alternativas de consolidação cairia para $\sum_{m=2}^n \binom{n}{m}$ e o modelo indicado seria aplicável.

Seguindo cronologicamente a evolução da medida *Portfolio Effect*, podemos citar Tallon (1993) como o primeiro a acrescentar variabilidade no tempo de reabastecimento em sua fórmula. Sua modelagem, todavia, apresentava algumas premissas implícitas que não se mostraram muito práticas. Conforme Evers e Beier (1998) provaram, na articulação sugerida por Tallon (1993), o tempo de resposta da unidade centralizada aparecia como função dos tempos de resposta dos centros de distribuição descentralizados. As Equações 4 e 5 estariam implícitas na modelagem de Tallon (1993):

$$\sigma_{DL} = \sqrt{\sum_{i=1}^n \sigma_{DL_i}^2 + 2 \sum_{i=1}^n \sum_{l=1}^{i-1} (\rho_{DL_i,l} \prod_{j=i,l} \sigma_{DL_j})}, \quad (4)$$

$$\sigma_{DL_i} = \sqrt{L_i \sigma_{D_i}^2 + D_i^2 \sigma_{L_i}^2}, \quad (5)$$

onde:

σ_{DL} = desvio-padrão da demanda durante o tempo de resposta na unidade centralizada,
 σ_{DL_i} = desvio-padrão da demanda durante o tempo de resposta na unidade descentralizada i ,
 $\rho_{DL_{i,l}}$ = correlação entre as demandas durante os tempos de resposta nas unidades descentralizadas i e l ,
 L_i = tempo de resposta médio na unidade descentralizada i ,
 D_i = demanda média durante um período na unidade descentralizada i ,
 σ_{D_i} = desvio-padrão da demanda durante um período na unidade descentralizada i ,
 σ_{L_i} = desvio-padrão do tempo de resposta na unidade descentralizada i .

Encontrar uma explicação convincente que suporte tal relação é uma tarefa difícil. Revela-se muito mais defensável considerar a hipótese de que o tempo de resposta na instalação central é função de variáveis como modal utilizado para o transporte até o respectivo local, condições de tráfego, distância entre origem e destino, etc, ou seja, variáveis indiferentes ao tempo de resposta nas unidades descentralizadas.

Tallon (1993) criou ainda outro problema potencial em seu modelo. Conforme a Equação 4 demonstra, o autor utilizou a correlação entre as demandas durante o tempo de resposta das unidades descentralizadas, ao invés de simplesmente utilizar a correlação entre as demandas. Isso produz uma dificuldade prática que é medir a correlação proposta. Para que isso fosse possível, o momento da efetuação do pedido por uma unidade descentralizada teria que sempre coincidir com o momento em que outra unidade também realizasse seu pedido. Considerando-se o tempo como variável discreta, sincronia tão perfeita já seria improvável. Modelando-o de forma contínua, seria matematicamente impossível.

Por sua vez, Evers e Beier (1993) trataram oscilações no tempo de resposta da instalação centralizada de uma maneira mais adequada. Em seu modelo, os dados podiam ser medidos diretamente no mundo real sem a imposição de condições adicionais, algo que confere flexibilidade e praticidade ao usuário.

Evers e Beier (1993) não pararam por aí e acrescentaram outras inovações à notação do *Portfolio Effect*. Conforme mencionado anteriormente, a dupla melhorou a qualidade informacional do *PE* ao levar em consideração não só o subgrupo de instalações para estoque a serem centralizadas, mas todas aquelas integrantes da rede logística. Sendo assim, mesmo caracterizado como uma medida relativa, o *PE* não demandava manipulação adicional, tal qual a proposta por Mahmoud (1992), de modo a permitir comparações efetivas entre esquemas de consolidação distintos.

Um terceiro atributo peculiar da formulação sugerida por Evers e Beier (1993) é a possibilidade de estimar diretamente os efeitos de uma centralização de n localidades iniciais para m localidades finais, onde $n > m \geq 1$. A flexibilidade na partição da demanda de uma unidade descentralizada qualquer entre as m unidades centralizadas representa um ponto forte adicional do modelo. Tal característica pode ser observada pela seguinte equação, a qual foi utilizada para a derivação da forma final do modelo:

$$D_{a_j} = \sum_{i=1}^n W_{ij} D_{b_i} \text{ para todo } j, \quad (6)$$

onde:

D_{a_j} = média da demanda durante um período de tempo na unidade centralizada j ,

W_{ij} = proporção da média da demanda durante um período de tempo transferida da unidade descentralizada i para a unidade centralizada j ,

D_{b_i} = média da demanda durante um período de tempo na unidade descentralizada i .

A relação acima está sujeita a somente duas restrições intrínsecas ao próprio significado de W_{ij} . São elas:

$W_{ij} \geq 0$ para todo i e todo j e

$$\sum_{j=1}^m W_{ij} = 1 \text{ para todo } i.$$

Vale comentar também que, na modelagem de Evers e Beier (1993), nenhuma premissa é estabelecida sobre a distribuição da demanda, nem tampouco sobre a do tempo de resposta. Fundamentando-se na desigualdade de Chebychev, argumentam que k , o fator de segurança de estoque, pode ser desconsiderado como um fator caso seja definido assim:

$$k = \sqrt{\frac{\beta}{1-\beta}} - 1, \quad (7)$$

onde:

β = probabilidade de não haver falta de estoque em cada ciclo de pedido.

Os autores, em sua derivação, partem do mesmo ponto que Zinn, Levy e Bowersox (1989) e, após incorporar as inovações citadas, chegaram à seguinte definição para o PE :

$$PE = 1 - \frac{\sum_{j=1}^m k_{a_j} \sqrt{L_{a_j} \left(\sum_{i=1}^n (W_{ij}^2 \cdot \sigma_{D_{bi}}^2) + 2 \sum_{i=1}^n \sum_{l=1}^{i-1} (W_{ij} \cdot W_{lj} \cdot \delta_{D_{bil}}) \right) + \sigma_{L_{a_j}}^2 \cdot \sum_{i=1}^n W_{ij} D_{bi}^2}}{\sum_{i=1}^n k_{b_i} \sqrt{L_{b_i} \cdot \sigma_{D_{bi}}^2 + D_{bi}^2 \cdot \sigma_{L_{bi}}^2}}, \quad (8)$$

onde:

k_{a_j} = fator de segurança de estoque para a instalação centralizada j ,

k_{b_i} = fator de segurança de estoque para a instalação descentralizada i ,

L_{a_j} = média do tempo de resposta para a instalação centralizada j ,

L_{b_i} = média do tempo de resposta para a instalação descentralizada i ,

$\sigma_{L_{a_j}}$ = desvio-padrão do tempo de resposta na instalação centralizada j ,

$\sigma_{L_{b_i}}$ = desvio-padrão do tempo de resposta na instalação descentralizada i ,

$\sigma_{D_{aj}}$ = desvio-padrão da demanda durante uma unidade de tempo na instalação centralizada j ,

$\sigma_{D_{bi}}$ = desvio-padrão da demanda durante uma unidade de tempo na instalação descentralizada i ,

$\delta_{D_{bil}}$ = covariância entre as demandas das instalações descentralizadas i e l .

Por último, compararam seu resultado à Regra da Raiz Quadrada de Maister (1976). Para isto, incorporaram à Equação 8 todas as hipóteses assumidas nessa Regra, flexibilizando-a, entretanto, para permitir a centralização parcial das instalações. Através de um problema de programação matemática não-linear que maximizava o PE em função de W_{ij} , sujeito à restrição de todas as unidades centralizadas terem a mesma variância de demanda após a consolidação, Evers e Beier (1993) concluíram que fazendo todos os W_{ij} iguais a $1/m$, para quaisquer valores de n e m inseridos, onde $n > m$, $PE = 1 - 1/\sqrt{n}$, resultado diferente do proposto por Maister (1976). Argumentaram então que a Regra da Raiz Quadrada seria falha sempre que estivéssemos avaliando uma centralização de n para m localidades, com $m > 1$. A mesma subestimaria o potencial de ganhos com a consolidação nestes casos, já que, seguindo sua modelagem, o percentual de redução nos estoques de segurança seria $1 - \sqrt{m}/\sqrt{n}$.

O fato é, todavia, que Evers e Beier (1993) não provaram seu resultado para todo o conjunto de valores de m e n . Ao longo de seu artigo, nenhuma demonstração formal foi apresentada⁸. Apesar disso, vieram com uma convincente explanação discursiva para defender sua conclusão. Analisando com cuidado o PE máximo de Evers e Beier (1993), percebe-se que este depende somente do número de unidades descentralizadas (n). Do ponto-de-vista do estoque de segurança, consolidar tudo diretamente para somente uma localidade ou consolidar para $(n - 1)$ localidades, depois para $(n - 2)$ localidades e assim sucessivamente até $m=1$, tem resultado equivalente. Contudo, fazendo todos os $W_{ij}=1/m$, toda a redução possível no estoque de segurança é atingida já na primeira consolidação. Uma vez que as demandas das instalações descentralizadas iniciais são não-correlacionadas (premissa estabelecida em Maister, 1976), a partição uniforme de suas

⁸ Evers e Beier (1993) observaram também, novamente sem a devida comprovação matemática, que quando se elimina a restrição sobre a variância de demanda imposta ao problema de maximização, as possíveis soluções têm a seguinte característica em comum: $W_{1j} = W_{2j} = \dots = W_{nj}$ para todo j .

demandas criaria unidades centralizadas com demandas correlacionadas perfeita e positivamente. Sendo assim, quaisquer consolidações posteriores não trariam ganho algum.

Tyagi e Das (1998) estenderam a pesquisa referente ao *PE* derivando matematicamente a regra antes mencionada sem prova por Evers e Beier (1993).⁹ Mais que isso, não restringiram $m < n$, onde m corresponde ao número de instalações centralizadas, e comprovaram que a regra é válida mesmo nos casos em que a variância das demandas das instalações descentralizadas são diferentes. Seu resultado atesta que a alocação da demanda das instalações descentralizadas para as centralizadas deve seguir $W_{1j} = W_{2j} = \dots = W_{nj} = a_j$ para todo $0 \leq a_j \leq 1$, sujeito a $\sum_{j=1}^m a_j = 1$. Sendo assim, a economia máxima em estoque de segurança é atingida quando a fração de demanda fornecida a uma determinada instalação centralizada j é a mesma para todas as instalações descentralizadas. O *PE* obtido a partir desta regra (ressalta-se: ótimo), está demonstrado abaixo:

$$PE = 1 - \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n \sigma_i^2}}{\sum_{i=1}^n \sigma_i}, \quad (9)$$

onde:

σ_i representa o desvio-padrão da demanda na instalação descentralizada i .

Em outro artigo, Das e Tyagi (1999) estudaram a influência da correlação não-nula entre demandas de clientes na estratégia de centralização da empresa. Mais especificamente: avaliaram se o sinal e a magnitude do índice de correlação tinham algum impacto sobre o esquema ótimo de consolidação. Para isto, se valeram de testes numéricos através de um modelo que buscava minimizar a variância da demanda agregada e, por conseqüência, o estoque de segurança do sistema, com base em um argumento z_{ij} de alocação de clientes a grupos não conhecidos *a priori*. Tais grupos

⁹ Assunto tratado na nota de rodapé nº 9.

eram determinados após a aplicação do modelo, quando eram atribuídos valores ao argumento z_{ij} para cada observação de i e j . O atendimento a cada grupo seria então feito por estoques separados e dedicados. O modelo matemático é assim descrito:

$$\min_{z_{ij}} SS = k\sqrt{L} \cdot \sum_i \sqrt{\sum_j z_{ij} \sigma_j^2 + 2 \sum_j \sum_{k>j} z_{ij} z_{ik} r_{jk} \sigma_j \sigma_k}, \quad (10)$$

sujeito a:

$$\sum_{i=1}^n z_{ij} = 1 \text{ para todo } j;$$

onde:

SS = estoque de segurança em todo o sistema,

k = fator de estoque de segurança,

L = tempo de resposta das instalações para estoque,

$$\sum_i \sqrt{\sum_j z_{ij} \sigma_j^2 + 2 \sum_j \sum_{k>j} z_{ij} z_{ik} r_{jk} \sigma_j \sigma_k} = Var(D),$$

D = demanda agregada,

z_{ij} = variável binária que apresenta o valor 1 se o grupo i inclui o cliente j e 0 no caso contrário,

r_{jk} = correlação entre as demandas dos clientes j e k ,

σ_j = desvio-padrão da demanda do cliente j .

Os testes de Das e Tyagi (1999) envolveram a criação de um sistema composto por oito clientes/mercados e produziram resultados que confirmam que a centralização total nem sempre é ótima. Tal estratégia se mostrou a melhor nas seguintes circunstâncias:

- correlação igual para todos os pares de clientes, isto é: $r_{jk}=r$, $r \neq 0$,
- índices de correlação de baixa magnitude, $r_{jk}=[-0,5;0,5]$,

Em contraposição, a consolidação parcial traz mais vantagens nos casos em que as magnitudes dos índices de correlação são altas. Em particular, quando estes índices assumem valores positivos e negativos, ou seja, $r_{jk} = + - [0,5;1]$, utilizar uma estratégia de consolidação total implica severa penalidade, podendo o estoque de segurança do sistema atingir nível 110% maior do que o nível exibido na adoção do esquema parcial ótimo. O que está em jogo é que, com a consolidação parcial, efeitos de correlação positiva entre determinados mercados podem ser neutralizados segregando suas demandas por instalações que não se comunicam.

Caron e Marchet (1996) avaliaram o efeito da centralização dos estoques de segurança em sistemas de distribuição com dois elos. O modelo era integrado por um fornecedor/fábrica, um armazém central e n armazéns remotos, os quais eram responsáveis pelo atendimento dos clientes em sua região geográfica. O abastecimento dos armazéns remotos se dava somente via armazém central. O estoque de segurança, porém, poderia ser alocado de dois modos distintos no sistema.

No primeiro (concentrado), o armazém central protege o sistema inteiro contra variações na demanda durante o tempo de resposta P (tempo desde a colocação do pedido de reabastecimento até a entrega no armazém central), enquanto que os armazéns remotos mantêm estoques de segurança para proteção contra variações na demanda durante o tempo de trânsito T_i (tempo desde a colocação do pedido de reposição pelo armazém remoto i para o armazém central até o momento do recebimento). No segundo modo (pulverizado), o armazém central não carrega estoque de segurança. Suas instalações são utilizadas apenas para movimentação de produtos. A proteção contra oscilações na demanda durante os tempos P e T_i fica a cargo dos armazéns remotos. Cabe ressaltar ainda que o número de armazéns não é uma variável de decisão do modelo. É um simples dado de entrada, o qual independe e não é alterado pela decisão de consolidar.

De acordo com a dupla de autores, os fatores que influenciam a decisão entre um e outro sistema são: (a) o número de armazéns remotos, (b) a razão P/T , (c) a correlação entre as demandas locais dos armazéns remotos, (d) a autocorrelação temporal da demanda ocorrida no armazém remoto i , (e) o valor agregado ao produto entre o armazém central e os armazéns remotos, (f) os custos de transferência de produtos entre

armazéns remotos e (g) a proporção da demanda atendida diretamente pelo armazém central. Valores maiores para as variáveis dos itens (a), (b), (d) e (g) acima tenderiam a favorecer a concentração dos estoques de segurança, enquanto que valores maiores para as demais tenderiam a favorecer sua alternativa, isto é, a pulverização pelos armazéns remotos.

No modelo particular elaborado por Caron e Marchet (1996) para comparar a quantidade de estoque de segurança necessária aos dois sistemas diante de um determinado nível de serviço (medido pela probabilidade de falta de produto em cada ciclo de pedido dos armazéns remotos), as seguintes premissas foram estabelecidas:

1. existe somente um produto a ser distribuído pela rede,
2. a demanda em cada armazém remoto tem distribuição Normal,
3. os desvios-padrão σ_i são iguais,
4. o fator k de nível de serviço é igual para todos os armazéns, inclusive o central,
5. $T_i = T$,
6. os tempos T e P são determinísticos,
7. a correlação entre as demandas de cada par de armazéns ij é igual a ρ , para todo i e todo j ,
8. não existe autocorrelação temporal da demanda,
9. o valor agregado ao produto desde o armazém central até um armazém remoto é insignificante,
10. não são permitidas transferências de estoque entre armazéns remotos,
11. o armazém central não atende diretamente os clientes.

O resultado encontrado por eles é descrito pela seguinte equação:

$$R = \frac{n\sqrt{1+pt}}{n + \sqrt{n \cdot pt \cdot (1 + (n-1)\rho)}}, \quad (11)$$

onde:

R = razão entre o estoque de segurança do sistema pulverizado e do sistema concentrado

n = número de armazéns remotos no sistema,

pt = razão P/T .

Caron e Marchet (1996) concluíram, portanto, que, conforme pt aumenta, o benefício potencial da concentração do estoque de segurança se faz sentir mais intensamente. Ocorre o mesmo quando se aumenta n . Por outro lado, quando ρ aumenta, esse benefício potencial reduz.

Evers (1995) agregou à fórmula do *Portfolio Effect* o efeito da consolidação do estoque de ciclo, lançando então o que chamou de *Consolidation Effect (CE)*, o qual informava a redução percentual no estoque médio total decorrente de uma centralização. O *CE* é sumarizado pela equação abaixo:

$$CE = 1 - \frac{\sum_{j=1}^m \left(\frac{1}{2} CS_{a_j} + SS_{a_j} \right)}{\sum_{i=1}^n \left(\frac{1}{2} CS_{b_i} + SS_{b_i} \right)}, \quad (12)$$

onde:

CS_{a_j} é estoque de ciclo (quantidade de pedido) na instalação centralizada j ,

CS_{b_j} é estoque de ciclo (quantidade de pedido) na instalação descentralizada i ,

SS_{a_j} é estoque de ciclo (quantidade de pedido) na instalação centralizada j ,

SS_{b_j} é estoque de ciclo (quantidade de pedido) na instalação descentralizada i .

Tomando o estoque de ciclo como determinado pelo lote econômico, custos unitários de pedido e carregamento iguais em todas as instalações (centralizadas e descentralizadas) e demanda com distribuição de probabilidades idêntica entre os instalações descentralizadas, Evers (1995) encontrou que, para o *CE*, sob as condições assumidas por Maister (1976) para derivação da Regra da Raiz Quadrada, a alocação $W_{ij}=1/m$ para todo i e todo j se mantinha como a estratégia ótima numa eventual consolidação, assim como Evers e Beier (1993) encontraram para o *PE*. Utilizando essa regra, o *CE*, num contexto de estoque de ciclo determinado por lote econômico, se torna:

$$CE = 1 - \frac{\frac{Q_{LE}}{2} \sqrt{m} + S}{\sqrt{n} \left(\frac{Q_{LE}}{2} + S \right)}, \quad (13)$$

onde:

$$Q_{LE} = \sqrt{\frac{2AD}{C}},$$

$$S = k\sigma_D \sqrt{L},$$

sendo que:

Q_{LE} é a quantidade de pedido definida pelo lote econômico,

A é o custo unitário de pedido,

C é o custo unitário de carregamento,

D é a média da demanda em uma instalação descentralizada qualquer,

S é o estoque de segurança (com tempo de resposta constante),

k é o fator do estoque de segurança,

σ_D é o desvio-padrão da demanda em uma instalação descentralizada qualquer,

L é o tempo de resposta.

Pela Equação 13, se nenhum estoque de segurança é consolidado ($S = 0$), o CE é igual ao efeito de consolidação do estoque de ciclo, ou seja, $1 - \sqrt{m}/\sqrt{n}$, enquanto se o inverso é válido ($Q_{LE} = 0$), isto é, nenhum estoque de ciclo é consolidado, o CE é igual ao PE , permitindo redução percentual igual a $1 - 1/\sqrt{n}$. Quando os dois são consolidados, então o efeito de redução dependerá do tamanho relativo dos dois tipos de estoque.

Mantendo constante o nível do estoque médio total, Evers (1995) mostrou que quando o tamanho relativo do estoque de segurança aumenta, por consequência, CE aumenta, implicando que são obtidos maiores ganhos com a consolidação quando o estoque de

segurança predomina. Cabe reforçar que tal conclusão é válida apenas sob as condições mencionadas acima.

O CE também aumenta quando o número de armazéns centralizados m diminui, dado um número fixo de armazéns descentralizados n e razão constante entre tamanho dos estoques. Naturalmente, visto que somente a consolidação do estoque de ciclo depende de m , isso só não ocorre quando $Q_{LE} / S = 0$.

Uma terceira conclusão de Evers (1995) possibilitada pela Equação 13 é que quanto maior n , maior é o potencial de ganho com a consolidação, dado um m fixo e, novamente, razão constante entre tamanho dos estoques de ciclo e de segurança.

Por fim, Evers (1995) testou a fórmula geral do CE (Equação 12) utilizando o “princípio da reposição equivalente” para determinação do estoque de ciclo. Tomando por base esse princípio, a quantidade de pedido é definida como um múltiplo da demanda durante o tempo de resposta. Usando as premissas da Regra da Raiz Quadrada para determinação do estoque de segurança e definido a quantidade de pedido como exatamente igual à demanda no tempo de resposta, encontrou a mesma regra de alocação ótima ($W_{ij}=1/m$). Adicionalmente, pôde verificar algo anteriormente anunciado por Maister (1976): não há efeito de consolidação do estoque de ciclo nesse caso. A oportunidade de redução nos estoques em função de uma consolidação é derivada exclusivamente do estoque de segurança.

Wanke (2008) se baseou na regra de minimização dos estoques de segurança de Tyagi e Das (1998) e, aplicando $W_{ij} = W_j$ aos estoques de ciclo modelados pelo Lote Econômico, pôde então definir que, sob condições bastante gerais de demanda e tempo de resposta nas instalações descentralizadas, a regra ótima para a Equação 12 seria a consolidação total. Wanke (2008) forneceu também algumas regras que seriam válidas para escolher em que unidade a centralização deveria ocorrer, dadas diferentes características para essas unidades. Entre alguns de seus achados, percebeu que instalações com maior variação no tempo de resposta eram preteridas, assim como instalações com custo de pedido unitário maior, sendo que a variação no tempo de resposta se mostrava um fator ainda mais relevante para se rejeitar um determinado local como destino à centralização.

Ballou (2005) incorporou estoques de segurança e de ciclo de uma forma alternativa ao modelar a curva de giro de estoque (*inventory turnover curve*), a qual relaciona o nível de estoque médio de uma instalação à quantidade de produtos movimentados. A curva é expressa pela seguinte equação: $NEM = kV^\alpha$, onde:

NEM é o nível de estoque médio,

k é uma constante que representa o custo do produto particular estocado,

V é o volume movimentado (vendido) deste item no período em questão,

α é um parâmetro estimável que identifica o formato da curva de giro de estoque.

Através de simulações computacionais, foram encontradas economias de escala em estoque conforme se aumenta a demanda pelo produto, desde que utilizadas políticas baseadas no lote econômico (ex: ponto de pedido e intervalo de reposição com definição matemática de seus parâmetros). Políticas que definem seus estoques como múltiplos da demanda não se apropriam de tal benefício. De fato, a possibilidade de comparação entre políticas é um dos pontos fortes do modelo proposto no artigo. Ballou (2005) fornece inclusive valores estimados de α para *fill-rates* distintos desejados pelo gestor logístico e que são adequados para produtos com determinados coeficientes de variação da demanda e dentro de políticas de estoque específicas, em especial, as exemplificadas acima.

A praticidade que oferece para a estimação dos níveis de estoque com relativa precisão torna a curva de giro de estoque uma ferramenta de extensa aplicabilidade, tanto em escala individual quanto na agregada, com itens tomados preferencialmente em grupos de características semelhantes. Pode também ser utilizada para avaliar os efeitos da centralização/descentralização. Deve-se tomar cuidado, porém, que esta metodologia não trata em nenhum momento o coeficiente de correlação entre demandas de mercados atendidos separadamente, assumindo implicitamente valor nulo para este índice.

2.2.2. Múltiplas fontes de fornecimento

Como visto na subseção anterior, o risco que se desejava gerenciar com a centralização é o de oscilações na demanda de consumidores geográfica ou mercadologicamente separados, através do compartilhamento de uma unidade de distribuição na rede.

Infelizmente, este não é o único risco associado à gestão logística. A literatura que lida com a análise de múltiplas fontes de fornecimento (*multiple sourcing*)¹⁰ compreende tal problema e busca formas de se reduzir o impacto originado por outro tipo de risco: o de variações aleatórias no tempo de resposta. Certamente muitos outros motivos poderiam ser listados para se defender a utilização de múltiplos fornecedores. Manter competição de preços entre os mesmos e evitar uma relação de dependência seriam somente alguns exemplos, apropriados, obviamente, a contextos específicos (Monczka et al., 2001).

Entretanto, adotando a perspectiva do planejamento logístico, a racionalidade implícita que impulsionou o surgimento da pesquisa em *order splitting* está ligada ao tratamento estatístico do tempo de resposta dos fornecedores. Segundo Thomas e Tyworth (2006), tal literatura focou predominantemente cenários de elo único utilizando sistemas de revisão contínua para somente um produto. As modelagens envolveram, contudo, o teste de: (a) diversas premissas a respeito da distribuição dos tempos de resposta dos fornecedores; (b) a possibilidade de divisão não equitativa do pedido; (c) preços distintos entre fornecedores; (d) dois ou mais fornecedores.

Uma meta recorrente na literatura foi a estimação do tempo de resposta efetivo de um caso de divisão de pedidos, cujo desempenho seria melhor, *ceteris paribus*, do que aquele do caso de fornecedor único. Alguns exemplos clássicos são Sculli e Wu (1981) e Ramasesh (1991). A modelagem do tempo efetivo é a base que permite avaliar os impactos do *order splitting* no ponto de pedido e em indicadores de desempenho como falta, nível de estoque e número de pedidos/entregas.

Num ambiente de dois ou mais fornecedores, espera-se que o custo de pedir aumente, ao passo que custos de falta e excesso reduzam simultaneamente ou, mantendo-se um destes constante, que o outro reduza em maior grau do que o faria se fossem reduzidos simultaneamente. A partir daí, análises de *trade-off* e custo médio total no longo prazo tornam-se então possíveis e, de fato, Thomas e Tyworth (2006) trazem uma extensa lista de estudos neste sentido. Na opinião da dupla, entretanto, significativa parcela da teoria se desenvolveu à margem da realidade e se distanciou criando brechas e até mesmo inconsistências.

¹⁰ Este tema é também muitas vezes reconhecido na literatura por *order splitting*, o que significa divisão de pedido.

A principal crítica parece ser a ausência de um tratamento adequado para as economias de escala existentes em transportes. Os autores apontam que o custo de transporte tem sido abordado agregadamente como parte do custo de pedir, havendo poucas exceções a se salvarem desta deficiência. Tyworth e Ruiz-Torres (2000) são um exemplo destas exceções. Buscam refletir em sua modelagem o crescimento desproporcional dos custos de transporte originado pela redução continuada no tamanho do pedido. A maioria, contudo, considera tais custos como independentes da quantidade, do peso, da distância de entrega e do modal, apesar da literatura específica de transportes identificar estes fatores como bastante relevantes (Thomas e Tyworth, 2006).

Outra crítica foi contra a idéia colocada em Lau e Zhao (1993, 1994) e posteriormente apoiada por Chiang e Chiang (1996) e Chiang (2001). Nestes artigos, é defendida a teoria (surpreendente à época) de que a divisão de pedidos teria seus benefícios sentidos mais na redução do estoque de ciclo do que na redução de estoques de segurança (para um mesmo nível de serviço). O que Thomas e Tyworth (2006) vêm esclarecer é que, apesar da redução no estoque em mãos ser real, a divisão de pedidos não altera o estoque de ciclo total do sistema, pois implica num aumento de mesma magnitude no estoque em trânsito. Se o custo de oportunidade do estoque em mãos for idêntico ao do custo de oportunidade em trânsito, então o custo total do estoque seria o mesmo. A dupla fundamenta seu argumento alegando que, independentemente dos termos da venda, é o custo do sistema que deve contar, deixando implícita a conclusão de que num contrato CIF (*Cost Insurance Freight*), isto é, com entrega arcada pelo fornecedor, tais custos seriam invariavelmente repassados ao comprador.

O último ataque que fazem Thomas e Tyworth (2006) à literatura de *order splitting* está relacionado às condições normalmente atribuídas ao tempo de resposta dos fornecedores. Afirmam que algumas das distribuições de densidade utilizadas para descrevê-lo enalteciam os benefícios da estratégia em questão por apresentarem alta variação. Defendem que na prática tais circunstâncias de elevada adversidade seriam geralmente temporárias e ocorreriam somente durante intervalos de procura por condições de entrega mais vantajosas pelas empresas compradoras. Adicionalmente, confrontam a premissa de tempos de resposta de fornecedores independentes num determinado ciclo. Alimentam a idéia de que os mesmos devem provavelmente ser positivamente correlacionados, o que reduziria os ganhos da divisão de pedidos. De suporte, fornecem

dois cenários como exemplos: (a) problemas momentâneos no sistema de transporte como um todo e (b) consolidação de fretes em terminais.

Após tantas críticas, Thomas e Tyworth (2006) questionam se a proposta de valor da separação de pedidos continua válida. Como veremos mais a frente, esta política foi comparada por Evers (1999) com outras políticas operacionais e apresentou resultados positivos dependendo do ponto-de-vista. A relação custo/benefício de cada situação específica é que parece ser, portanto, determinante da decisão de trabalhar ou não com o *order splitting*.

2.2.3. Transferência de estoques entre centros de distribuição

Uma terceira vertente da pesquisa sobre *risk pooling* no planejamento logístico considera o estabelecimento de uma política de transferência de produtos entre as instalações utilizadas para estoque e é conhecida na literatura internacional como *transshipments*, *lateral transshipments* ou também *cross-filling*. Tal política pode ser distinguida de acordo com o critério de permissão adotado pela empresa para as transferências. As transferências podem ser corriqueiras, com o cliente (ou ponto de venda) sendo atendido regularmente por centros de distribuição distintos, cada qual responsável por suprir uma parcela de sua demanda. Ou, alternativamente, podem ser emergenciais, ocorrendo somente quando o centro de distribuição ao qual o cliente foi alocado não possuir estoque suficiente para satisfazer sua demanda ou quando o risco de um evento assim ocorrer for alto. Deste modo, um segundo centro de distribuição, com estoque disponível, faria a transferência de cobertura.

Autores como Lee (1987), Axsäter (1990) e Tagaras e Cohen (1992) focaram suas análises na modelagem de sistemas específicos envolvendo transferências laterais. De uma forma geral, propõem métodos para: (a) cálculo dos valores esperados de indicadores operacionais tais como número de transferências e quantidade de produtos pendentes por período e, (b) determinação de uma política ótima de estocagem nos centros de distribuição destes sistemas. Embora os dois primeiros artigos citados apresentem um sistema com peculiaridades bem distintas daquele modelado no terceiro, todos permitem constatar que a utilização de uma estratégia de transferências permite à empresa reduzir seus estoques de segurança sem que isso implique deterioração no nível

de serviço. Inversamente, no caso de a variável mantida constante ser o nível dos estoques, o que acontece é que a disponibilidade de produtos aumenta após a instauração das transferências.

Há de se ter em mente, contudo, que os prós vêm acompanhados de contras. Evers (1996), por exemplo, menciona não só o óbvio aumento nos custos totais de transporte incorridos pela empresa em decorrência da maior quantidade de movimentações, mas também o aumento nos custos de manuseio e monitoramento, fora a possibilidade mais freqüente de erros. Muitas vezes, de modo a neutralizar, dentro do ciclo de pedido do cliente, o excesso de tempo necessário ao processamento da transferência e também a maior distância de entrega até o cliente, transporte expresso tem que ser utilizado, fato que encarece ainda mais a operação.

Diante de dificuldades tão claras, uma comparação criteriosa destes custos deve ser elaborada a fim de se avaliar a efetividade da adoção da política. Decerto, somente nos casos onde os custos logísticos totais forem inferiores ela será vantajosa. Ainda assim, fatores comportamentais devem ser ponderados, pois é possível que gerentes de centros de distribuição se indisponham a atender clientes de outras áreas com a mesma qualidade que atendem a seus clientes diretos. De modo a evitar tais tipos de atitudes, potencialmente danosas à imagem da organização, Evers (1996) recomenda o desenvolvimento de um sistema de incentivo com indicadores de desempenho e recompensas alinhados à política de transferências.

2.2.4. Comparações entre as técnicas de risk pooling

A pesquisa de Evers (1996) se mostra particularmente interessante porque confronta a redução de estoques de segurança atingida pela centralização com a lograda pela adoção de transferências laterais. Conduzindo experimentos computacionais, obteve evidência robusta de que o modelo *PE* descrito pela Equação 8 pode ser aplicado com precisão também à avaliação dos impactos de uma política de transferências não-emergenciais. Para tanto, somente alguns ajustes na nomenclatura utilizada para as variáveis e para as premissas do modelo são requeridos. Conclui-se então que, diante de premissas equivalentes, os efeitos de uma estratégia ou de outra, sob o ponto de vista dos custos ligados aos estoques de segurança, são os mesmos.

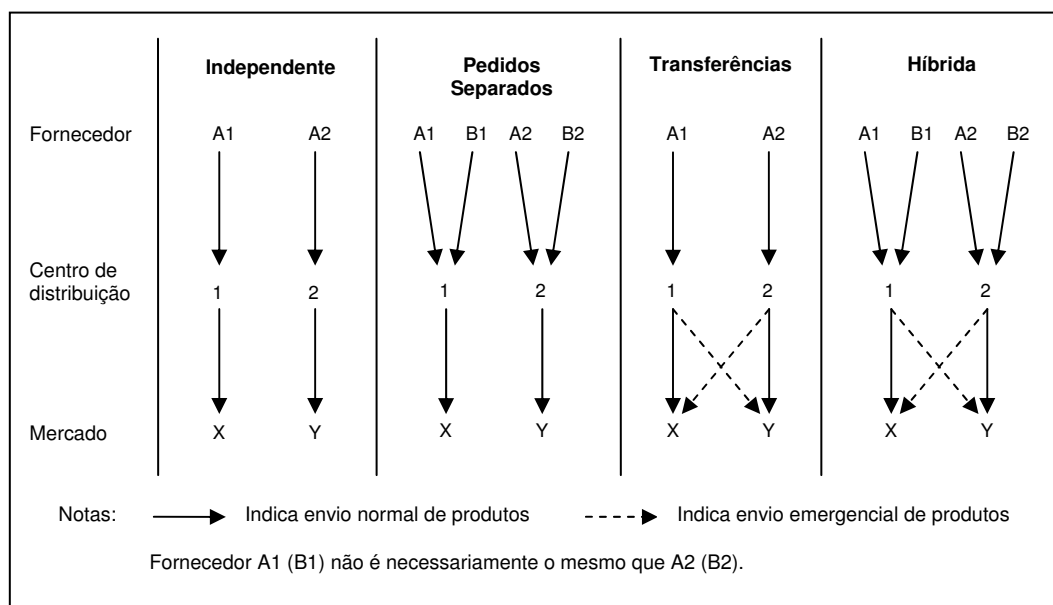
Em artigo seguinte, novamente baseado na metodologia de simulação, Evers (1997) apresentou achado ainda mais marcante. Estudando desta vez as transferências emergenciais, verificou que as mesmas servem não somente como instrumento de redução do risco de demanda (através da compensação de oscilações contrárias nas demandas de localidades distintas), conforme se pensava até a época, mas permitem também a mitigação do risco às oscilações no tempo de resposta.

Segundo ele, tal fato explica o desempenho superior – conforme observado em seus testes – da estratégia de transferências emergenciais em relação à centralização quando se trata especificamente da dicotomia nível de estoque e nível de serviço. Num sistema com tempos de transferência instantâneos, a mitigação da variabilidade do tempo de resposta ocorre porque um pedido recebido numa determinada instalação funciona em sentido prático como um pedido parcialmente recebido por todas as outras instalações no elo autorizadas a receber transferências. No fundo, caso um pedido efetuado por uma instalação atrase, este poderia ser balanceado por um pedido recebido antes do prazo em uma segunda instalação qualquer que compartilhe estoque com ela. Mesmo que os pedidos destas instalações tenham sido realizados em momentos distintos e os tempos para recebimento em cada uma sigam distribuições com parâmetros ou até mesmo naturezas diferentes, a lógica seguiria potencialmente válida.

Evers (1997) ressalta que, para se obter economias de escala, não é necessário que muitas instalações trabalhem em conjunto com transferências, posto que o ganho marginal por instalação é decrescente. Um grupo de apenas duas ou três já atinge resultados substanciais. Evidência assim aponta para a viabilidade de instauração da política localmente, isto é, somente entre instalações situadas próximas umas das outras. O benefício implícito aí seria um maior controle sobre os custos de transporte necessários às movimentações emergenciais.

Outra contribuição relevante para a literatura foi a de Evers (1999). Neste estudo, ele comparou os impactos da adoção de quatro políticas distintas num sistema com dois mercados para serem atendidos. Na primeira, denominada Independente, cada mercado é abastecido exclusivamente por um centro de distribuição. Adicionalmente, estes centros de distribuição não realizam a divisão de pedidos em suas compras. A segunda política (Pedidos Separados) se diferencia da primeira pelo fato de que os centros de

distribuição separam seus pedidos por dois fornecedores. A terceira (Transferências Emergenciais), por sua vez, se diferencia da primeira por haver transferências emergenciais entre os centros de distribuição. Já a quarta, denominada Híbrida, possui as características de divisão de pedidos e de transferências emergenciais. A Figura 1 abaixo, reproduzida a partir de Evers (1999), ilustra bem estes sistemas:



**Figura 1 – Sistemas alternativos de fornecimento e distribuição
Evers (1999)**

O autor verificou em suas simulações que, dados uma quantidade para o lote de pedido e um fator para o estoque de segurança, a política que gerou o maior *fill-rate* (razão entre a quantidade total atendida e a quantidade total demandada) foi a Híbrida. Na seqüência, vieram a Transferências Emergenciais, a Pedidos Separados e, finalmente, a Independente.

No tocante ao estoque médio em mãos, novamente a Híbrida foi a mais atrativa, apresentando o menor nível. As políticas Pedidos Separados e Transferências Emergenciais produziram valores muito próximos, o que as colocou empatadas em segundo lugar do ponto de vista prático. A Independente ocupou a última posição.

O terceiro indicador operacional medido foi o número de ciclos de pedido ocorridos dentro do intervalo simulado. Neste quesito, a política Independente se saiu melhor, ou seja, teve menor número de ciclos, sendo que as demais terminaram razoavelmente

empatadas na segunda colocação. Este resultado retrata as baixas mais freqüentes ocorridas nos estoques de sistemas utilizando políticas de compartilhamento de riscos, consequência direta da maior disponibilidade de produtos atestada pelo *fill-rate*. É importante destacar, todavia, que embora tais políticas tenham ficado empatadas, a Pedidos Separados e também a Híbrida, por suas naturezas, apresentam aproximadamente o dobro de pedidos a fornecedores quando comparadas à Transferências Emergenciais.

Também se mensurou o estoque médio em trânsito, sendo que a Independente novamente mostrou desempenho superior, fruto da menor movimentação de produtos desde os fornecedores até os centros de distribuição. Em segundo lugar, apareceu a Pedidos Separados. Em terceiro, a Transferências Emergenciais e logo após, a Híbrida.

O quinto fator de custo avaliado foi a quantidade média transferida emergencialmente por pedido. A Híbrida apresentou valor significativamente menor que a Transferências Emergenciais em função de utilizar estratégia adicional de redução de riscos. As demais obviamente não foram comparadas por não permitirem transferências.

Por fim, merece destaque entre os achados de Evers (1999) a constatação de que à medida que se aumenta a quantidade de lote de pedido ou o fator de segurança de estoque se reduz os benefícios – em termos de *fill-rate* – na adoção das estratégias de *risk pooling* simuladas. Ainda mais importante, à medida que se aumenta o coeficiente de variação (razão entre o desvio-padrão e a média) do tempo de resposta, aumentam os benefícios da política Transferências Emergenciais em relação à Pedidos Separados, indicando que a primeira é mais efetiva na mitigação do risco de falta de produto associado a tais variações.

2.3. Pesquisa operacional por simulação

Conforme ficou evidente das seções anteriores, os problemas inerentes ao planejamento de redes logísticas podem ser atacados por diversos métodos de pesquisa operacional, algumas vezes complementarmente e noutras, de forma exclusiva. Nesta parte do trabalho, descrevemos aspectos relevantes da técnica de simulação e a comparamos com as técnicas de otimização matemática.

2.3.1. Definição de simulação

A revisão bibliográfica apresentada a seguir parece deixar claro que o entendimento sobre o que consiste uma simulação, num contexto de pesquisa operacional, encontra-se bastante consolidado. As palavras utilizadas nesta conceituação variam de autor para autor, porém sem sair de um senso razoavelmente comum. É interessante notar, no entanto, que invariavelmente estas definições contêm os termos “sistema” e “modelo”. Sendo assim, houve a preocupação de explaná-los brevemente ao leitor antes de se entrar mais a fundo no conceito de simulação.

Sistema, segundo Banks e Carson II (1984) é um grupo de objetos que estão ligados em alguma interação regular. Sistemas são compostos por: (a) entidades, as quais são os objetos dentro do sistema; (b) atributos, que significam propriedades das entidades e (c) atividades. O estado de um sistema é determinado, em qualquer momento no tempo, pelo conjunto de valores das variáveis que o descrevem. Por sua vez, um evento se traduz por uma ocorrência instantânea que altera o estado em vigor do sistema.

Na opinião de Khoshnevis (1994), sistema é uma seção da realidade, na forma de componentes conectados, os quais podem desempenhar uma função que não desempenhariam individualmente. Ele argumenta que todo sistema, exceto o universo, pode ser pensado como um subsistema de outro mais abrangente. Uma vez que todos os componentes de um sistema interagem entre si, isso implica que todo sistema é influenciado por outros sistemas e que nenhum é completamente isolado de acontecimentos externos. Em última análise, a influência externa sofrida por um sistema qualquer é, na verdade, um dado de entrada para o mesmo.

De acordo com este autor, uma forma de se segmentar sistemas é através de sua relação com o tempo. Um sistema é estático se não varia com o tempo e dinâmico, caso contrário. É indispensável comentar também que sistemas dinâmicos sofrem ainda outra ramificação. Podem ser classificados como discretos, contínuos ou combinados. Num sistema discreto, a(s) variável(is) de estado sofre(m) alteração somente em pontos no tempo separados por intervalos bem definidos. Por outro lado, num sistema contínuo, as alterações podem ocorrer continuamente, ou seja, em intervalos infinitesimais. Finalmente, os sistemas combinados são misturas dos outros dois. Law e Kelton (1982)

alegam que poucos sistemas são, na prática, totalmente discretos ou contínuos. Porém, como tipicamente predomina um tipo de mudança, é comumente possível ignorar a parte menos significativa e classificar o sistema como sendo ou discreto ou contínuo.

Como dito anteriormente, o termo “modelo” também requer bom entendimento. Modelos são definidos por Khoshnevis (1994) como uma representação de um sistema formulada com o objetivo de descrevê-lo ou analisá-lo. Banks e Carson II (1984) têm pensamento equivalente. Para a dupla, modelo é uma representação simplificada de um sistema com o propósito de estudá-lo.

Segundo Fishman (1978), modelos podem ser uma representação formal da teoria, de observações empíricas ou dos dois simultaneamente. Para o autor, um modelo é benéfico porque:

- permite ao investigador organizar suas idéias e deduzir implicações lógicas sobre o sistema correspondente,
- gera um maior entendimento do sistema,
- aumenta a velocidade de análise,
- oferece uma estrutura para testar modificações no sistema,
- é mais fácil e menos custoso de ser manipulado do que o sistema.

Banks e Carson II (1984) afirmam que modelos podem ser físicos ou matemáticos. Modelos de simulação são casos particulares dos modelos matemáticos e, naturalmente, são expressos através de equações e notações. Estes mesmos autores, assim como Saliby (1989), distinguem modelos de simulação por critérios como tempo e aleatoriedade na ocorrência de eventos. Do primeiro critério, surgem as classificações estática e dinâmica e ainda, para o caso dinâmico: discreta e contínua. Do segundo, surgem as classificações determinística e probabilística.

Vistos os conceitos de sistema e modelo, torna-se viável agora examinar o que é uma simulação. Schmidt e Taylor (1970), por exemplo, vêem-na como a ação de desempenhar experimentos num modelo de um dado sistema. Khoshnevis (1994), na mesma linha, define simulação como sendo a prática de construir modelos

representativos de sistemas reais ou hipotéticos a fim de conduzir experimentos que expliquem o comportamento do sistema. Banks e Carson II (1984), por sua vez, conceituam simular como imitar a operação de um processo ou sistema real. Numa contribuição mais recente, Saliby (2000) associa simulação ao uso de modelos para o estudo de problemas reais de natureza complexa, por meio da experimentação computacional.

2.3.2. Características e finalidades da simulação

Bowersox e Closs (1989) afirmam que uma característica marcante da simulação é sua capacidade de incorporar comportamentos estocásticos. Por este motivo, a técnica permite trazer para o modelo representações bastante fiéis à realidade.

Outra característica que exige menção, embora não exclusiva da simulação, é que a mesma utiliza métodos numéricos para estudar um determinado sistema (Banks e Carson II, 1984). Isto significa que o modelo de simulação deve ser alimentado por uma série de números de modo a ser executado. É somente a partir destes dados que se consegue proceder às denominadas rodadas de simulação e então ser capaz de inferir sobre as características reais do sistema. Devido à grande complexidade presente no mundo real, requer-se, em geral, manipulação de uma grande quantidade de dados para que possamos entendê-lo. Por isto, Banks e Carson II (1984) crêem que o auxílio de computadores é quase inevitável quando tratamos de simulação em pesquisa operacional.

Para eles, a disponibilidade de linguagens de programação computacional específicas para simulação, a crescente capacidade de processamento de computadores a um custo decrescente de operacionalização e também avanços na metodologia de simulação fizeram da técnica uma das mais usadas em pesquisa operacional e análise de sistemas. Na mesma linha, Pidd (1989) e Saliby (1989) também citam a evolução computacional como fator contribuinte para o aumento na sua utilização. Este último autor, porém, chama atenção ainda para a crescente complexidade dos problemas enfrentados pela humanidade, os quais não conseguem ser tratados adequadamente por outras técnicas, como sendo um segundo ponto estimulante deste acontecimento.

Dentre os diversos propósitos da simulação, destacam-se os seguintes:

- Estudo das interações dentro de um sistema existente sem interferência em sua operação (Wagner, 1969; Banks e Carson II, 1984; Khoshnevis, 1994; Saliby, 2000),
- Análises de sensibilidade de variáveis de interesse do sistema (Fishman, 1978; Saliby, 1989),
- Exploração de cenários hipotéticos completamente novos ou modificados somente em alguns parâmetros (Wagner, 1969; Banks e Carson II, 1984; Khoshnevis, 1994; Saliby, 2000),
- Redução de risco através da verificação experimental dos possíveis impactos de decisões gerenciais antes que as mesmas sejam tomadas (Banks e Carson II, 1984),
- Monitoramento perfeito, exceto por aproximações decimais, das variáveis de interesse, em contraposição aos erros de medida geralmente presenciados no mundo real (Fishman, 1978),
- Possibilidade de se eliminar, no experimento, fontes de variação observadas no sistema real, de modo a isolar uma variável, cuja oscilação desperte maior interesse de estudo (Fishman, 1978),
- Validação para soluções derivadas de forma analítica (Fishman, 1978; Banks e Carson II, 1984),
- Auxílio na derivação de fórmulas analíticas (Banks e Carson II, 1984),
- Possibilidade de se comprimir experimentalmente o tempo (Fishman, 1978).

2.3.3. Simulação de eventos discretos

A simulação de eventos discretos é aplicada a sistemas discretos. De acordo com Ingalls (2002), uma simulação deste tipo é geralmente integrada por entidades, atividades, eventos, recursos, variáveis globais, geração de números aleatórios, calendário, variáveis de estado do sistema e coletor de estatísticas. Entidades são objetos que causam mudanças no estado da simulação. Podem representar coisas concretas ou abstratas, tal como peças numa fábrica ou fluxos de informação. Entidades possuem atributos, os quais são críticos para a função da entidade dentro da simulação.

Atividades são processos da simulação. Entidades interagem com atividades. Tal interação gera eventos, os quais são ocorrências que modificam o estado do sistema. Existem três grandes tipos de atividades numa simulação discreta: atrasos, filas e lógica. Atrasos representam o consumo de tempo necessário à conclusão de uma ação. Filas são pontos na simulação onde a entidade tem que aguardar por períodos de tempo não especificados. Lógica refere-se a decisões que afetam o estado do sistema e que se baseiam em critérios pré-definidos.

O quarto componente de uma simulação discreta consiste nos recursos, os quais podem ser definidos como algo que possua restrição de consumo ou capacidade. Variáveis globais, por sua vez, formam o quinto componente e são usadas para rastrear qualquer coisa que seja de interesse na simulação. A geração de números aleatórios é o sexto componente e serve para a obtenção de amostras de dados. Tais dados seguem distribuições probabilísticas determinadas pelo criador do modelo, em conformidade com sua observação do sistema real, e têm a função de alimentar a simulação.

O calendário, antepenúltimo componente de uma simulação, é uma lista de eventos programados para ocorrer no futuro. O penúltimo é representado pelas variáveis de estado do sistema. Podem existir várias delas, porém uma é indispensável: o cronômetro da simulação. Por fim, há o coletor de estatísticas. Nele, se registram todas as informações sobre certos estados como, por exemplo, a condição de um determinado recurso, ou também o valor de variáveis globais em pontos específicos no tempo. De posse destas estatísticas, é possível realizar análises de desempenho do sistema simulado.

2.3.4. Etapas de um projeto de simulação

Na presente seção, são apresentadas metodologias propostas por autores variados sobre como executar um projeto de simulação. O leitor, caso consulte os textos originais, talvez concordará que as variações entre elas parecem ser mais função da habilidade de escrever de seu respectivo autor e/ou do esforço e detalhamento despendido na descrição do que de discrepâncias significativas na forma de pensar. Todas parecem seguir uma linha de raciocínio bastante homogênea e isto não é exclusivo dos autores aqui mencionados. Não se pretende fazer afirmações universais, porém o exame da

literatura novamente mostra que opiniões particulares estão, em geral, oscilando em torno de fundamentos bastante sólidos.

Segundo Pidd (1989), um projeto de simulação segue três etapas: modelagem, programação e experimentação. O autor ressalva, no entanto, que esta é simplesmente uma forma de organizar o pensamento, pois, na verdade há interseções entre as mesmas. Quando trata de eventos discretos, a modelagem é baseada em três principais componentes. O primeiro se refere à parte lógica, onde são definidas as regras que regem o sistema a ser simulado. Tais regras devem identificar as ações a serem desempenhadas no modelo caso determinadas condições sejam satisfeitas e aquelas que serão tomadas caso se viole as mesmas. Posto que a essência do sistema real deve estar capturada na seqüência lógica do modelo, é de extrema importância que haja checagem e validação de suas especificações. Representações gráficas da lógica do sistema são, sob a ótica do autor, ferramentas eficientes para se conduzir tal tarefa.

O segundo componente da modelagem é a expressão do comportamento estocástico do sistema¹¹. Pidd (1989) argumenta que, freqüentemente, isto é feito através de procedimentos de amostragem a partir de distribuições de probabilidade que respeitam as características dos eventos não-determinísticos envolvidos. Deve-se ressaltar aqui que, adotando tal metodologia, o estabelecimento de critérios adequados de seleção e validação da distribuição é crucial. Negligências neste sentido tendem a potencializar resultados enganosos. Como alternativa à amostragem aleatória para a geração de dados para a variável de entrada do modelo, é possível aproveitar sua série histórica quando disponível. O autor ressalva, no entanto, que a mesma seqüência da série não deve ser utilizada repetidas vezes, pois assim se estaria assumindo implicitamente a premissa de que a mesma corresponde à população. Realizações passadas da variável, na opinião de Pidd (1989), são mais apropriadas para validar o modelo do que para serem efetivamente aplicadas durante a simulação.

¹¹ Percebe-se aqui que Pidd (1989) está se referindo somente a modelos probabilísticos de simulação. Uma vez que não foi feita nenhuma menção especial que limitasse seu discurso a este tipo de modelo, conclui-se que o autor está implicitamente deixando de considerar a existência de modelos determinísticos de eventos discretos. Este fato provavelmente se explica pela seguinte afirmação de Carson II (2004): “Quase todos os modelos de eventos discretos são estocásticos”.

As políticas a serem comparadas nos experimentos formam o terceiro componente da modelagem. Elas se referem às ações alternativas que estão disponíveis àqueles que controlam o sistema. Em determinadas situações, todas as possíveis alternativas são conhecidas antes mesmo de se proceder aos experimentos. Não obstante, noutras vezes, Pidd (1989) cita que alguns possíveis caminhos são descobertos somente durante esta fase.

A segunda etapa de um projeto de simulação é a programação computacional. A organização das regras lógicas definidas na primeira etapa se dá, normalmente, em blocos de código no programa de simulação correspondentes às atividades, eventos ou processos do sistema. Uma vez que a checagem final do modelo pode apontar a necessidade de modificações ou adições às regras lógicas inicialmente escritas, é absolutamente recomendável que o programa seja desenhado numa estrutura modular, de modo a reduzir o tempo despendido em eventuais alterações. Adicionalmente, deve ser objetivada a facilidade de aplicação pelo usuário durante a elaboração do programa.

A última etapa consiste na experimentação em si. Dependendo do programa de simulação elaborado na fase anterior, duas abordagens podem ser levadas a cabo aqui, de acordo com Pidd (1989): a de jogo e a que ele denomina clássica. A diferença entre elas é que, na primeira, o usuário tem a possibilidade de interagir com o modelo no decorrer da simulação reespecificando parâmetros. Isto freqüentemente requer mais memória e velocidade de processamento, além de exigir do usuário maior conhecimento das opções disponíveis e das conseqüências de suas escolhas.

Formatação bastante semelhante para um projeto de simulação é proposta por Saliby (2000). Em sua concepção, ele é formado pelas etapas de: (a) construção do modelo, (b) tradução para a linguagem computacional e (c) experimentação.

Na primeira etapa, afirma, precisam estar explícitos os objetivos e escopo da simulação, assim como a resposta que é esperada do estudo, em termos de dados de saída. A construção propriamente dita passa antes de tudo por um bom entendimento do problema sob análise. O modo de funcionamento do sistema real deve ser compreendido a fim de se construir um modelo que o represente fidedignamente. Tal qual Pidd (1989), Saliby (2000) também cita a reprodução gráfica como uma boa dica para captar e

escrever a lógica do sistema, muito embora argumente que mesmo existindo algumas instruções que orientem a modelagem, no fim das contas, ela é uma mistura de arte e ciência.

Focando na parte científica da modelagem, é importante informar o posto por Fishman (1978). De acordo com ele, duas abordagens técnicas são comumente empregadas na preparação de modelos discretos. A primeira é a denominada programação/agendamento de eventos. Nela, se concentra nos momentos do tempo em que ocorrem mudanças de estado. Isto significa, segundo Carson II (2004), que o modelador deve definir, para cada possível evento, sua lógica e implicações ao sistema. A segunda é a interação processual, na qual se descreve o fluxo de uma entidade ao longo de todo o sistema. Carson II (2004) acrescenta ainda uma terceira alternativa às duas abordagens mencionadas acima: a técnica de monitoramento de atividades, cuja perspectiva de confecção do modelo foca em atividades e recursos, sujeitando mudanças de estado dos recursos à ocorrência de eventos específicos.

A segunda etapa da metodologia proposta por Saliby (2000) trata-se em transformar o modelo conceitual concebido na fase inicial em um modelo operacional de computador composto por regras, ações e tempos de processo. Esta etapa pode ser dividida em três partes distintas:

- coleta de dados e tratamento estatístico,
- programação computacional,
- verificação e validação.

Por último, chega-se à etapa de experimentação, onde todas as diferentes alternativas em consideração podem ser estudadas e testadas, permitindo inclusive análises de sensibilidade através da modificação marginal de parâmetros de entrada do modelo.

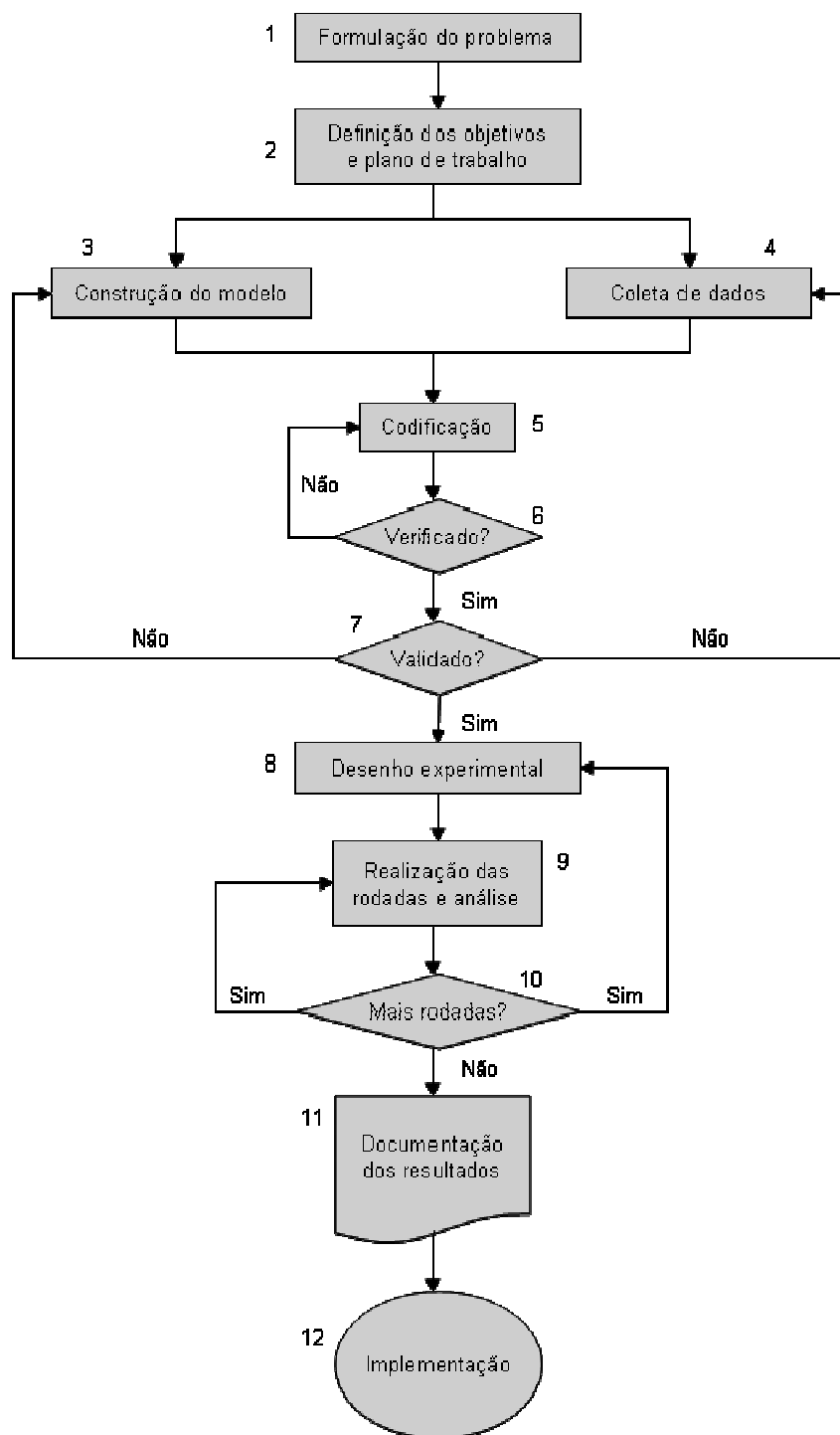
Banks e Carson II (1984), por sua vez, são mais detalhistas e informativos na descrição dos passos presentes num estudo de simulação. Adicionalmente, estendem a estrutura do projeto até a sua implementação. O fluxograma a seguir (Figura 2) exhibe o resumo do esquema sugerido pela dupla.

De acordo com os autores, após concluída a declaração do problema, se avança para a definição dos objetivos. Neste ponto, deve-se inquirir se a simulação é realmente a ferramenta que se encaixa melhor para trazer os esclarecimentos desejados. Caso positivo, é também no passo 2 onde se define o plano de ação a ser tomado, cujas características incluem: o custo do estudo, o tempo estimado até seu término e o pessoal a ser envolvido.

O terceiro passo consiste na construção do modelo. Aqui, a tarefa é identificar a essência do sistema real a fim de caracterizá-lo com razoável precisão num modelo sintetizado que atenda aos objetivos do projeto. Tal modelo recebe a forma de uma série de premissas que expressam matematicamente e logicamente o funcionamento e a interrelação entre as entidades ou objetos de interesse do sistema. Independente da complexidade exigida pelo sistema para o modelo, é melhor, segundo os autores, partir de algo simples para então ir agregando novos atributos¹². É desejável também que sejam incluídos, no processo de confecção, os usuários finais, porque assim o modelo tenderia a sair mais amigável em termos de entendimento e aplicação.

Como pode ser observado na Figura 2, os passos 3 e 4 podem e devem ser executados concomitantemente. Para Banks e Carson II (1984), há uma constante interação entre as mesmas. Adicionalmente, explicam, a reunião dos dados que servem de entrada para a simulação toma grande parcela do tempo despendido no projeto e, conseqüentemente, deve ser iniciada o quanto antes. Há ainda de se atentar, nesta etapa, para o que comenta Carson II (2004). De acordo com o autor, a coleta dos dados não é uma mera tarefa de obtenção dos mesmos. É imprescindível que haja um trabalho de validação e limpeza que garanta informação confiável e de qualidade para rodar a simulação.

¹² Fishman (1978) adota a mesma tática. Em sua opinião, é prudente começar com um modelo bruto. Se as respostas obtidas forem inadequadas, então detalhes podem ser introduzidos. Segundo este autor, a inserção de detalhes desnecessários gera custos por exigir maior tempo e esforço na observação do sistema, na programação computacional e também no processamento das simulações.



**Figura 2 – Fluxograma de um projeto de simulação
Banks e Carson II (1984)**

O próximo passo (número 5) refere-se à codificação computacional. A condução deste trabalho é, até certo ponto, flexível. A decisão fica a cargo do modelador, sendo obviamente influenciada pela natureza do problema em questão. As opções disponíveis,

segundo Banks e Carson II (1984)¹³, são: programação em linguagem de propósito geral (ex: FORTRAN, ALGOL, BASIC e Pascal) e programação em linguagem específica para simulação (exs: GASP, GPSS, SIMSCRIPT e SLAM).

Como em todo trabalho de programação, exige-se a verificação sistemática e freqüente do código para garantir sua correta operação. Isto, no entanto, não está limitado à usual auditoria de código e pode incluir outras técnicas, tal qual a utilização de traços seletivos, conforme sugere Carson II (2004), principalmente para pontos de elevada complexidade do programa. O processo de verificação está representado no sexto passo do fluxograma.

A validação (passo 7) vem em seguida. Nela, deve-se examinar a acurácia do modelo e sua aproximação com a realidade. Isto é geralmente efetivado através de um processo iterativo, no qual se analisa as diferenças entre o comportamento real do sistema e os resultados gerados pela simulação para posteriormente modificar o modelo e reduzi-las até um ponto onde sejam julgadas aceitáveis.

O passo 8 é representado pelo desenho experimental e se caracteriza pela determinação das alternativas a serem testadas e estudadas através do modelo. Uma vez definidas, passa-se ao número 9, onde são efetuadas as rodadas de simulação. A cada rodada, são coletadas medidas sobre as variáveis de interesse. Tais medidas alimentam análises que procuram estimar o desempenho de cada um dos desenhos experimentais sendo simulados. O passo 10 trata-se simplesmente de uma reflexão sobre as análises produzidas. Se as mesmas não forem suficientes para subsidiar conclusões seguras, pode-se simplesmente rodar o mesmo experimento mais vezes ou então partir para o teste de novos desenhos.

No penúltimo passo, devem ser documentados o programa e os resultados encontrados. Banks e Carson II (1984) argumentam que a documentação é importante para permitir utilização ou modificação posterior do modelo por outros não envolvidos no projeto

¹³ Os exemplos fornecidos aqui se referem a linguagens antigas. Algumas possivelmente estão ultrapassadas do ponto de vista tecnológico e prático nos dias atuais. Adiante neste documento serão informados outros exemplos mais modernos. Cabe também acrescentar que os autores não mencionam, por não existir à época, os pacotes comerciais especializados em simulação nos quais não se requer programação. Carson II (2004), por sua vez, já faz referência aos mesmos. Ressalva, contudo, dizendo que são apropriados somente para simulação de modelos com baixa complexidade.

inicial e até mesmo para garantir que os próprios envolvidos não esqueçam como foi feito o programa, quais as alternativas que foram simuladas e quais os resultados que foram obtidos a partir das análises. Por fim, no décimo segundo passo, executam-se as sugestões elaboradas e documentadas no passo anterior. Deve-se, todavia, atentar para o fato de que o sucesso da implementação está condicionado não somente ao bom gerenciamento deste processo, mas também ao bom desempenho em todas as outras fases do projeto.

2.3.5. Meios disponíveis para execução de uma simulação

Caso a simulação seja preferida como técnica de análise de um dado problema de pesquisa operacional, é imprescindível conhecer os meios acessíveis à sua aplicação. Conforme já apresentado na subseção imediatamente anterior, Banks e Carson II (1984) informam sobre a possibilidade de se optar por linguagens de programação específicas para simulação ou por linguagens de propósito geral. Uma terceira alternativa, como mencionam Khoshnevis (1994) e Carson II (2004), é utilizar os *softwares* de simulação de propósito específico. Como exemplo destes, Khoshnevis (1994) cita SIMFACTORY e WITNESS, ambos para modelagem de linhas de produção. Adiciona que, nestes pacotes, ferramentas gráficas e *menus* de seleção são oferecidos, sendo geralmente desnecessário conhecimento prévio em programação para a modelagem. Law (2003) é outro autor que cita alguns *softwares* de estilo similar. São eles: AutoMod, Flexsim, ProModel e SIMPROCESS. Algumas vantagens em se utilizar tais pacotes são:

- redução no tempo de modelagem (Khoshnevis, 1994; Law, 2003 e Carson II, 2004),
- maior facilidade de uso (Khoshnevis, 1994 e Carson II, 2004),

Em compensação, a utilização de linguagens de propósito geral se sobressai por:

- permitir máxima flexibilidade de modelagem (Khoshnevis, 1994 e Carson II, 2004);
- permitir maior controle da programação (Khoshnevis, 1994 e Law, 2003),

- gerar economia de espaço e tempo para execução das rodadas de simulação (Khoshnevis, 1994);
- exigirem menor investimento para aquisição (Law, 2003 e Carson II, 2004).

Alguns exemplos modernos deste tipo de linguagem são: C (Khoshnevis, 1994; Law, 2003 e Carson II, 2004), C++ (Law, 2003 e Carson II 2004) e Visual Basic (Carson II, 2004).

Por sua vez, as linguagens de programação específicas à simulação, assim como os *softwares* comerciais nelas fundamentados, possuem características num ponto intermediário entre as linguagens de propósito geral e os *softwares* de simulação de propósito específico. Suas vantagens são, portanto, um misto das apresentadas acima.

Finalmente, uma lista bastante extensa, porém não exaustiva, de diversos *softwares* para simulação foi incluída no Anexo I simplesmente para oferecer comodidade de consulta a um leitor eventualmente mais interessado.

2.3.6. Simulação vs. otimização matemática

É bastante vasta a literatura sobre que métodos de pesquisa operacional são mais apropriados ao entendimento de cada tipo de problema encontrado no mundo empresarial. O objetivo aqui é apresentar a discussão existente sobre o assunto e a posição de diversos autores a respeito das propriedades de técnicas como a simulação e as de otimização matemática. Conhecendo-se as virtudes e defeitos de cada uma, será possível então selecionar aquela que demonstre melhor encaixe ao estudo aqui proposto.

Segundo Banks e Carson II (1984), antes de selecionar a simulação como ferramenta de análise para um determinado problema, é importante conhecer seus prós e contras. De fato, percebe-se na revisão bibliográfica que, apesar de celebrada em alguns atributos, a simulação também sofre críticas. Do lado das deficiências da simulação, Schmidt e Taylor (1970) argumentam que, dependendo da situação, muitas rodadas computacionais são necessárias de modo a se ter uma compreensão abrangente do sistema em análise.

Powers (1989) apóia esta idéia e vai além, criticando a capacidade do executor em descobrir e testar todas as alternativas viáveis à solução de um problema pela simulação. Em questões de elevada complexidade, a quantidade de combinações existentes impediria qualquer tentativa humana de esgotá-las experimentalmente. O meio de se lidar com isso é selecionar somente aquelas que parecem ser mais atrativas e avaliá-las uma a uma. Entretanto, adotando tal metodologia, sujeitamo-nos muitas vezes ao conhecimento pré-estabelecido e à sabedoria convencional. Desenhos de estruturas porventura não imaginados, eventualmente melhores, são ignorados. O viés de escolha é inerente ao processo de teste e geralmente afeta a solução, não havendo qualquer garantia de que se alcançará um resultado ótimo ou perto dele. Na opinião de Powers (1989), esta é a desvantagem mais óbvia que a simulação possui quando comparada à otimização matemática, pois através desta técnica, ressalta, existe a certeza de que todas as alternativas são consideradas para se chegar à solução. Soluções nunca antes pensadas podem então ser descobertas, gerando valioso aprendizado.

Moskowitz e Wright (1979) reforçam que a técnica de simulação não oferece soluções gerais, enquanto que modelos representados matematicamente têm este poder e que por isto devem ser utilizados sempre que possível. Adicionalmente, criticam a natureza inferencial dos resultados, a qual, por definição, é imprecisa. Saliby (1989), por sua vez, aponta a mesma deficiência, alegando que um dos principais problemas da simulação a partir de amostragem aleatória é justamente sua baixa precisão. Alega, contudo, que em amostras grandes este problema é reduzido. Wagner (1969) é um terceiro autor que segue a mesma linha de raciocínio ao afirmar que quando lidamos com eventos incertos, uma desvantagem da simulação seria a de fornecer resultados que devem ser considerados somente como estimativas, visto que erros estatísticos poderiam estar presentes.

Argumentos em favor da simulação constam também na opinião de inúmeros autores. Moskowitz e Wright (1979), por exemplo, concordam que a modelagem por simulação é mais flexível que a modelagem matemática e por isso é utilizada para a representação de sistemas complexos em operações que de outra forma não poderiam ser formulados. Da mesma forma, Saliby (1989) e Pidd (1989) comentam que a grande flexibilidade e aplicabilidade da simulação constituem-se em seus benefícios primordiais.

Banks e Carson II (1984) apóiam estas posições. A flexibilidade no tratamento de premissas permitida pela simulação representaria, para a dupla, uma de suas principais vantagens em relação a métodos analíticos. Enquanto modelos matemáticos requerem uma série de simplificações de modo a se tornarem manipuláveis, a simulação oferece maior aderência à realidade. Daí decorre uma segunda vantagem, acrescentam: facilidade de uso quando comparada às técnicas analíticas, o que inclusive permitiria sua aplicação por um número maior de indivíduos. Um terceiro ponto listado pelos autores é que os dados gerados nas rodadas de simulação podem servir de base para formular diversas medidas de desempenho do sistema, ao passo que modelos de otimização são freqüentemente limitados no número de medidas deste tipo que podem ser geradas.

A utilização de simplificações exageradas como meio de viabilizar modelos analíticos ou a programação matemática também foi criticada por Wagner (1969). Em sua opinião, as dificuldades que rodeiam a construção de modelos analíticos fiéis são: a existência de incerteza, a necessidade de se dividir o tempo em intervalos precisos, as complexas interdependências entre as variáveis do sistema e, por último, as interações dinâmicas entre decisões e eventos subseqüentes. Em casos envolvendo tais tipos de dificuldades, o autor sugere a simulação como a melhor abordagem de pesquisa operacional disponível.

Bowersox e Closs (1989) adotam postura equivalente. Veem na capacidade da simulação de incorporar variabilidade no planejamento estático ou dinâmico como uma característica que a distingue positivamente de outros métodos de análise em operações. Em questões relacionadas ao planejamento de estoques e redes, justamente o tema do presente documento, Bowersox e Closs (1989) afirmam que a simulação é extensamente utilizada, dada sua capacidade de integrar estocasticamente tempo e espaço. Wanke (2003a) segue linha de raciocínio idêntica e menciona que uma característica importante da simulação é sua capacidade de relacionar aspectos temporais de política de estoques com aspectos geográficos de localização.

Para Banks e Carson II (1984), a simulação se provou ser um eficiente método, muitas vezes o único, no tratamento de estoques. Powers (1989), por sua vez, sugere que na análise de planejamento de estoques de produtos individuais, onde muitos detalhes são

comumente requeridos e o comportamento aleatório das variáveis é predominante, a otimização não se encaixa adequadamente e a simulação pode ser a única alternativa viável.

2.3.7. Otimizando a simulação

A esta altura, podemos perceber que a simulação pode ser usada para a realização de diversos experimentos através da modificação estrutural do modelo ou pela simples alteração de dados de entrada. April et al. (2003) explicam que se os dados de entrada e de resposta (saída) forem modelados para formar uma função objetivo e restrições, podemos então trabalhar para otimizar esta função. Sendo assim, estaríamos aptos a estimar que níveis das variáveis de entrada surtem o melhor efeito possível nas variáveis de resposta. Este procedimento é conhecido pelo nome de otimização da simulação.

Para construir a função representativa do modelo de simulação, várias técnicas estão disponíveis segundo os autores. Alguns exemplos mais comuns são a regressão linear e a metodologia de redes neurais. Concluído este passo, podem então ser aplicadas técnicas de otimização, dentre as quais, citam: aproximação estocástica, resposta de superfície seqüencial, procura randômica e otimização de caminho amostral.

3. OBJETIVOS E METODOLOGIA DE PESQUISA

3.1. Objetivos do estudo

Como é possível perceber pelo capítulo anterior, a literatura sobre planejamento de redes logísticas tem extensa envergadura. Durante décadas, o assunto foi esmiuçado por inúmeros estudiosos à procura de fórmulas ou ao menos diretrizes que levassem a uma maior eficiência tanto sob uma perspectiva ampla da cadeia de suprimentos, quanto de uma ótica focada em uma determinada empresa integrante da cadeia.

No entanto, por mais explorado que seja o tema, em suas diversas dimensões, sempre há brechas para contribuições. A dissertação corrente, visando dar continuidade à evolução da pesquisa sobre planejamento de redes, se propõe a desenvolver o conhecimento à respeito dos impactos dos seguintes fatores em decisões de responsabilidade do gestor logístico. São eles: a correlação e magnitude (conforme conceito criado por Zinn, Levy e Bowersox, 1989) entre demandas de mercados geograficamente separados e a amplitude de oscilação do tempo de reabastecimento do centro de distribuição. Tais fatores, aqui denominados de fatores ambientais, foram escolhidos, pois, conforme se observou a partir da bibliografia, despertaram bastante interesse de pesquisa ao longo dos anos. Sendo assim, sua interação é potencialmente relevante.

No nosso modelo, as alternativas do gestor logístico para definição da rede estão limitadas à estrutura de distribuição de produtos (se centralizada ou descentralizada) e à localização do armazém (se próxima ou afastada do varejo) em um sistema de três elos, composto por fábrica, armazém(ns) e varejos. O estudo busca, portanto, responder perguntas que o próprio gestor faria a fim de tomar tais decisões, além de visar relacionar os resultados encontrados com a literatura existente. Sendo assim, colocamos as seguintes perguntas norteadoras da pesquisa:

- 1) É importante levar em consideração, no momento de se planejar a rede logística, os fatores ambientais citados? Isto é, há interação relevante entre esses fatores e as decisões de centralização e localização da distribuição?
- 2) Caso positivo, quais são os efeitos relevantes? Por que são relevantes?

- 3) Que implicações gerenciais podem ser levantadas e como os efeitos dessas interações se relacionam com resultados documentados por outros autores?

A originalidade da proposta está em investigar simultaneamente os três fatores ambientais citados com aqueles correspondentes à decisão gerencial. Outro ponto interessante de se ressaltar é que os três fatores ambientais estão intimamente ligados a questões logísticas referentes a estoques. Relembrando, segundo Jayaraman (1998) e Croxton e Zinn (2005), os estoques são freqüentemente negligenciados na literatura de planejamento de redes logísticas, o que é uma falha, dado que podem representar parcela significativa do custo logístico total. Logo, a pesquisa se insere num contexto ainda pouco explorado, porém com elevado potencial de desenvolvimento.

A fim de responder as perguntas norteadoras da pesquisa, imaginou-se que um bom critério de comparação entre os diversos cenários seria a existência de diferenças em seus indicadores de desempenho. Utilizando indicadores de desempenho, se torna a pesquisa mais genérica do que seria caso fossem definidos valores de custos unitários para as diversas dimensões presentes nos problemas logísticos.

Os indicadores, entretanto, devem refletir apropriadamente esses custos a fim de permitir comparações efetivas entre os cenários. Sendo assim, devem contemplar informações sobre: o carregamento de estoques, a disponibilidade de produtos para atendimento à demanda, o transporte de produtos da fábrica até o centro de distribuição, o transporte de produtos do centro de distribuição até o varejo,¹⁴ o número de pedidos entre centro(s) de distribuição e fábrica e o número de pedidos entre varejos e centro(s) de distribuição. Os indicadores escolhidos, assim como a justificativa para sua escolha, serão precisamente detalhados mais adiante.

¹⁴ A primeira perna da cadeia logística (fábrica até o centro de distribuição) é identificada ao longo deste documento como sendo a perna de suprimentos, ao passo que a segunda perna (centro de distribuição até o varejo) é identificada como sendo a perna de distribuição.

3.2. Seleção da técnica de pesquisa

A simulação computacional foi escolhida como metodologia de estudo por diversos motivos. Muitos deles, inclusive, a tornam a única factível de ser empregada para o alcance dos objetivos expostos.

Para começar, o ambiente de controle requerido na pesquisa é tal que inviabiliza qualquer tentativa de desempenhá-lo numa cadeia logística real. Conforme vimos, Fishman (1978) coloca que a simulação traz soluções para este problema. São eles: (a) maior monitoramento na mensuração, em contraposição aos erros geralmente presenciados no mundo real; (b) possibilidade de isolarmos a oscilação de uma variável, apurando, logo, a precisão das análises; (c) compressão experimental do tempo, o que reduz os recursos investidos na pesquisa.

Cientes dessa dificuldade, somos obrigados a nos valer de técnicas de pesquisa operacional. Quando comparamos a simulação à programação linear, por exemplo, a simulação sai vencedora por não estar limitada à análise de fenômenos lineares, o que, conforme visto na revisão de literatura sobre centralização, não se encaixa para os efeitos dos estoques sobre o nível de serviço, justamente um dos focos do presente estudo.

A programação dinâmica tampouco se justifica porque não estão sendo tratadas decisões sequenciais (Moskowitz e Wright, 1979; Hillier e Lieberman, 1988). A análise levada a cabo aqui é de cunho estratégico para a organização. O estabelecimento de uma malha logística completamente nova ou a alteração de uma malha existente geralmente requer investimentos vultosos e o comprometimento de muitos recursos. Isto implica num horizonte de planejamento de longo prazo, no qual as respectivas decisões são implementadas em um determinado momento no tempo e têm caráter até certo ponto permanente. Decerto que decisões assim impactam inúmeras outras decisões posteriores. Todavia, estas são relacionadas a eventos de natureza tática e operacional, os quais não fazem parte do cerne da pesquisa.

Com relação à utilização de modelos analíticos, tem-se que, dependendo da situação, simplificações excessivas se tornam necessárias a fim de descrever matematicamente o

fenômeno sob estudo, o que termina por descaracterizá-lo. Repetindo Wagner (1969), os empecilhos à confecção de modelos analíticos representativos são: a existência de incerteza, a necessidade de se dividir o tempo em intervalos precisos, as complexas interdependências entre as variáveis do sistema e, por último, as interações dinâmicas entre decisões e eventos subseqüentes.

Absolutamente todos esses pontos, exceto o terceiro, cuja adjetivação é subjetiva, estão presentes em sistemas de estoques. Uma vez que os estoques estão sendo considerados de forma explícita no presente estudo, um esforço tremendo de modelagem de seus movimentos aleatórios diários seria exigido na tentativa de evitar ferir a realidade e eventualmente viabilizar a aplicação de cálculo diferencial ou a conjunção de programação inteira com programação não-linear para a obtenção de soluções confiáveis¹⁵. Não sendo isso suficiente, mesmo que fosse concluído tal modelo, resolvê-lo seria demasiadamente complexo e custoso.

Diante das dificuldades citadas, Wagner (1969) sugere a simulação como a melhor abordagem. Sua extrema flexibilidade e relativa facilidade de uso, qualidades apontadas por diversos autores na subseção 2.3.6, despontaram como aspectos críticos para a sua escolha. A decisão a favor da simulação está, inclusive, de acordo com a postura de Banks e Carson II (1984) e Powers (1989). Relembrando, os primeiros consideram a simulação um eficiente método, muitas vezes o único, no tratamento de estoques. Já o último sugere que, na análise de planejamento de estoques de produtos individuais, onde muitos detalhes são comumente requeridos e o comportamento aleatório das variáveis é predominante, a otimização não se encaixa adequadamente e a simulação pode ser a única alternativa viável.

Por fim, resta dizer que a própria revisão bibliográfica apresentada no capítulo anterior traz evidência inequívoca da vasta utilidade e aceitação da metodologia. Como se pôde verificar, diversos artigos a tomaram como base para suas investigações.

¹⁵ A programação inteira se mostra necessária de ser empregada em conjunto com a programação não-linear por haver no problema variáveis de interesse inteiras, como é o caso do número de centros de distribuição mais eficiente por elo, e também por haver efeitos não-lineares, conforme já mencionado anteriormente nesta seção.

3.3. Ferramental de simulação utilizado

Os modelos de simulação se utilizaram integralmente de um módulo, denominado *Spartan Supply Chain Simulation* (doravante somente Spartan), para sua elaboração. Este módulo, criado no ambiente do *software* de propósito específico ARENA, foi inicialmente desenvolvido por Rodrigues (2004) para posteriormente ser incrementado pelo próprio autor. O Spartan tem auxiliado diversas pesquisas quantitativas incentivadas e elaboradas pelo Centro de Estudos em Logística do COPPEAD (CEL/COPPEAD), por exemplo: Jácome e Benzecry (2005), Wanke et al. (2006), Panisset (2007) e Florio (2007).

Trata-se de um modelo computacional já previamente construído, bastante flexível a mudanças, as quais podem ser efetuadas numa interface amigável em planilhas Excel. O Spartan é capaz de suportar uma cadeia logística de até 100 produtos, composta por um elo obrigatório para a fábrica e até 6 elos intermediários adicionais para atingir os clientes, cada um com até 10 instalações, conforme demonstra a Figura 3:

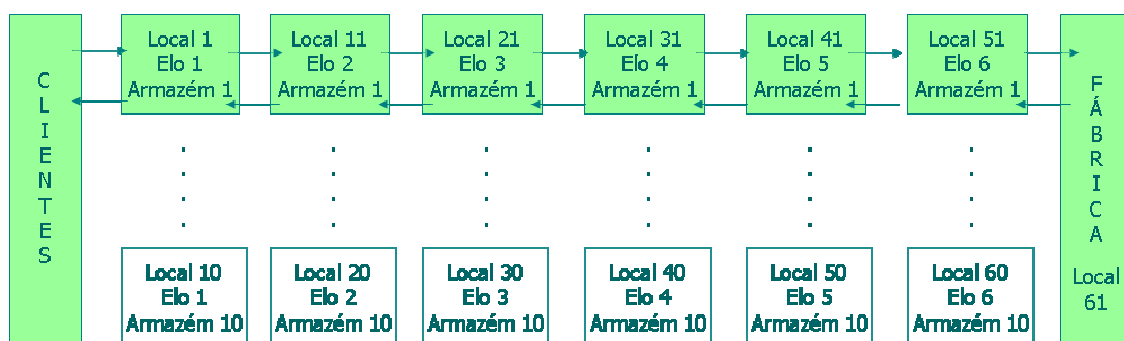


Figura 3 – Modelo estrutural do Spartan

A modelagem de uma série de peculiaridades no funcionamento da cadeia logística são permitidas neste módulo. Entretanto, não se justifica explicá-las todas porque não se usufruirá de muitas delas ao longo da pesquisa. A descrição a seguir, resume, então, somente aquelas necessárias à execução dos objetivos propostos.

A sequência diária de eventos para um dado produto num determinado elo intermediário é a seguinte:

1. Inicia o dia.
2. Descarrega lote de mercadorias eventualmente recebido.
3. Ajusta estoque disponível.
4. Lê a demanda do dia.
5. Checa o estoque disponível e:
 - a. atende o pedido integralmente se possível ou
 - b. atende pedido parcialmente e registra perda de vendas ou
 - c. não atende pedido (no caso do estoque estar zerado) e registra perda de vendas.
6. Ajusta estoque disponível.
7. Solicita reposição/reabastecimento¹⁶ no caso de o nível de estoque total (em trânsito mais disponível) ser menor ou igual ao ponto de pedido.
8. Atualiza estatísticas (médias, somas, contagens, etc.)
9. Avança o dia.

O sistema de inventário do Spartan é do estilo (PP, NR, IR), ou seja, ponto de pedido, nível de reposição e intervalo de revisão. O item 7 acima deixa claro que o intervalo de revisão do nível de estoques é fixo e diário. Por outro lado, os demais parâmetros deste sistema podem ser definidos pelo usuário na escala de dias de demanda.

Ao fim de cada período de revisão da previsão (o qual também é definido pelo usuário e, em geral, diferente do período de revisão de estoques), a demanda média futura é reavaliada. Esta previsão é a base para a determinação dos pontos de pedido e do nível de reposição. Isto implica que os níveis em quantidade são calculados dinamicamente com base em previsões de demanda, permitindo à cadeia ajustar-se a variações ao longo do tempo, inclusive as sazonais. Wanke (2003b), por exemplo, é um autor que menciona esta característica do sistema (NR, IR) em discurso sobre suas vantagens e desvantagens.

O último detalhe que merece atenção para uma perfeita compreensão do sistema de estoques no Spartan é relacionado à quantidade de pedido. Esta é determinada pela

¹⁶ Reforçando a nomenclatura utilizada na presente dissertação, referimo-nos a pedidos de reposição como aqueles realizados pelo varejo perante o centro de distribuição, ao passo que os pedidos de reabastecimento são aqueles realizados pelo centro de distribuição perante a fábrica.

diferença entre NR e a posição de estoque, cujo nível encontra-se subtraindo o estoque total (em trânsito mais o disponível) da demanda esperada durante o tempo de resposta.

Para as diversas atividades logísticas desempenhadas no âmbito do Spartan, é possível definir tempos normais de realização, bem como a possibilidade de atrasos ou antecipações. Isso é feito sempre através de uma distribuição triangular discreta. Rodrigues (2004) menciona que a distribuição triangular é comumente usada quando não se sabe a forma exata da distribuição, porém se tem disponíveis estimativas sobre seus parâmetros. No Spartan, há liberdade para definir os parâmetros que definem a distribuição triangular, discrimina-se: limite inferior, moda e limite superior. A Figura 4 ilustra todas as possibilidades de modelagem de tempos de resposta no Spartan.

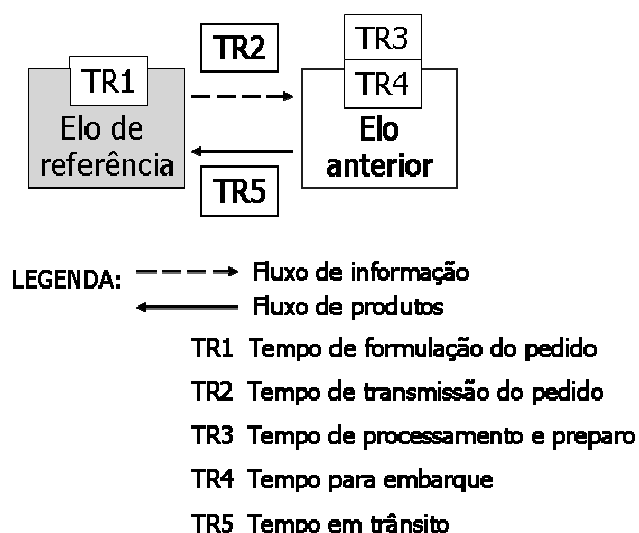


Figura 4 – Alternativas para modelagem do tempo de resposta no Spartan

Tratemos agora da fábrica. Em função do alto grau de realismo devotado à representação deste elo no Spartan, a configuração de sua operação e os impactos decorrentes podem se tornar um tanto quanto complexos. Todavia, a fim de manter o ambiente de pesquisa mais controlado e, conseqüentemente, isolar melhor os efeitos observados nas variáveis de interesse, optou-se nesta dissertação por um desenho bem simples. A fábrica foi modelada para não ter nenhuma ruptura de estoque. Podemos imaginar diversas formas de representar isto tecnicamente: (a) um sistema empurrado de produção, isto, é, baseado em previsão de vendas, com erros, definidos como a diferença entre o previsto e o real, sempre positivos; (b) um sistema de produção puxado pelo consumo com tempo de produção infinitesimal ou (c) estoques infinitos na

fábrica. Na prática, nossa solução é mais parecida com a última opção. Constituímos no Spartan estoque inicial superior à demanda total ocorrida ao longo da simulação.

Apesar de registrar as estatísticas diárias ao longo da simulação, o Spartan consolida-as e fornece ao usuário, ao fim de cada rodada, somente dados agregados para todo o período simulado. Isso é certamente uma deficiência indesejável, pois inviabiliza a eliminação do período transitório inicial, geralmente não-estacionário, conforme recomendam Law e Kelton (1991) e conforme se observou ser a melhor prática em artigos aplicados de simulação (Needham e Evers, 1998; Evers, 1999 e Ballou, 2005). A presença de dados não-estacionários é prejudicial porque pode ocasionar viés à análise estatística.

Por outro lado, o fato de estarmos utilizando o Spartan para execução dos experimentos nesta dissertação nos poupa de passar pelos passos 3, 5, 6 e 7 apresentados por Banks e Carson II (1984) em seu fluxograma metodológico (vide Figura 2). Tanto o esquema lógico-conceitual quanto o código computacional do Spartan já foram escritos, verificados e validados em Rodrigues (2004). Para certificação do modelo logístico conceitual, o mesmo foi exposto à crítica e aprovação de quatro especialistas no assunto, cada um proveniente de uma companhia distinta. Uma segunda técnica utilizada, a qual atua simultaneamente como verificadora do programa computacional, foi a do traço. Nela, fluxos de informação e produtos foram rastreados e analisados com o objetivo de avaliar a fidelidade do código ao modelo conceitual. Em terceiro lugar, foi analisado também o *log* do arquivo a fim de corrigir quaisquer falhas de programação.

Além das técnicas mencionadas, outras três foram desempenhadas no intuito de atingir validade operacional para o Spartan. São elas: “Variabilidade de Parâmetros – Análise de Sensibilidade”, “Testes de Degeneração” e “Testes de Validade Interna”. O leitor com interesse numa descrição detalhada destas técnicas é orientado a consultar Sargent *apud* Rodrigues (2004).

4. APRESENTAÇÃO DO MODELO EXPERIMENTAL

De modo a responder as perguntas apresentadas na seção 3.1, foram elaborados experimentos do tipo fatorial cheio (*full factorial*), implicando, portanto, que todas as combinações de tratamentos ao longo dos fatores são incluídas no modelo (Montgomery, 1991). Para cada um dos fatores, os quais são representados no modelo pelos três fatores ambientais e pelos dois fatores de decisão, foram definidos níveis experimentais arbitrariamente, buscando, na medida do possível, aproximação com a realidade. Esta técnica é chamada de efeitos fixos, em contraposição à de efeitos aleatórios, na qual os níveis de tratamento são selecionados por amostragem na população.

A primeira, segundo Montgomery (1991), é limitada por não permitir conclusões universais. Foi escolhida, porém, pelo fato de ser a opção de menor custo. Num modelo de cinco fatores como é o caso, o investimento necessário de tempo à pesquisa seria impeditivo, uma vez que para cada fator uma amostra suficientemente grande de tratamentos deveria ser obtida a fim de viabilizar inferência estatística. Se imaginarmos uma amostra, salienta-se, ainda bastante pequena, de 10 níveis para cada fator, teríamos no total 100.000 (10^5) tratamentos para analisar. Não bastasse a restrição de tempo, o projeto se tornaria demasiadamente complexo.

4.1. A cadeia logística e os dados de entrada

4.1.1. *Estruturas de distribuição e localização do centro de distribuição*

Duas estruturas de distribuição distintas foram modeladas para simulação da operação de uma cadeia logística simplificada com somente um produto comercializado. Tais estruturas constituem os níveis do fator experimental *DIST*. A primeira, denominada centralizada, é composta por um centro de distribuição único, abastecido diretamente pela fábrica e responsável por atender a dois varejos geograficamente separados, onde ocorre demanda local pelo produto vendido (Figura 5). A segunda, denominada descentralizada, difere da primeira por possuir dois centros de distribuição, cada um recebendo da fábrica e atendendo exclusivamente a seu respectivo varejo (Figura 6).

Em ambas as estruturas, a fábrica não faz atendimento direto ao ponto de venda e não existem transferências de estoque entre pontos de venda. Especificamente na estrutura descentralizada, tampouco foram permitidas transferências de estoque entre centros de distribuição.

Devemos estar cientes de que a decisão acerca da estrutura de distribuição implicará em trajetos distintos a serem percorridos pelos veículos de entrega. Tais trajetos poderiam ser caracterizados por diferentes condições de estrada, número de pedágios, sinuosidade, oferta de modais, etc. Entretanto, tais diferenças foram consideradas irrelevantes ou inexistentes no sistema ora modelado. A decisão acerca da estrutura não afeta significativamente tempos nem distâncias entre elos.

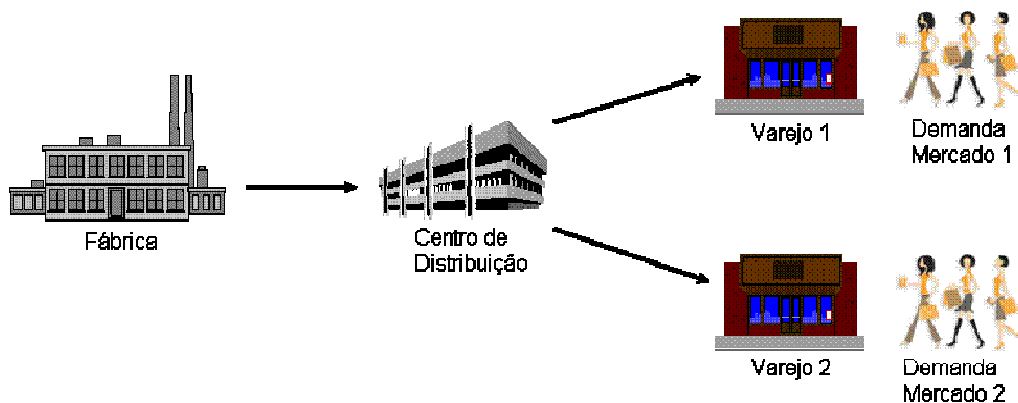


Figura 5 – Estrutura de distribuição centralizada

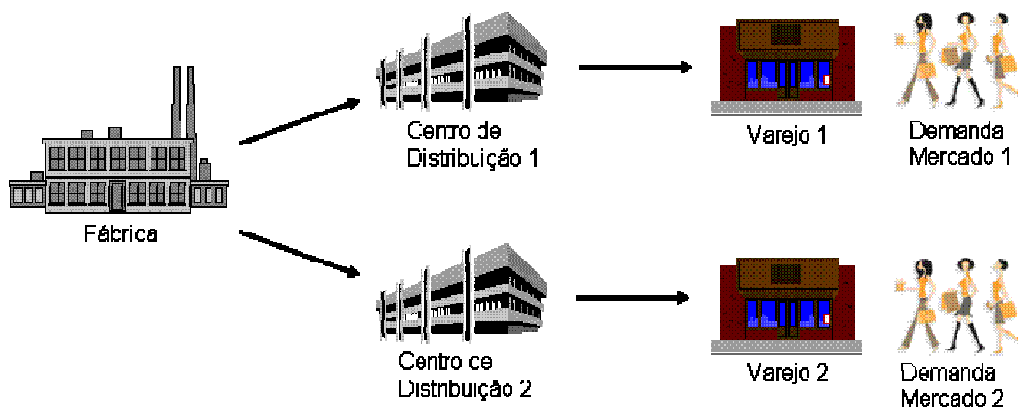


Figura 6 – Estrutura de distribuição descentralizada

Outra decisão concernente à malha logística, e que representa um segundo fator, foi sobre onde localizar o centro de distribuição. Descreveu-se esta decisão em termos da relação entre o tempo de transporte de suprimento (S) e o tempo de transporte para distribuição (D),¹⁷ dando luz então à Razão S/D ou, simplesmente, RSD . Este fator tem grande semelhança e foi inclusive inspirado naquele apresentado por Caron e Marchet (1996). O tempo de transporte entre elos foi modelado através da variável $TR5$ do Spartan, conforme exposto na Figura 4.

A idiossincrasia do fator RSD em relação à razão pt dos autores citados é que esta última abrange todo o tempo de resposta (não só o de transporte) envolvido entre elos. Conforme veremos adiante, dar o mesmo tratamento de Caron e Marchet (1996) num ambiente contendo tempos de resposta estocásticos tornaria a implementação extremamente complicada. Em função disto, preferimos uma transformação, a qual mantém todo o necessário para a consecução dos objetivos almejados e, ainda assim, permite resultados comparáveis às descobertas da dupla.

Não se modelou a possibilidade de tratamento especial de transporte para situações emergenciais (ex: frete expresso). Adicionalmente, assume-se que o custo de transporte de uma unidade de produto por unidade de tempo na perna de suprimentos é o mesmo da distribuição, logo, a decisão de localização não tem interdependência com a escolha do modal.

A empresa está avaliando duas propostas distintas. O local mais próximo ao varejo mantém distância determinística de 1 dia, ao passo que sua alternativa está a 2 dias de viagem. No caso descentralizado, a decisão tomada vale para os dois armazéns¹⁸. Isto significa que não se admitiu localizar um próximo ao varejo e outro distante.

A soma de $S + D$ foi modelada como sendo sempre igual a 5 dias, o que implica que quando o armazém estiver próximo do varejo ($D=1$), $S=4$. Quando estiver distante ($D=2$), $S=3$.

¹⁷ Esta dissertação se refere à primeira perna da cadeia logística simulada como sendo a perna de suprimento, enquanto que se refere à segunda perna da cadeia como sendo a perna de distribuição.

¹⁸ Novamente, reforçamos que os termos armazém e centro de distribuição foram utilizados como sinônimos.

Resumimos as informações fornecidas acerca da localização e as opções de *RSD* no Quadro 1.

<i>RSD</i> (<i>S/D</i>)	Localização do armazém em relação ao varejo	Tempo em dias de transporte de suprimentos (<i>S</i>)	Tempo em dias de transporte para distribuição (<i>D</i>)
Baixa = 1,5	Distante	3	2
Alta = 4	Próximo	4	1

Quadro 1 - Informações sobre localização do armazém e o fator *RSD*

4.1.2. Políticas de operação dos agentes na cadeia

Em todas as rodadas de simulação, tanto o varejo como os centros de distribuição têm sistemas de estoque puxados pelo consumo, no sentido de que operam com uma política (PP, NR, IR), cujo funcionamento foi explicado na subseção 3.3. O ponto de pedido para uma instalação qualquer foi escolhido como sendo igual, em dias, à esperança da soma das variáveis *TR3* e *TR5* do Spartan. Desses, somente *TR3* (tempo de processamento do pedido no elo anterior) ainda não teve seus parâmetros definidos. Essa informação será detalhada na subseção seguinte.

Definiu-se o nível de reposição como a soma de PP e IR. Segundo Wanke (2003b), a escolha desta combinação de parâmetros prepara a empresa contra casos adversos de variação na demanda. IR, conforme dito em outro momento, é diário. O estoque inicial da simulação foi definido como igual a NR.

O estoque de segurança, por sua vez, não foi adotado para nenhum dos elos, ficando zerado durante todos os dias simulados. Isso não implica deficiência do modelo, pois os efeitos da centralização podem ser capturados alternativamente medindo-se o nível de serviço, que será certamente menor na ausência de estoques de segurança.

O horizonte de previsão da demanda para definição de PP e de NR foi de 30 dias, com intervalo de revisão igual a 7 dias. A previsão no varejo tem nível de acerto de 100%. Com relação ao centro de distribuição, sua previsão é a soma das demandas esperadas para os varejos atendidos no mesmo período para o caso descentralizado ou, simplesmente, a demanda esperada para o varejo singular atendido, quando nos referimos à estrutura centralizada.

A fábrica, conforme já adiantado, mantém estoque suficiente para não ter falta de produtos em momento algum.

Cabe finalmente frisar que o registro de pedidos pendentes não foi modelado em nenhum dos elos. Ocorrendo falta no centro de distribuição, o varejo simplesmente refaz o pedido no dia seguinte. Quando tratamos de faltas ocorridas no varejo, a perda de venda é então registrada. Assume-se, para isso, infidelidade à marca no processo de consumo. Os clientes não aceitam esperar para a aquisição do produto e, numa eventual ruptura de estoque da empresa sob análise, saem instantaneamente à procura de outros concorrentes para efetuar a transação e saciar sua demanda. Para assegurar robustez a este modelo e evitar que os clientes retornem no dia seguinte com a demanda do dia anterior, provocando autocorrelação serial e não-estacionariedade nos dados, é ainda necessário assumir que ao menos um dos concorrentes exibe disponibilidade para atender o cliente.

4.1.3. *Tempos de resposta*

Antes de entrarmos na descrição dos tempos de resposta, cabe salientar que foi considerado que a operação de agentes pertencentes a um mesmo elo tem a mesma eficiência no que concerne a seus processos internos, desde a formulação de um pedido até a inspeção de recebimento de mercadorias (na perspectiva do demandante) e desde o recebimento do pedido até o despacho para atendimento à demanda (na perspectiva do fornecedor)¹⁹. Assume-se também que a diferença de tempo gerada por lotes de tamanho distintos são negligenciáveis para qualquer que seja a atividade desempenhada.

O tempo de resposta total de uma determinada instalação (desconsiderou-se a fábrica da presente discussão pelo fato de sua operação já ter sido explicada) é composto por $\sum_{i=1}^5 TR_i$ mais todo o tempo perdido em virtude de uma eventual falta de estoque na fonte de fornecimento (doravante denominado “tempo de recomposição de estoque do fornecedor”). Isso significa que o tempo total de resposta de uma instalação pode não se resumir às variáveis previstas na Figura 4.

¹⁹ O centro de distribuição pode assumir os dois papéis, tanto de demandante como de fornecedor, dependendo da contraparte na transação, se fábrica ou varejo, respectivamente.

No nosso modelo, equivalência entre tempo de resposta total e $\sum_{i=1}^5 TR_i$ só ocorre quando a referência é um centro de distribuição, pois, dado que não há rupturas de estoque na fábrica, o “tempo de recomposição de estoque do fornecedor” é nulo. Isso não é aplicável, contudo, ao varejo. Nesse caso, o “tempo de recomposição de estoque do fornecedor” é estocástico, pois as rupturas de estoque no centro de distribuição são estocásticas. Por essa razão, não há como determinar, *a priori*, sem uma análise matemática profunda, a esperança do tempo de resposta total do varejo.

Haver ciência desse fato é importante para a própria operacionalização do modelo. Conforme foi mencionado na subseção anterior, o ponto de pedido (PP) foi definido como sendo $E(TR_3+TR_5)$, onde $E(x)$ é o operador de esperança para uma variável x . Certamente que o ideal seria definir PP como a esperança do tempo de resposta total da instalação. Porém, como não conhecemos esse parâmetro (ao menos no que concerne ao varejo), a saída foi definir PP como sendo igual à esperança da parcela conhecida do tempo de resposta total. Uma vez que definimos $TR_1=TR_2=TR_4=0$, temos que $E(TR_3+TR_5)$ representa, portanto, essa parcela.

Recordando, TR_5 já teve seus parâmetros definidos na subseção 4.1.1 que explicou o fator RSD . Falta então definir TR_3 . Quando ligado à segunda perna da cadeia logística (distribuição), assumiu-se TR_3 determinístico e constante em 0 (zero) dia. O motivo para isto foi isolar os efeitos de oscilações no tempo de resposta da perna de suprimentos e tornar a análise mais simples e clara. Com relação à primeira perna (suprimentos), TR_3 teve suas ocorrências modeladas por uma distribuição de probabilidades triangular discreta simétrica. Isto forma o alicerce de um terceiro fator estudado: a amplitude de variação no tempo de reabastecimento (AMP).

Num primeiro cenário (nível experimental) para esse fator, foram atribuídos à distribuição os parâmetros de 2, 3 e 4 dias para, respectivamente, limite mínimo, moda e limite superior. Estes valores implicam uma amplitude igual a 2. Além disso, implica uma média de 3 dias, desvio-padrão de 0,71 e uma chance de 25% de ocorrer atrasos quando considerada a média como critério de referência. Noutro cenário, modelou-se a distribuição triangular como tendo 0 (zero), 3 e 6 dias. Neste caso, a amplitude vira 6, a

média permanece em 3 dias, o desvio-padrão fica em 1,57 e a chance de ocorrer atrasos em 37,5%.

A conjugação das informações introduzidas nesta subseção com outras prestadas anteriormente foram sumarizadas dando origem ao Quadro 2. Nele, estão disponíveis os dados que suportam a construção dos fatores *RSD* e *AMP*, além dos parâmetros à PP.

4.1.4. Geração das séries de demanda

A geração das séries de demanda dos mercados simulados respeitou instruções descritas em Ripley (1987) para amostragem baseada em distribuição Normal multivariada de p dimensões com média μ e matriz de variância-covariância Σ . Segundo esse procedimento, deve-se supor que $\Sigma = SS'$ para uma matriz S de dimensão $p \times p$, a qual sempre existe. Se $Z_1, Z_2, \dots, Z_p$ forem choques normais padronizados independentes, onde Z_i é um vetor que representa uma partição de uma matriz Z $p \times n$, então, pode-se dizer que: $X = \mu + SZ \sim N(\mu, \Sigma)$. Cabe esclarecer que X também possui dimensão $p \times n$ e que n significa o número de observações de X .

Nash (1990) afirma que quando uma matriz A é simétrica e positiva definida²⁰, viabiliza-se desempenhar, sem necessidade de rotação nos dados, a decomposição simétrica $A = LL'$, onde L é uma matriz triangular inferior. O autor apresenta ainda o algoritmo de Choleski para derivação dos elementos de A a partir de L ou o inverso:

$$A_{ij} = \sum_{k=1}^{\min(i,j)} L_{ik} L'_{kj} = \sum_{k=1}^{\min(i,j)} L_{ik} L_{jk}$$

L é somente a notação utilizada por Nash (1990) para a matriz triangular e pode ser denominada S . Equivalentemente, A pode ser denominada Σ .

²⁰ Isso acontece quando $Q_A(x) = x'A x > 0, \forall x \neq 0, x \in \mathbb{R}$, onde $Q_A(x)$ representa a forma quadrática de A . Ressalta-se que a matriz de variância-covariância Σ atende a todos esses requisitos.

AMP	RSD	Suprimento (1ª perna da cadeia logística)							Distribuição (2ª perna da cadeia logística)						
		Tempo de recomposição de estoque na fábrica	Tempo de processamento de pedidos na fábrica (TR3) mín, moda, máx	Tempo de transporte de suprimentos (TR5)	Tempo de resposta total do armazém mín, moda, máx	Desvio-padrão do tempo de resposta total do armazém	Chance de atraso do pedido de reabastecimento	PP do armazém	Tempo de recomposição de estoque no armazém	Tempo de processamento de pedidos no armazém (TR3)	Tempo de transporte para distribuição (TR5)	Tempo de resposta total do varejo	Desvio-padrão do tempo de resposta total do varejo	Chance de atraso do pedido de reposição	PP do varejo
		em dias	em dias	em dias	em dias			em dias	em dias	em dias	em dias	em dias			em dias
Baixa= 2	Baixa= 1,5	0	2, 3, 4	3	5, 6, 7	0,71	25%	6	Incerto	0	2	Incerto	Incerto	Incerta	2
	Alta= 4	0	2, 3, 4	4	6, 7, 8	0,71	25%	7	Incerto	0	1	Incerto	Incerto	Incerta	1
Alta= 6	Baixa= 1,5	0	0, 3, 6	3	3, 6, 9	1,57	37,5%	6	Incerto	0	2	Incerto	Incerto	Incerta	2
	Alta= 4	0	0, 3, 6	4	4, 7, 10	1,57	37,5%	7	Incerto	0	1	Incerto	Incerto	Incerta	1

Quadro 2 - Parâmetros associados aos fatores AMP e RSD e aos pontos de pedido

No caso aqui descrito, $p=2$, de modo a representar os dois mercados modelados. Considerando d dias para a simulação de cada cenário, conclui-se, portanto, que X tem dimensão $2 \times d$. Foi adotado como média diária de demanda para cada um dos mercados valor igual a 100 em todos os cenários. Já para a formação da matriz Σ $p \times p$ de cada cenário, combinou-se os valores sumarizados no Quadro 3, os quais compõem dois dos fatores estudados, são eles: a magnitude (*MAGN*) – razão entre os desvios-padrão, restrita, por construção, a valores maiores ou iguais a 1, conforme determina a Equação (2) apresentada na revisão bibliográfica – e a correlação (*CORR*).

MAGN, conseqüentemente, assume dois níveis experimentais: 1 (30/30) e 2 (60/30), enquanto que *CORR* assume 3 níveis (-0,7; 0; 0,7).

Descrição	Valores
Desvio-padrão do mercado 1	30
Desvio-padrão do mercado 2	30; 60
Correlação entre os mercados 1 e 2	-0,7; 0; 0,7

Quadro 3 - Parâmetros de demanda diária para os mercados 1 e 2

Num contexto real, podemos imaginar correlação positiva representando mercados complementares, a negativa como sendo referente à canibalização entre eles e a nula para mercados desassociados.

Para todas as combinações de valores do Quadro 3 (seis no total), foi usada a mesma semente aleatória na geração das séries de demanda, fato que mantém a série do mercado 1 constante em todos os mercados simulados. Apenas a série de demanda do mercado 2 foi alterada, sofrendo os ajustes pertinentes em seus dados de modo a compatibilizar a distribuição conjunta das séries aos parâmetros do Quadro 3. A geração das séries foi realizada no *software* Excel.

Merece destaque que o procedimento de usar a mesma semente evita a introdução de variabilidade não-controlável no ambiente, apurando assim a inferência. Alguns exemplos de artigos aplicados baseados nesta técnica são Evers (1999) e Ballou (2005).

Por fim, alertamos que as observações geradas foram arredondadas para números inteiros e truncadas em zero, não permitindo, portanto, valores negativos. As ocorrências de truncagem não chegaram a descaracterizar a normalidade das séries em quaisquer dos cenários simulados, mesmo naqueles de maior desvio-padrão.

4.2. Replicações e dados de saída

Foram rodadas, para cada grupo de tratamento, 100 replicações. A justificativa para a escolha deste número está disponível na subseção 4.4.1.

Em cada replicação, 800 dias de operação da cadeia logística foram simulados. Optou-se pela utilização de uma série longa a fim de minimizar os impactos potencialmente danosos dos efeitos transitórios iniciais da simulação, os quais não podem ser expurgados face à deficiência do Spartan no que concerne à abertura dos dados de saída, prestados não em nível diário, mas somente no agregado (vide discussão inserida na seção 4.2).

As medidas coletadas ao fim de cada replicação estão demonstradas no Quadro 4 a seguir.

Algumas observações se fazem interessantes a respeito dessas medidas. P_i é equivalente ao número total de dias da simulação com demanda não nula. Isto acontece porque a demanda diária ocorre em bloco no Spartan, logo, é entendida pelo simulador como um único pedido. Pelo mesmo princípio, F_i é equivalente ao número de dias em que houve falta de ao menos uma unidade de produto.

PPC_i , por sua vez, é derivada a partir de um cálculo simples, correspondente a $1 - (F_i / P_i)$. Já FR_i representa a razão A_i / D_i . Por fim, vale mencionar que, dependendo do sistema de distribuição simulado, se centralizado ou descentralizado, j assumirá 1 ou 2, respectivamente. Quanto às demais medidas, são explicativas em si mesmas e dispensam maiores esclarecimentos.

De posse desses registros, foram então calculadas as variáveis de interesse para análise ou, em outras palavras, as variáveis dependentes do experimento. O Quadro 5 as discrimina:²¹

Medida	Descrição
P_i	Número total de pedidos de clientes ocorridos no varejo i nos 800 dias simulados
F_i	Número total de ocorrências de falta de estoque no varejo i nos 800 dias simulados
PPC_i	Percentual de pedidos completos atendidos pelo varejo i durante os 800 dias simulados
D_i	Quantidade total demandada por clientes no varejo i nos 800 dias simulados
A_i	Quantidade total atendida pelo varejo i durante os 800 dias simulados
FR_i	<i>Fill-rate</i> do varejo i durante os 800 dias simulados
$EMMc_d_j$	Estoque médio diário em mãos no centro de distribuição j
$EMMv_i$	Estoque médio diário em mãos no varejo i
EMT_j	Estoque médio diário em trânsito entre a fábrica e o centro de distribuição j
EMT_i	Estoque médio diário em trânsito entre o centro de distribuição e o varejo i
$QCRv_i$	Quantidade total de carregamentos recebidos no varejo i durante os 800 dias simulados
$QCRcd_j$	Quantidade total de carregamentos recebidos no centro de distribuição j durante os 800 dias simulados
PR_i	Quantidade total de pedidos de reposição solicitados pelo varejo i durante os 800 dias simulados
PS_j	Quantidade total de pedidos de reabastecimento solicitados pelo centro de distribuição j à fábrica durante os 800 dias simulados

Quadro 4 – Medidas de saída coletadas da simulação

²¹ Convém ressaltar que análises posteriores mostraram que as variáveis PR , PS e $PPCUES$ poderiam ser descartadas do modelo, o que de fato foi feito, sem perda de informação relevante ou prejuízo aos resultados.

Variável	Descrição
$QCRv$	Quantidade total de carregamentos recebidos nos varejos durante os 800 dias simulados
$QCRcd$	Quantidade total de carregamentos recebidos no(s) centro(s) de distribuição durante os 800 dias simulados
PR	Quantidade total de pedidos de reposição solicitados pelos varejos ao(s) centro(s) de distribuição durante os 800 dias simulados
PS	Quantidade total de pedidos de reabastecimento solicitados pelo(s) centro(s) de distribuição à fábrica durante os 800 dias simulados
$PPCUES$	Percentual de pedidos completos atendidos pelos varejos, ponderado pelo número total de pedidos recebidos por cada varejo, por unidade de estoque no sistema
$FRUES$	<i>Fill-rate</i> dos varejos, ponderado pela demanda total observada em cada varejo, por unidade de estoque no sistema

Quadro 5 - Variáveis dependentes do modelo experimental

sendo que:

$$QCRv = QCRv_1 + QCRv_2 \quad ,$$

$$QCRcd = \sum_j QCRcd_j \quad ,$$

$$PR = PR_1 + PR_2 \quad ,$$

$$PS = \sum_j PS_j \quad .$$

$$PPCUES = \frac{\sum_{i=1}^2 PPCi \cdot Pi}{P_1 + P_2} \cdot EMS \quad ,$$

$$FRUES = \frac{\sum_{i=1}^2 FRi \cdot Di}{D_1 + D_2} \cdot EMS \quad ,$$

onde:

$$EMS = \sum_j EMMcd_j + \sum_{i=1}^2 EMMv_i + \sum_j EMT_j + \sum_{i=1}^2 EMT_i$$

EMS se refere ao estoque médio no sistema por dia simulado. A fábrica foi excluída da definição de sistema, pelo fato de possuir modelagem especial de seu estoque, modelagem, conforme comentado, formulada com o único intuito de simplificar o estudo.

As variáveis de interesse foram escolhidas porque representam indicadores de desempenho intimamente ligados a custos logísticos. *PPCUES* e *FRUES* captam, cada uma a seu jeito, a relação entre custos de falta e custos de excesso de estoque no sistema. A falta é medida apenas no varejo e não no centro de distribuição por ser na ponta da cadeia que a ruptura de estoque definitivamente representa um custo, na forma de perda de margem de contribuição ou de deterioração da imagem do produto ou da empresa.

Para Ronen (1990), medir *PPC* não tem valor prático nenhum sob o ponto de vista da informação sobre a disponibilidade de estoques. O autor sustenta sua posição argumentando que o custo de falta seria realmente refletido a cada unidade de produto não vendida, logo, *FR* seria a única medida relevante. Além disso, critica o modelo de *Portfolio Effect* criado por Zinn, Levy e Bowersox (1989) por se fundamentar no primeiro indicador.

A se deixar influenciar por este raciocínio, *PPCUES* seria eliminada da corrente pesquisa. No entanto, preferimos nos levar pela idéia do trio Zinn, Levy e Bowersox (1990), os quais julgam que nenhuma medida sozinha logra captar todas as dimensões intrínsecas aos problemas de disponibilidade de produtos. Defendem que *PPC* pode sim ser mais informativa do que *FR* em determinados cenários e exemplificam dizendo que clientes podem formar sua percepção a respeito do nível de serviço baseados em quão freqüentes são as faltas, ao invés da quantidade relativa da falta.

O motivo pelo qual se relativizou as medidas de serviço (*PPC* e *FR*) pela de estoque (*EMS*) foi padronizar a variável de interesse e, conseqüentemente, tornar mais simples e

diretas as comparações entre os diversos sistemas simulados. Isso é especialmente válido porque o estudo trata de uma estrutura logística geral, que não especifica a relação entre os custos de falta e de excesso. A medida não é perfeita, decerto, pelo fato de estoques oferecerem benefícios decrescentes de escala – em termos de aumento de nível de serviço a cada unidade acrescentada ao estoque. De qualquer modo, julgou-se que a padronização na variável captaria apropriadamente os efeitos de eficiência em custos.

Cabe ressaltar também que a utilização da variável *EMS* assume custo de carregamento de estoque homogêneo ao longo de toda a cadeia logística, não importando se o produto está em mãos ou em trânsito e não importando também se está armazenado no centro de distribuição ou no varejo.

As variáveis *QCRcd* e *QCRv*, por sua vez, trazem à análise uma sensação a respeito dos custos de frete com transporte de suprimentos e com distribuição de produtos, respectivamente, além dos custos com carga e descarga, inspeção de recebimento, atualização de registros de estoque e processamento de pagamentos. Conforme estas variáveis crescem, tais custos também crescem, *ceteris paribus*.

As variáveis *PS* e *PR* contemplam os custos de pedir do(s) centro(s) de distribuição e dos varejos, respectivamente. Aí estão inclusos custos de cotação e negociação com fornecedores, o custo de colocação da ordem, de acompanhamento e controle. Novamente, quando estes indicadores crescem, os custos de pedir também crescem, tudo o mais constante.

Devemos enfatizar que, para utilizar as variáveis de desempenho acima mencionadas como indicadores de custo precisos, duas hipóteses implícitas estão sendo admitidas. Primeira, os custos unitários de um varejo foram considerados idênticos ao de seu par, assim como, no caso descentralizado, os custos unitários de um centro de distribuição foram considerados idênticos ao de seu par, se aplicável. Segunda, a quantidade do pedido ou do carregamento não altera seu custo.

Outro componente do custo logístico muito importante não está sendo abordado como variável dependente nesta pesquisa, mas sim como fator de decisão. Trata-se do custo

de construção e manutenção de instalações (ou da terceirização dessa operação), o qual é abordado implicitamente quando se opta por centralizar ou descentralizar a distribuição e também quando se opta por aproximar ou distanciar o armazém do varejo.

4.3. Acabamento do modelo

Uma peculiaridade do desenho experimental aqui proposto está intimamente ligada à maneira como foram coletados os dados para as variáveis dependentes. Uma vez que foram gerados através de rodadas de simulação computacional, foi fácil obter, para cada grupo de tratamento, um mesmo número de observações. Isto deixa-nos, conseqüentemente, de posse de dados balanceados e completos (Montgomery, 1991).

Segundo esse autor, um modelo de efeitos fixos cheio, com três fatores e dados balanceados e completos, pode ser assim descrito matematicamente:

$$y_{ijkl} = \mu + \tau_i + \beta_j + \varphi_k + (\tau\beta)_{ij} + (\tau\varphi)_{ik} + (\beta\varphi)_{jk} + (\tau\beta\varphi)_{ijk} + \varepsilon_{ijkl}, \quad (14)$$

sendo que:

y_{ijkl} é a observação da replicação l no grupo de tratamento ijk para uma variável dependente y qualquer,

μ é um parâmetro comum a todos os tratamentos e é chamado de média geral,

τ_i é um parâmetro exclusivo do nível i associado ao fator τ ,

β_j é um parâmetro exclusivo do fator j associado ao fator β ,

φ_k é um parâmetro exclusivo do fator k associado ao fator φ ,

$(\tau\beta)_{ij}$ é o efeito da interação entre os níveis i e j dos fatores τ e β ,

$(\tau\varphi)_{ik}$ é o efeito da interação entre os níveis i e k dos fatores τ e φ ,

$(\beta\varphi)_{jk}$ é o efeito da interação entre os níveis j e k dos fatores β e φ ,

$(\tau\beta\varphi)_{ijk}$ é o efeito da interação entre os níveis i, j e k dos fatores τ, β e φ ,

ε_{ijkl} é um componente idiossincrático associado a y_{ijkl} com distribuição Normal de média nula e variância σ^2 .

Adicionalmente,

$$\sum_{i=1}^a \tau_i = 0,$$

$$\sum_{j=1}^b \beta_j = 0,$$

$$\sum_{k=1}^c \varphi_k = 0,$$

$$\sum_{i=1}^a (\tau\beta)_{ij} = 0, \text{ para } j = 1, 2, \dots, b,$$

$$\sum_{j=1}^b (\tau\beta)_{ij} = 0, \text{ para } i = 1, 2, \dots, a,$$

$$\sum_{i=1}^a (\tau\varphi)_{ik} = 0, \text{ para } k = 1, 2, \dots, c,$$

$$\sum_{k=1}^c (\tau\varphi)_{ik} = 0, \text{ para } i = 1, 2, \dots, a,$$

$$\sum_{j=1}^b (\beta\varphi)_{jk} = 0, \text{ para } k = 1, 2, \dots, c,$$

$$\sum_{k=1}^c (\beta\varphi)_{jk} = 0, \text{ para } j = 1, 2, \dots, b,$$

$$\sum_{i=1}^a (\tau\beta\gamma)_{ijk} = 0, \text{ para todas as combinações de } j = 1, 2, \dots, b \text{ e } k = 1, 2, \dots, c,$$

$$\sum_{j=1}^b (\tau\beta\gamma)_{ijk} = 0, \text{ para todas as combinações de } i = 1, 2, \dots, a \text{ e } k = 1, 2, \dots, c,$$

$$\sum_{k=1}^c (\tau\beta\gamma)_{ijk} = 0, \text{ para todas as combinações de } i = 1, 2, \dots, a \text{ e } j = 1, 2, \dots, b,$$

Onde a , b e c representam o número de níveis dos fatores τ , β e φ , respectivamente.

Uma demonstração matemática da estimação destes parâmetros pode ser encontrada em Montgomery (1991), assim como a construção de testes de hipótese univariados sobre os mesmos. A ANOVA, técnica discutida por este autor e apresentada superficialmente mais a frente, é freqüentemente utilizada para estudar modelos assim. Segundo o mesmo autor, outra abordagem possível se dá pela aplicação de regressão linear. Não nos aprofundaremos muito nestes tópicos, pois vários *softwares* estatísticos disponibilizam tais funcionalidades aos usuários.

Por fim, note que a Equação 14 está sumarizada para somente 3 fatores a fim de facilitar a notação e economizar espaço, porém sua extensão é simples e direta. Exige somente que aumentemos os termos individuais, de interação e as restrições associadas à estes termos de forma correspondente.

No intuito de refrescar a memória do leitor e deixar bem explícitos os fatores componentes do modelo experimental ora proposto, resumimos suas características no Quadro 6.

Fator experimental	Escala	Níveis
(1) Estrutura de distribuição (<i>DIST</i>)	Nominal	(a) Centralizado: <i>DIST</i> = 1 (b) Descentralizado: <i>DIST</i> = 2
(2) Razão entre os tempos de transporte de suprimentos e de distribuição (<i>RSD</i>)	Métrica	(a) Baixo: <i>RSD</i> = 1,5 (b) Alto: <i>RSD</i> = 4
(3) Correlação entre as demandas dos mercados (<i>CORR</i>)	Métrica	(a) Negativo: <i>CORR</i> = -0,7 (b) Nulo: <i>CORR</i> = 0 (c) Positivo: <i>CORR</i> = 0,7
(4) Magnitude entre desvios-padrão das demandas (<i>MAGN</i>)	Métrica	(a) Baixo: <i>MAGN</i> = 1 (b) Alto: <i>MAGN</i> = 2
(5) Amplitude de variação no tempo de reabastecimento do centro de distribuição (<i>AMP</i>)	Métrica	(a) Baixo: <i>AMP</i> = 2 (b) Alto: <i>AMP</i> = 6

Quadro 6 - Resumo dos fatores experimentais

O número de níveis em cada fator pode ser considerado pequeno e pouco representativo de suas respectivas populações. A crítica é válida, decerto, mas o estudo tem a intenção de iniciar a exploração da interação entre estes fatores e não exauri-la. Mesmo com este limitado número de níveis, as combinações analisadas perfazem um total de 48 tratamentos ($2^4 \times 3$).

4.4. O método de análise dos dados de saída

A técnica selecionada para investigação dos dados de saída do experimento foi a Análise Multivariada de Variância (MANOVA - *Multivariate Analysis of Variance*). Esta técnica permite o exame simultâneo da resposta de um grupo de variáveis dependentes métricas à uma seleção de uma ou mais variáveis independentes categóricas (Hair et al., 2005).

As variáveis independentes não estão limitadas, contudo, à representação apenas de fatores qualitativos. Montgomery (1991) afirma que o fator pode ter natureza numérica. Suas categorias seriam então interpretadas como níveis em uma escala de valores pertencente a um determinado domínio. O autor continua dizendo que o tratamento matemático e estatístico aplicado à resolução do problema é idêntico em qualquer das duas circunstâncias, uma vez que a diferença entre grupos/níveis é que está em jogo. A única nuance é que, quando o fator for quantitativo, talvez seja interessante, a fim de suplementar a MANOVA, estimar a realização de cada variável dependente em níveis intermediários aos analisados. Dependendo da ocasião, metodologias distintas podem ser aplicadas neste procedimento, inclusive um simples estudo de regressão linear múltipla.

A partir deste discurso, fica evidente o paralelo que existe com um dos passos da técnica de “otimização da simulação”, a qual foi brevemente mencionada na subseção 2.3.7. O procedimento ao qual Montgomery (1991) faz referência é simplesmente o passo de estimação da função objetivo nessa técnica.

Na presente dissertação, lembramos que todos os fatores, exceto *DIST*, tem natureza numérica²². Sendo assim, seria certamente frutífera a construção de uma curva que ajustasse a variável dependente para níveis intermediários aos tratamentos utilizados. Entretanto, o pequeno número de níveis disponíveis por fator nesta dissertação não permite subsidiar essa análise suplementar. Fica então o desafio para estudos futuros.

Antes de entrar na discussão de como a MANOVA atinge seu propósito, é recomendável compreender sua versão univariada. Esta é útil para avaliar se existe diferença estatística entre as médias amostrais de determinados grupos de indivíduos/observações para uma variável qualquer. Colocando de outra forma, significa dizer que confronta a hipótese nula $\mu_1 = \mu_2 = \mu_3 = \dots = \mu_k$, onde μ representa a média e k é um índice para o número total de grupos.

Logra-se este objetivo realizando um teste F. Sabe-se que a razão (Montgomery, 1991):

²² É curioso notar que até mesmo *DIST* pode ser pensado como sendo de natureza numérica. Representaria, portanto, o número de armazéns no elo intermediário e não somente uma distinção categórica entre centralizada e descentralizada.

$$F_{u,v} = \frac{\chi_u^2 / u}{\chi_v^2 / v}, \quad (15)$$

onde χ_u^2 e χ_v^2 são duas variáveis aleatórias qui-quadradas independentes com, respectivamente, u e v graus de liberdade, possui distribuição F com graus de liberdade correspondentes.

Sabe-se também, derivado do Teorema de Cochran (vide Montgomery, 1991), que SQ_g/σ^2 e SQ_e/σ^2 possuem distribuição qui-quadrada e são independentes entre si, onde:

$$SQ_g = n \sum_{i=1}^a (\bar{y}_{i.} - \bar{y}_{..})^2,$$

$$SQ_e = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^n (y_{ij} - \bar{y}_{i.})^2,$$

sendo que,

n é o total de observações em cada um dos a grupos (assumindo-se grupos balanceados),

$\bar{y}_{i.}$ é a média das observações do grupo i ,

$\bar{y}_{..}$ é a média geral de todas as observações da amostra,

y_{ij} é a observação j do grupo i ,

σ^2 é a variância do erro num modelo linear $y_{ij} = \mu + \tau_i + \varepsilon_{ij}$.²³

SQ_g pode ser interpretada como uma medida total da diferença entre grupos de tratamento, enquanto que SQ_e representa uma medida do total das diferenças entre as observações e as médias de seus respectivos grupos, ou seja, dos erros. Se dividirmos estas medidas pelos seus respectivos graus de liberdade, encontramos as médias das somas dos quadrados:

²³ Note que este modelo é uma réplica simplificada da Equação 14, pois contém somente um fator.

$$MQ_g = \frac{SQ_g}{a-1} \text{ e}$$

$$MQ_e = \frac{SQ_e}{N-a},$$

onde:

N é o número total de observações na amostra.

Logo, a razão MQ_g / MQ_e apresenta distribuição F de $(a - 1)$ e $(N - a)$ graus de liberdade se a hipótese nula for verdadeira. A partir do demonstrado, fica claro perceber que a medida que MQ_g cresce e não é acompanhado por MQ_e , seu “corretor estatístico”, tenderemos a rejeitar que as médias dos grupos de tratamento são equivalentes.

É importante ressaltar que quando temos uma média grupal diferente das demais, a hipótese nula já seria normalmente rejeitada. O revés é que não é possível saber sem esforços adicionais qual ou quais delas provoca(m) esta diferença. Tal objetivo pode ser atingido aplicando-se um teste de contrastes, segundo Montgomery (1991), Sharma (1996) e Hair et al. (2005). Para um maior aprofundamento no assunto, orientamos o leitor mais interessado a consultar a segunda dentre estas referências. No entanto, pacotes estatísticos como o SPSS oferecem intervalos de confiança para as médias marginais estimadas que permitem uma avaliação formal das diferenças sem necessidade de aplicação de testes de contraste.

A MANOVA difere da ANOVA pelo fato de investigar vetores de médias. Portanto, avalia simultaneamente duas ou mais variáveis. De acordo com Hair et al. (2005), a hipótese nula é estruturada da seguinte maneira para p variáveis dependentes e k tratamentos.

$$H_0 = \begin{bmatrix} \mu_{11} \\ \mu_{21} \\ \vdots \\ \mu_{p1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mu_{12} \\ \mu_{22} \\ \vdots \\ \mu_{p2} \end{bmatrix} = \dots = \begin{bmatrix} \mu_{1k} \\ \mu_{2k} \\ \vdots \\ \mu_{pk} \end{bmatrix}$$

O procedimento de verificação tem na essência o mesmo raciocínio anterior. A peculiaridade da MANOVA está em formar o que Hair et al. (2005) chamam de variante (V), uma função linear das p variáveis dependentes. Conforme descrito pela Equação 16 abaixo, V deve ser construída para cada grupo de tratamento. Esta é a base para a condução dos testes F.

$$V_s = \sum_{r=1}^p w_r \cdot \mu_{rs} \quad , s = 1, 2, \dots, k \quad (16)$$

onde w_r é o peso atribuído à variável dependente r .

Os valores de w_r podem ser encontrados pela montagem de um problema de maximização, no qual a função objetivo é a razão MQ_g/MQ_e e as variáveis de decisão são os próprios w_r . Se existirem valores de w_r tal que a diferença entre vetores de médias seja significativa, a hipótese nula é então rejeitada.

Um novo réves, agora específico da MANOVA, é que não é possível saber, a partir de sua resposta, qual ou quais variáveis dependentes contribuem para ocasionar a diferença nos vetores. Para isto, Sharma (1996) e Hair et al. (2005) recomendam que posteriormente à MANOVA sejam elaborados testes para as variáveis dependentes tomadas singularmente.

Eventualmente, alguém pode questionar então o porquê de se usar a MANOVA ao invés de se desempenhar logo de uma vez testes univariados para todas as variáveis dependentes. Tanto Sharma (1996) como Hair et al. (2005) explicam que o teste multivariado é adequado por dois motivos. O primeiro é controlar o Erro do Tipo I (isto é, a chance de se rejeitar a hipótese nula quando ela for verdadeira) e impedir seu descolamento do nível de significância α escolhido para a avaliação estatística. O segundo é que a aplicação direta da ANOVA usufrui apenas de parte da informação

disponível ao ignorar as relações existentes entre variáveis dependentes. Conseqüentemente, na ocasião de correlação não nula, pode acarretar conclusões equivocadas.

Algumas premissas sustentam a utilização da MANOVA (Sharma, 1996 e Hair et al., 2005):

- independência entre as observações, no sentido de que a realização de uma observação não está atrelada à realização de outra,
- normalidade multivariada dos erros,
- equivalência das matrizes de variância e covariância das variáveis dependentes ao longo de todos os grupos de tratamento.

A primeira delas é, de acordo com estes autores, a mais importante para uma análise confiável. A violação da segunda e da terceira será, dependendo das circunstâncias, mais ou menos prejudicial. Destacamos que o trabalho corrente, por fundamentar-se em replicações independentes de simulação, atende perfeitamente à primeira premissa. O atendimento às demais é avaliado somente na seção 5.3.

4.4.1. Definição do tamanho da amostra

Conforme adiantado na seção 4.2, cada grupo dos 48 tratamentos experimentados foi replicado 100 vezes durante as simulações, o que gera um total de 4.800 observações para análise. Este número se baseou no julgamento da relação custo/benefício entre tempo despendido na pesquisa e aumento de poder estatístico da MANOVA, ou seja, a probabilidade de o teste identificar um efeito significativo se ele realmente existir.

Segundo Hair et al. (2005), três variáveis influenciam o poder do teste: o nível de significância α definido para o mesmo, a força do efeito estudado e o tamanho da amostra. O nível de significância aplicado nesta pesquisa foi de 5%. Os efeitos dos fatores experimentais selecionados em indicadores logísticos, pelo que indica a revisão bibliográfica, é de médio para cima, ao menos quando esses fatores são tomados de maneiras específicas. Porém, vale esclarecer que a presente dissertação cruza a atual fronteira do conhecimento por avaliar a interação simultânea entre alguns níveis dos

fatores ambientais *AMP*, *CORR* e *MAGN* e as decisões de localização (*RSD*) e centralização (*DIST*). Não se sabe *a priori* qual é a real intensidade de seus efeitos. Estamos apenas especulando estimulados por indícios da literatura.

Hair et al. (2005) sugere que o tamanho da amostra deve aumentar conforme se aumenta o número de grupos experimentais e o número de variáveis dependentes. Na busca de uma referência para a definição desse tamanho, foram checados trabalhos anteriores com objetivo similar e de mesma metodologia. Discrimina-se: Rodrigues (2004), Jácome e Benzecry (2005), Wanke et al. (2006), Panisset (2007) e Florio (2007).

Observar puramente o número de observações e de replicações utilizadas nesses estudos não é um critério apropriado, pois assim não se faz ajustes que considerem a complexidade estatística envolvida em cada um. Por este motivo, desenvolvemos, conforme indica o Quadro 7, as medidas *X* e *Y*, as quais relativizam, respectivamente, o total de observações pelas variáveis dependentes incluídas no modelo e, o total de replicações pelos grupos experimentais de tratamento.

	<i>A</i>	<i>B</i>	<i>C</i>	<i>D = B x C *</i>		
Trabalho	Variáveis dependentes	Grupos experimentais	Replicações	Total de observações	$X = D / A *$	$Y = C / B *$
Rodrigues (2004)	3	150	30	4.500	1.500,0	0,2
Jácome e Benzecry (2005)	7	180	50	9.000	1.285,7	0,3
Wanke et al. (2006)	6	4	100	400	66,7	25,0
Panisset (2007)	7	16	100	1.600	228,6	6,3
Florio (2007)	6	36	50	1.800	300,0	1,4
Média	5,8	77,2	66	3.460	676,2	6,6
Mediana	6	36	50	1.800	300,0	1,4

* Fórmula não aplicável às linhas com o cálculo da média e mediana dos estudos.

Quadro 7 - Comparação de tamanho de amostra entre estudos anteriores

Considerando estas medidas, a presente dissertação alcança, de acordo com o Quadro 8: valor de 800 para *X* e 2,1 para *Y*. A primeira é melhor do que média e mediana dos trabalhos examinados. A segunda é melhor apenas do que a mediana. Isso porque a média de *Y* é extremamente elevada em função de Wanke et al. (2006), uma clara exceção dentre estes trabalhos.

Trabalho	Variáveis dependentes ²⁴	Grupos experimentais	Replicações	Total de observações	<i>X</i>	<i>Y</i>
Presente dissertação	6	48	100	4.800	800	2,1

Quadro 8 - Avaliação do tamanho da amostra e número de replicações da dissertação

²⁴ Análises posteriores indicaram que algumas variáveis dependentes deveriam ser excluídas do estudo em função de apresentarem multicolinearidade. As variáveis realmente utilizadas na MANOVA foram apenas três. Isto altera a medida *X* para o valor de 1.600, tornando-a então a maior dentro do grupo de comparação.

5. ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

5.1. Estatísticas descritivas

Previamente às análises mais elaboradas, convém apresentar, mesmo que sem discussão aprofundada, algumas estatísticas que descrevem basicamente as variáveis dependentes do experimento a fim de fornecer ao leitor uma noção da escala absoluta e também da variação nos dados presentes no trabalho. O Quadro 9 resume essa informação.

Estatística	<i>QCR_v</i>	<i>QCR_{cd}</i>	<i>PPCUES</i>	<i>FRUES</i>	<i>PR</i>	<i>PS</i>
Média	670	165	0,0350620%	0,0355130%	711	165
Desvio-padrão	128	59	0,0092235%	0,0088466%	121	59
Mínimo	401	67	0,0132338%	0,0140883%	580	67
Máximo	867	275	0,0439516%	0,0444509%	883	275

Quadro 9 - Estatísticas descritivas das variáveis dependentes

PPCUES e *FRUES* são razões construídas a partir de outros dados de saída da simulação. São os já citados: percentual de pedidos completos atendidos pelos varejos ponderado pelo número de pedidos recebidos por cada varejo (*PPC*), *fill-rate* dos varejos ponderado pela demanda observada em cada varejo (*FR*) e o estoque médio no sistema por dia simulado (*EMS*). Uma breve descrição dos mesmos está disposta no Quadro 10.

Estatística	<i>PPC</i>	<i>FR</i>	<i>EMS</i>
Média	84,04%	84,76%	2.973
Desvio-padrão	6,77%	5,93%	677
Mínimo	52,47%	56,47%	1.683
Máximo	97,68%	97,87%	6.117

Quadro 10 - Estatísticas descritivas das variáveis *PPC*, *FR* e *EMS*

Percebe-se, portanto, que há variação suficiente nos dados para justificar uma análise estatística mais aprofundada. Particularmente, vemos também que, a princípio, os dados estão conceitualmente corretos. *PPC*, como era de se esperar, é menor do que *FR*. Isto acontece porque a primeira medida penaliza da mesma forma um pedido não atendido em sua totalidade e um pedido não atendido parcialmente mesmo que por apenas uma unidade, o que não acontece com *FR*.

Era de se esperar também que *QCRcd* fosse menor do que *QCRv*, em função do menor número de ciclos existentes para a primeira perna da cadeia (suprimento).

Com relação a *EMS*, um provável *outlier* se refere ao valor máximo alcançado por esta variável, pouco mais de duas vezes o valor da média. Como este resultado foi gerado por simulação da mesma maneira que todos os demais, julgou-se apropriado mantê-lo, mesmo que prejudique o atendimento das premissas da MANOVA.

5.2. Análise da relação entre variáveis dependentes

A seção 4.4 discorreu sobre algumas características da MANOVA e alguns requisitos para sua utilização. Um deles, ainda não comentado, é que exista correlação entre as variáveis dependentes, pois, caso contrário, testes univariados resolveriam diretamente o problema (Norusis, 1988). Não obstante, se esta correlação for muito alta, a ponto de apresentar colinearidade, os testes estatísticos perderão eficiência em função da redundância contida nos dados (Hair et al., 2005).

Levando em conta estes argumentos, a interdependência entre as variáveis foi verificada checando-se a matriz de correlação entre as mesmas e seu determinante. De acordo com Norusis (1988), valores do determinante iguais a zero ou próximos trariam evidência de uma ou mais relações lineares entre os objetos da matriz, situação na qual a hipótese de independência seria rejeitada.

	<i>QCRv</i>	<i>QCRcd</i>	<i>PPCUES</i>	<i>FRUES</i>	<i>PR</i>	<i>PS</i>
<i>QCRv</i>	1					
<i>QCRcd</i>	-0,11	1				
<i>PPCUES</i>	-0,26	-0,17	1			
<i>FRUES</i>	-0,26	-0,17	0,99	1		
<i>PR</i>	0,98	-0,18	-0,27	-0,28	1	
<i>PS</i>	-0,11	1	-0,17	-0,17	-0,18	1
Determinante = 0,000						

Quadro 11 - Matriz de correlação entre as variáveis dependentes

Pela avaliação visual da matriz de correlação (vide Quadro 11), já é possível constatar que há correlação significativa entre as variáveis. O revés, porém, é que os coeficientes entre três pares de variáveis (*QCRv* e *PR*; *QCRcd* e *PS*; *PPCUES* e *FRUES*) se

mostraram altíssimos, apontando a existência de multicolinearidade, a qual foi de fato confirmada pelo determinante nulo.

Deve ser observado que a existência de correlação positiva unitária entre *QCRcd* e *PS* não deve ser estranhada. Bem verdade, ela atesta a própria validade da modelagem implementada. Recordando, não ocorre falta de produto na fábrica, fruto de um estoque “tendendo a infinito”. Dessa forma, é perfeitamente coerente que a quantidade total de carregamentos recebidos pelo(s) centro(s) de distribuição seja exatamente igual à quantidade total de pedidos realizados à fábrica em todas as replicações.

Diante dos resultados obtidos, decidiu-se então pela eliminação das variáveis *PPCUES*, *PR* e *PS* em todas as análises subseqüentes, incluindo a MANOVA e os procedimentos associados.

PPCUES foi preterida ao invés de *FRUES* porque é na verdade uma medida distorcida do percentual de pedidos atendidos integralmente. O argumento vale porque a demanda diária ocorre em bloco no modelo. Sendo assim, em cada dia de simulação somente um pedido se realiza, como se existisse somente um cliente por dia. Raros são os negócios com esta característica. O que se observa geralmente é uma composição de pedidos de diversos clientes perfazendo a demanda diária. Caso o modelo se comportasse desta forma, provavelmente *PPCUES* seria maior do que o registrado nas simulações, assumindo, no mínimo, valor igual. Por outro lado, *FRUES* não é passível de crítica, sendo perfeitamente eficaz em seu propósito.

Com relação às variáveis *PR* e *PS*, foram excluídas por conterem informações a respeito de custos menos significativos em geral do que aqueles ligados às variáveis *QCRv* e *QCRcd*. Conforme vimos, as duas primeiras estão associadas ao custo de pedir, enquanto que as duas últimas estão associadas ao custo de frete, carregamento e descarregamento de veículos, inspeção de mercadorias, atualização de registros de estoque e processamento de pagamentos aos fornecedores.

A recente e intensa difusão de sistemas sofisticados de tecnologia de informação nas empresas, inclusive daqueles instalados para auxiliar a comunicação interorganizacional, tem barateado bastante o custo tanto interno de formulação, cotação e aprovação de

pedidos, assim como o externo referente ao trato com fornecedores. Não só isso, as práticas de maior colaboração operacional e, principalmente, informacional, entre os agentes da cadeia também tem contribuído para a queda vertiginosa destes custos.

Inspeção, atualização de registros de estoque e processamento de pagamentos podem talvez ser acolhidos pelo mesmo raciocínio acima. O mesmo não pode, todavia, ser dito do custo de transporte. Conforme relatam Fleury e Wanke (2003), por exemplo, o transporte representa com folga a maior parte da estrutura de custos logísticos das empresas industriais brasileiras atualmente, perfazendo, em média, 64% do total. Proporção similar é apresentada por Nazário (2000), que afirma que o transporte atinge, em média, cerca de 60% dos custos logísticos totais das empresas em geral.

Eliminadas as variáveis que impunham relações de multicolinearidade, o exame sobre a matriz de correlação pôde então ser conduzido sem distorções. A nova matriz apresentou determinante igual a 0,883. O Teste de Esfericidade de Bartlett, que tem como objetivo o diagnóstico unificado e geral da presença de correlação não nula na matriz indicou a rejeição da hipótese de independência entre as variáveis. A estatística de teste Qui-quadrado atingiu valor igual a 597,75, o que representa significância de 0,00.

Sendo assim, conclui-se pela adequação da MANOVA, em contraposição aos testes estatísticos univariados, como método inicial de análise dos resultados visando controlar o Erro do Tipo I.

5.3. Análise residual

Antes de entrar efetivamente na MANOVA multifatorial, deve-se avaliar até que ponto suas premissas estão sendo respeitadas e quais os impactos de um eventual descumprimento. Conforme colocado na seção 4.4, são três os aspectos a ser verificados, sendo que um deles, a independência das observações, já é automaticamente atendido pela metodologia de replicações independentes adotada nos experimentos.

Os outros dois, porém, exigem esforço adicional de investigação. O primeiro trata da presença de normalidade multivariada nas variáveis dependentes. Sabe-se que condição

sine qua non, porém não garantidora, de um contexto assim, é que todas as variáveis sejam Normais individualmente (Sharma, 1996 e Hair et al., 2005). Sendo testes univariados capazes de concluir sobre a falsidade dessa hipótese, optou-se pela sua elaboração preliminar. Tal decisão foi guiada pelas seguintes razões apontadas na literatura: (a) menor complexidade envolvida (Hair et al., 2005); (b) indisponibilidade do teste em *softwares* estatísticos (Sharma, 1996). De fato, o SPSS versão 13.0 utilizado nesta dissertação, por exemplo, não contém esta funcionalidade. Adicionalmente, fazendo primeiro os testes univariados podemos identificar qual ou quais variáveis contribuem para a não-normalidade conjunta, permitindo então adotar transformações nas mesmas que busquem o respeito à premissa.

A análise dos resíduos é o método apropriado para a verificação desta e de outras hipóteses da MANOVA. Os resíduos de uma determinada variável dependente num modelo de efeitos fixos com cinco fatores tal qual o da presente dissertação são definidos como:

$$e_{ijklmn} = y_{ijklmn} - \hat{y}_{ijklmn} ,$$

onde:

e_{ijklmn} é o erro de estimação para a observação n do grupo $ijklm$,

y_{ijklmn} é a observação n do grupo $ijklm$,

$\hat{y}_{ijklmn}$ é o valor estimado para a observação n do grupo $ijklm$.

O estimador de y_{ijklmn} , segundo solução sugerida em Montgomery (1991), é, por sua vez, definido como:

$$\hat{y}_{ijklmn} = \bar{y}_{ijklm} ,$$

onde:

$\bar{y}_{ijklm}$ é a média amostral do grupo $ijklm$

Histogramas dos erros foram construídos isoladamente para cada variável dependente. Os Gráficos 2 a 4 apresentam estas distribuições de frequência e as comparam à uma curva Normal de mesma média e desvio-padrão. Algumas disparidades são trazidas à tona desde aí, principalmente quando falamos da variável QCR_v , assimétrica e com pico muito acentuado em torno de sua moda. Por outro lado, a variável QCR_{cd} aparenta proximidade com a Normal. Não obstante, tampouco esta é capaz de passar nos testes de compatibilidade levados a cabo. Estatísticas desses testes, assim como os parâmetros das distribuições, estão disponíveis no Quadro 12.

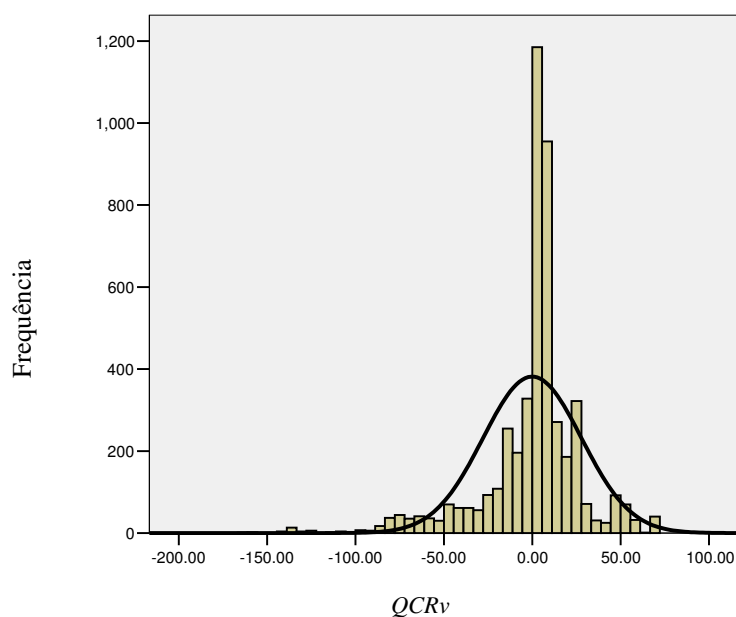


Gráfico 2 - Histograma do erro e_{ijklmn} para a variável dependente QCR_v

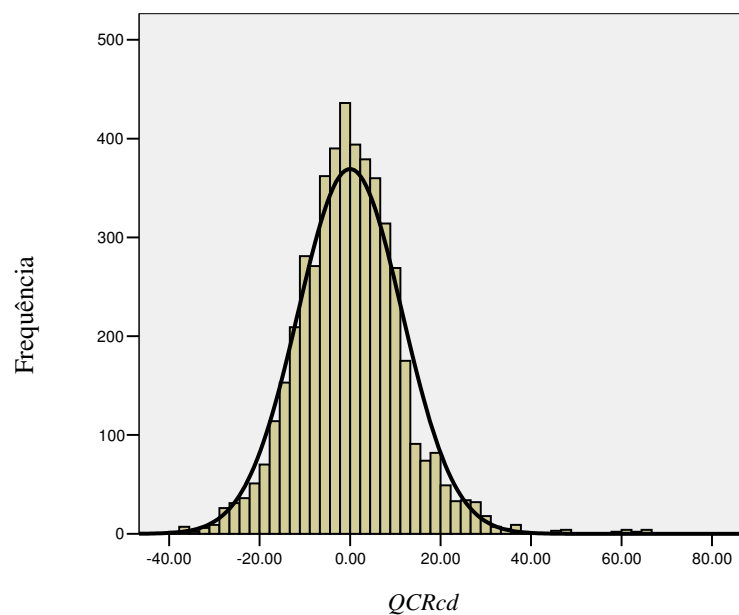


Gráfico 3 - Histograma do erro e_{ijklmn} para a variável dependente $QCRcd$

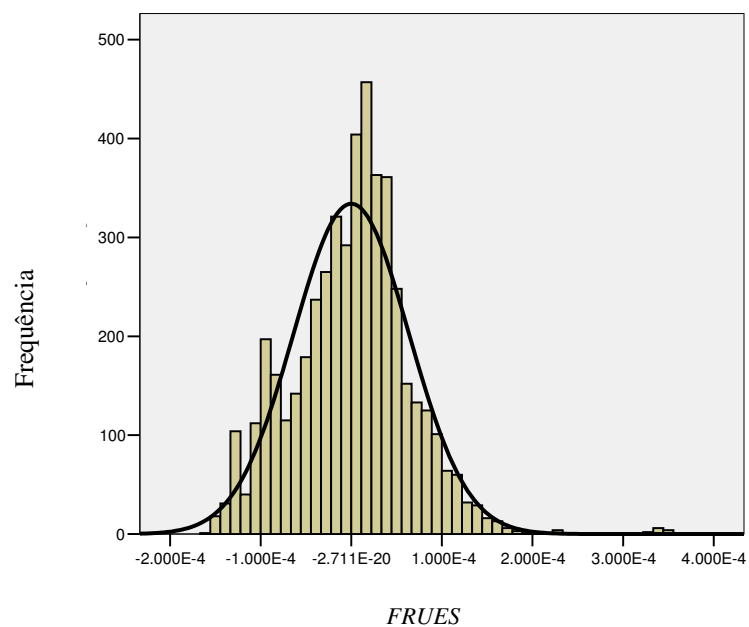


Gráfico 4 - Histograma do erro e_{ijklmn} para a variável dependente $FRUES$

Estatística	Variável dependente		
	<i>QCRv</i>	<i>QCRcd</i>	<i>FRUES</i>
Simetria ^a	-1,43	0,52	0,31
Curtose ^a	7,71	5,44	4,58
Jarque-Bera ^a	6.072,29	1.404,19	574,28
Significância ^a	0,00	0,00	0,00
Kolmogorov-Smirnov	0,19	0,04	0,04
Significância	0,00	0,00	0,00
Shapiro-Wilks	0,86	0,98	0,98
Significância	0,00	0,00	0,00

^a Estatística calculada no *software* Eviews.

Quadro 12 - Estatísticas do erro e_{ijklmn} por variável dependente e testes de normalidade

Numa tentativa de se atingir normalidade, foram conduzidas transformações nas variáveis. Segundo Hair et al. (2005), variáveis assimétricas positivamente seriam melhor transformadas tomando-se o logaritmo natural. Para o caso de simetria negativa, a raiz quadrada é mais apropriada. Sharma (1996) sugere ainda outra transformação, a logística, esta recomendada para proporções, como é o caso de *FRUES*. As tentativas de transformação adotadas foram as seguintes:

$$RQCRv = QCRv^{1/2}$$

$$LQCRcd = \ln QCRcd$$

$$LFRUES = \ln FRUES$$

$$GFRUES = 0,5 \ln [FRUES / (1 - FRUES)] \rightarrow \text{transformação logística}$$

Resumimos as estatísticas de teste sobre os erros das variáveis transformadas no Quadro 13.

Estatística	Variável dependente transformada			
	<i>RQCRv</i>	<i>LQCRcd</i>	<i>LFRUES</i>	<i>GFRUES</i>
Jarque-Bera ^a	8.395,24	1.469,69	4.204,69	8.571,91
Significância ^a	0,00	0,00	0,00	0,00
Kolmogorov-Smirnov	0,20	0,07	0,07	0,08
Significância	0,00	0,00	0,00	0,00
Shapiro-Wilks	0,86	0,96	0,96	0,95
Significância	0,00	0,00	0,00	0,00

^a Estatística calculada no *software* Eviews.

Quadro 13 - Estatísticas de teste por caso de transformação de variável dependente

Verifica-se que dada a significância obtida em todos os testes, sem exceção, nenhuma das transformações tornará Normal a distribuição dos erros. O prejuízo do não atendimento à premissa é reduzido e praticamente eliminado, porém, pela utilização de uma amostra grande (Hair et al., 2005), tal qual é a da presente dissertação, cujo total de observações monta a 4.800. De qualquer forma, a melhor aproximação é sempre bem-vinda, visto que quanto menor for a discrepância, mais confiáveis serão os testes de hipótese. Sendo assim, as estatísticas apresentadas nos Quadros 12 e 13 podem servir como critério para a escolha da melhor transformação. Um resumo comparativo é exposto no Quadro 14, onde se constata que há inconsistência entre o teste de Shapiro-Wilks e os demais, tornando os resultados inconclusivos. De qualquer forma, percebe-se concordância entre Jarque-Bera e Kolmogorov-Smirnov em torno da não transformação.

Variável	Teste de normalidade		
	Jarque-Bera	Kolmogorov-Smirnov	Shapiro-Wilks
QCRv	Nenhuma	Nenhuma	Raiz quadrada
QCRcd	Nenhuma	Nenhuma	Logarítmica
FRUES	Nenhuma	Nenhuma	Logística

Quadro 14 - Transformações indicadas para aproximação à normalidade

A análise dos resíduos passou em seguida por uma avaliação de sua dispersão ao longo dos tratamentos estudados, logo, correspondendo à última premissa da MANOVA. Novamente, adotou-se um contexto univariado de início. A sequência de Gráficos de 5 a 7 mostra a dispersão dos erros dentro de grupos para cada variável dependente e leva a crer que a não-rejeição da hipótese de homocedasticidade é possível em todos os casos.

Sabe-se que impressões visuais estão comumente sujeitas à subjetividade e baixa precisão. Ainda assim, tal interpretação pode ser considerada suficiente para assegurar qualidade na pesquisa. Discorrendo sobre a ANOVA (*Analysis of Variance*) de fator único, Montgomery (1991) afirma que em experimentos de efeitos fixos com grupos de tratamento balanceados, violar homocedasticidade tem impacto geralmente desprezível do ponto de vista da inferência estatística. O autor então expande seu argumento trazendo um exemplo de experimento com dois fatores no qual a variância não constante é menosprezada sem implicações prejudiciais às conclusões.

Sharma (1996) e Hair et al. (2005) seguem a mesma linha, tratando desta vez, porém, do caso multivariado. Mencionam que o não cumprimento da premissa afeta pouco os

resultados num contexto de grupos de mesmo tamanho (balanceados). Cabe notar que os Gráficos de 5 a 7, mesmo que comprovadamente homocedásticos (hipótese não testada formalmente), não seriam suficientes para atender à premissa contida na MANOVA. Para tanto, deve ser checada também a homocedasticidade de todos os grupos entre as variáveis dependentes. Logo adiante, será executado um teste com este fim.

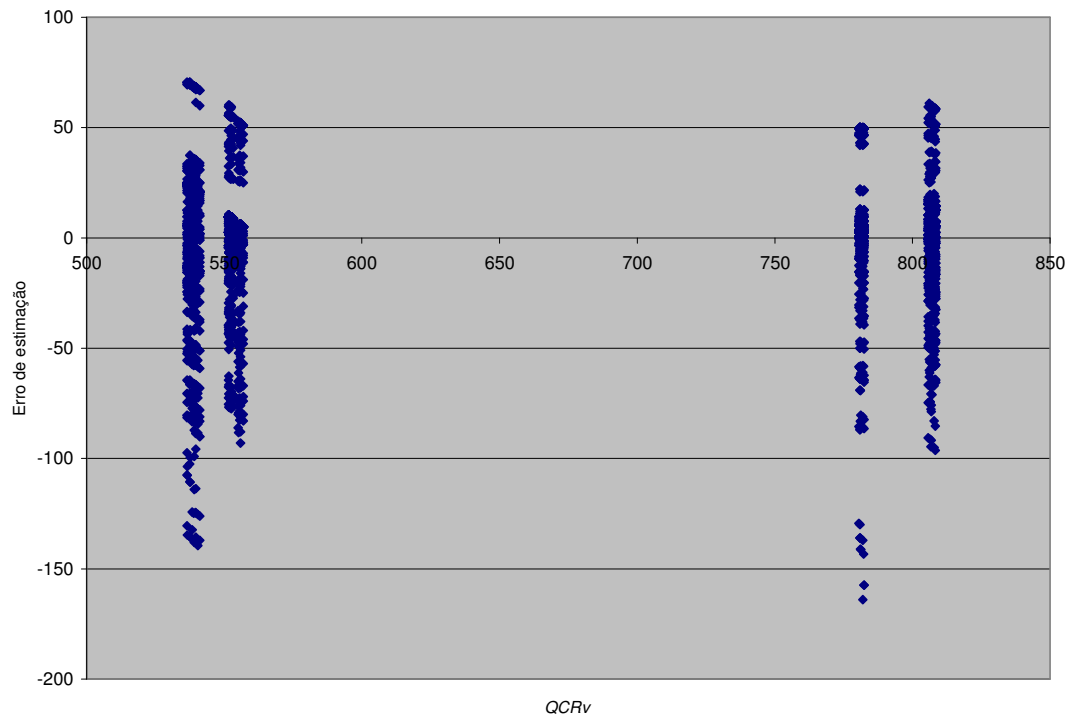


Gráfico 5 - Dispersão dos erros e_{ijklmn} em torno das respectivas médias $\bar{y}_{ijklm}$, para $QCRv$

Diante de diagnósticos univariados de normalidade não unânimes e de testes visuais de homocedasticidade satisfatórios, julgou-se prescindível efetuar transformações nas variáveis dependentes. Ainda mais no contexto atual (de amostra grande e grupos com mesmo tamanho), onde, conforme indica a literatura pertinente, os impactos do não atendimento às premissas da MANOVA são minimizados e geralmente desprezíveis. No restante da pesquisa, trabalhou-se então com o nível das mesmas. Ressalvamos, todavia, que *FRUES* foi padronizada por sua média e desvio-padrão com o único intuito de escrevê-la em uma escala mais compreensível.

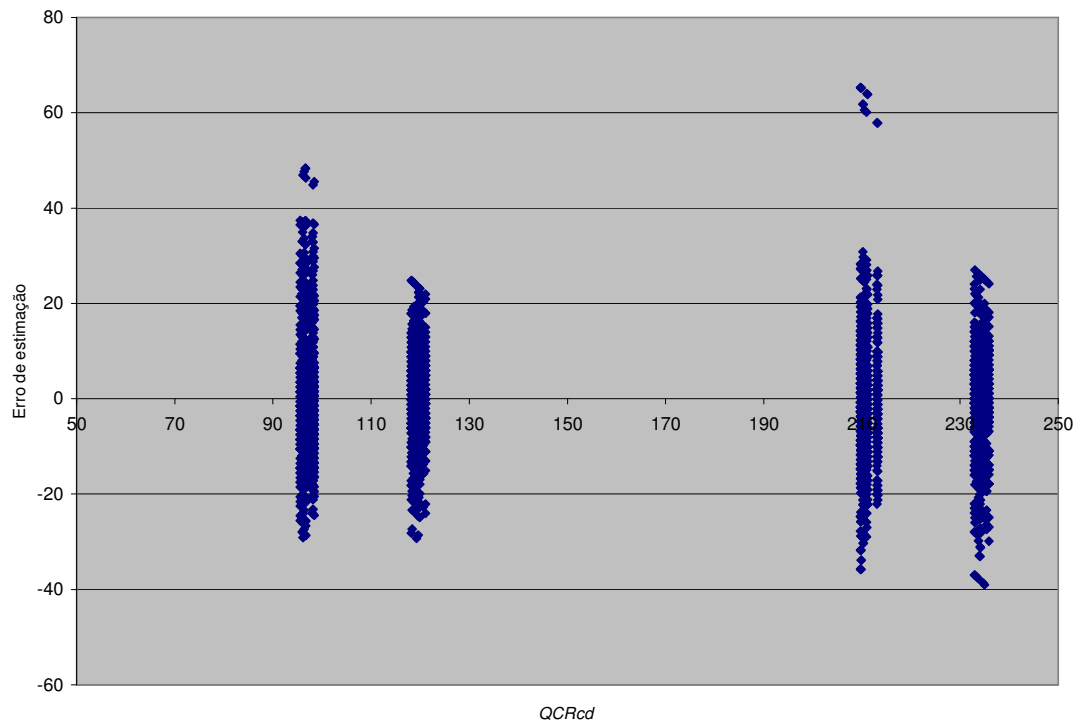


Gráfico 6 - Dispersão dos erros e_{ijklmn} em torno das respectivas médias $\bar{y}_{ijklm}$ para $QCRcd$

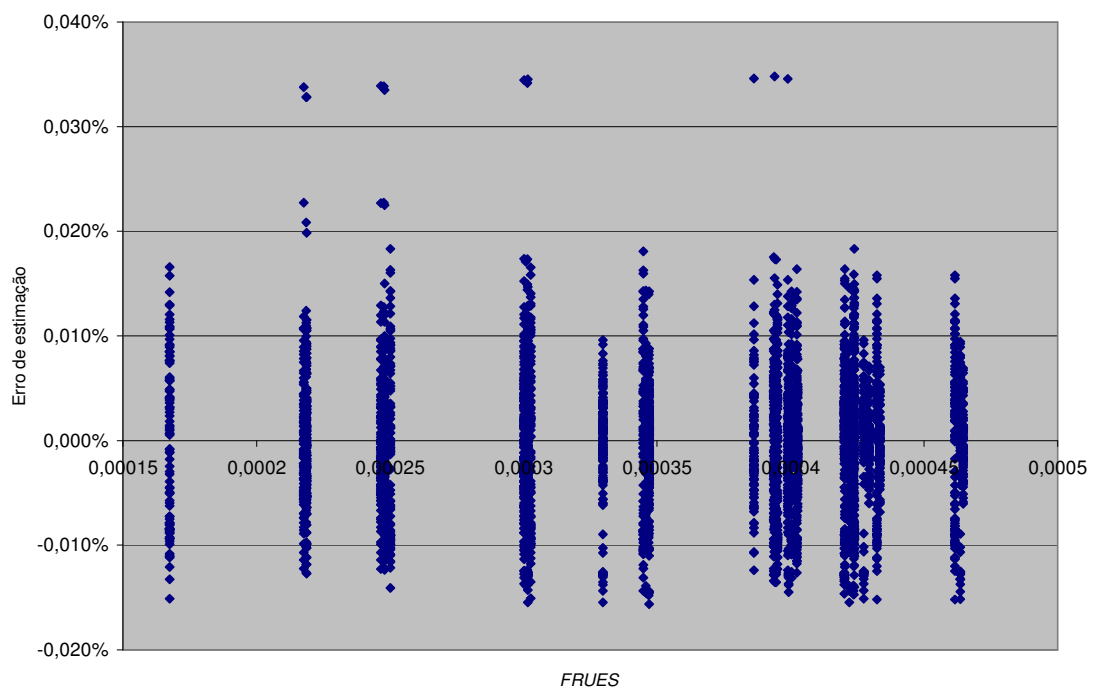


Gráfico 7 - Dispersão dos erros e_{ijklmn} em torno das respectivas médias $\bar{y}_{ijklm}$ para $FRUES$

Finalizando a análise residual de aderência às premissas da MANOVA, se examinou as matrizes de variância e covariância de todas as variáveis dependentes conjuntamente. Esse é o procedimento multivariado de avaliação da homocedasticidade ao qual nos referimos há pouco. Tal exame foi elaborado através do teste conhecido como Box's M,

cuja hipótese nula consiste na equivalência das matrizes mencionadas ao longo de todos os seus elementos (Norusis, 1988; Sharma, 1996; Hair et al., 2005).

O resultado encontrado está disposto no Quadro 15, onde se constata que a hipótese nula é rejeitada. De acordo com o que se viu na literatura sobre a metodologia estatística em foco, este resultado, apesar de indesejável, não impede a continuação do estudo. Todavia, devemos estar atentos ao fato de que quaisquer resultados futuros no limiar entre a rejeição ou não rejeição estatística estão sujeitos a imprecisões.

Box's M	2.285,04
Estatística-F	8,01
Graus de liberdade 1	282
Graus de liberdade 2	5.809.924
Significância	0,00

Quadro 15 - Teste Box's M

5.4. Análise Multivariada de Variância (MANOVA)

5.4.1. *Procedimentos multivariados*

Uma MANOVA multifatorial foi elaborada na tentativa de responder as perguntas da pesquisa. O SPSS fornece quatro estatísticas distintas para os testes multivariados no âmbito da MANOVA. São elas: Traço de Pillai, Lambda de Wilks, Traço de Hotteling e Maior Raiz de Roy. Sharma (1996) informa que todas são equivalentes para um caso de dois grupos e podem ser convertidas exatamente numa estatística-F, a qual foi apresentada na Equação 15. Ressalva, contudo, que tal argumento não é verdadeiro para situações com mais de dois grupos, onde as medidas podem ser apenas aproximadas pela estatística-F.

O citado autor recomenda a utilização do Traço de Pillai, sugerindo que este demonstra mais robustez quando sujeito a condições adversas como a de desrespeito às premissas da MANOVA. Hair et al. (2005) são outros que se referem à consistência do Traço de Pillai, mas não deixam de destacar também o Lambda de Wilks como bom critério em tais cenários. Logo, decidimos despender maior atenção a estas duas medidas.

O Quadro 16 expõe os resultados obtidos²⁵ (os efeitos que não contemplam fatores de decisão do gestor logístico foram ocultados a fim de facilitar a visualização). O ponto crítico para significância estatística foi de 5%. Todos os testes com valores menores do que esse ponto foram marcados em negrito para melhor visualização. Discordância entre os diferentes critérios ocorreu somente para a combinação *AMP*RSD*CORR*, a qual foi considerada não significativa por todos, exceto pela Maior Raiz de Roy, cuja posição foi descartada.

Uma vez que o propósito da MANOVA é testar simultaneamente a diferença entre médias das variáveis dependentes derivadas da aplicação de tratamentos distintos, disponibilizamos no Anexo II as estimativas das médias marginais e seus respectivos desvios-padrão. Aproveitamos para enfatizar que a existência de médias negativas para *FRUES* e também as médias maiores do que 1 ocorrem em função de termos padronizado esta variável. Também por este motivo, sua média geral (isto é, a média de todos os tratamentos) é zero.

Das 24 combinações possíveis envolvendo os fatores de decisão, somente 6 não apresentaram significância. O poder dos testes foi em geral bastante alto, mesmo nos casos de efeito, aqui estimado pelo Eta Quadrático Parcial (*EQP*), pequeno. Relembrando, vimos na seção 4.4.1 que quanto menor o efeito, menos trivial fica a identificação de significância. O *EQP* pode ser calculado, segundo Sharma (1996), pela seguinte equação:

$$EQP = \frac{F \cdot glh}{F \cdot glh + gle} ,$$

onde:

F é a estatística-F,

glh é o número de graus de liberdade da hipótese (graus de liberdade entre grupos),

²⁵ Visto que nosso interesse está apenas em efeitos que contemplam ao menos um dos fatores de decisão gerencial, ocultamos todos aqueles que não se encaixavam nessa condição. Os efeitos puramente ambientais, que não apresentam interação com fatores controláveis, não despertam o interesse dessa dissertação porque nada se pode fazer para influenciá-los, tornando o gerente logístico completamente impotente em relação aos mesmos.

gle é o número de graus de liberdade do erro (graus de liberdade dentro dos grupos).

Efeito	Teste	Valor	Estatística-F	Graus de liberdade da hipótese	Graus de liberdade do erro	Significância	Eta Quadrático Parcial	Poder do teste ^a
Intercepto	Traço de Pillai	1,00	1.488.129,80	3	4.750	0,00	1,00	1,00
	Lambda de Wilks	0,00	1.488.129,80	3	4.750	0,00	1,00	1,00
	Traço de Hotelling	939,87	1.488.129,80	3	4.750	0,00	1,00	1,00
	Maior Raiz de Roy	939,87	1.488.129,80	3	4.750	0,00	1,00	1,00
DIST	Traço de Pillai	0,97	51.511,96	3	4.750	0,00	0,97	1,00
	Lambda de Wilks	0,03	51.511,96	3	4.750	0,00	0,97	1,00
	Traço de Hotelling	32,53	51.511,96	3	4.750	0,00	0,97	1,00
	Maior Raiz de Roy	32,53	51.511,96	3	4.750	0,00	0,97	1,00
RSD	Traço de Pillai	0,96	33.330,48	3	4.750	0,00	0,95	1,00
	Lambda de Wilks	0,05	33.330,48	3	4.750	0,00	0,95	1,00
	Traço de Hotelling	21,05	33.330,48	3	4.750	0,00	0,95	1,00
	Maior Raiz de Roy	21,05	33.330,48	3	4.750	0,00	0,95	1,00
DIST * AMP	Traço de Pillai	0,05	84,55	3	4.750	0,00	0,05	1,00
	Lambda de Wilks	0,95	84,55	3	4.750	0,00	0,05	1,00
	Traço de Hotelling	0,05	84,55	3	4.750	0,00	0,05	1,00
	Maior Raiz de Roy	0,05	84,55	3	4.750	0,00	0,05	1,00
DIST * RSD	Traço de Pillai	0,06	92,17	3	4.750	0,00	0,06	1,00
	Lambda de Wilks	0,95	92,17	3	4.750	0,00	0,06	1,00
	Traço de Hotelling	0,06	92,17	3	4.750	0,00	0,06	1,00
	Maior Raiz de Roy	0,06	92,17	3	4.750	0,00	0,06	1,00
AMP * RSD	Traço de Pillai	0,05	74,22	3	4.750	0,00	0,04	1,00
	Lambda de Wilks	0,96	74,22	3	4.750	0,00	0,04	1,00
	Traço de Hotelling	0,05	74,22	3	4.750	0,00	0,04	1,00
	Maior Raiz de Roy	0,05	74,22	3	4.750	0,00	0,04	1,00
DIST * MAGN	Traço de Pillai	0,02	24,23	3	4.750	0,00	0,02	1,00
	Lambda de Wilks	0,99	24,23	3	4.750	0,00	0,02	1,00
	Traço de Hotelling	0,02	24,23	3	4.750	0,00	0,02	1,00
	Maior Raiz de Roy	0,02	24,23	3	4.750	0,00	0,02	1,00
RSD * MAGN	Traço de Pillai	0,00	0,51	3	4.750	0,68	0,00	0,16
	Lambda de Wilks	1,00	0,51	3	4.750	0,68	0,00	0,16
	Traço de Hotelling	0,00	0,51	3	4.750	0,68	0,00	0,16
	Maior Raiz de Roy	0,00	0,51	3	4.750	0,68	0,00	0,16
DIST * CORR	Traço de Pillai	0,22	199,68	6	9.502	0,00	0,11	1,00
	Lambda de Wilks	0,78	213,97	6	9.500	0,00	0,12	1,00
	Traço de Hotelling	0,29	228,38	6	9.498	0,00	0,13	1,00
	Maior Raiz de Roy	0,29	456,91	3	4.751	0,00	0,22	1,00
RSD * CORR	Traço de Pillai	0,01	8,09	6	9.502	0,00	0,01	1,00
	Lambda de Wilks	0,99	8,11	6	9.500	0,00	0,01	1,00
	Traço de Hotelling	0,01	8,13	6	9.498	0,00	0,01	1,00
	Maior Raiz de Roy	0,01	16,18	3	4.751	0,00	0,01	1,00
DIST * AMP * RSD	Traço de Pillai	0,02	34,77	3	4.750	0,00	0,02	1,00
	Lambda de Wilks	0,98	34,77	3	4.750	0,00	0,02	1,00
	Traço de Hotelling	0,02	34,77	3	4.750	0,00	0,02	1,00
	Maior Raiz de Roy	0,02	34,77	3	4.750	0,00	0,02	1,00
DIST * AMP * MAGN	Traço de Pillai	0,01	8,15	3	4.750	0,00	0,01	0,99
	Lambda de Wilks	1,00	8,15	3	4.750	0,00	0,01	0,99
	Traço de Hotelling	0,01	8,15	3	4.750	0,00	0,01	0,99
	Maior Raiz de Roy	0,01	8,15	3	4.750	0,00	0,01	0,99
DIST * RSD * MAGN	Traço de Pillai	0,01	21,99	3	4.750	0,00	0,01	1,00
	Lambda de Wilks	0,99	21,99	3	4.750	0,00	0,01	1,00
	Traço de Hotelling	0,01	21,99	3	4.750	0,00	0,01	1,00
	Maior Raiz de Roy	0,01	21,99	3	4.750	0,00	0,01	1,00

Efeito	Teste	Valor	Estatística-F	Graus de liberdade da hipótese	Graus de liberdade do erro	Significância	Eta Quadrático Parcial	Poder do teste ^a
AMP * RSD * MAGN	Traço de Pillai	0,01	10,00	3	4.750	0,00	0,01	1,00
	Lambda de Wilks	0,99	10,00	3	4.750	0,00	0,01	1,00
	Traço de Hotelling	0,01	10,00	3	4.750	0,00	0,01	1,00
	Maior Raiz de Roy	0,01	10,00	3	4.750	0,00	0,01	1,00
DIST * AMP * CORR	Traço de Pillai	0,01	3,99	6	9.502	0,00	0,00	0,97
	Lambda de Wilks	1,00	4,00	6	9.500	0,00	0,00	0,97
	Traço de Hotelling	0,01	4,00	6	9.498	0,00	0,00	0,97
	Maior Raiz de Roy	0,01	7,97	3	4.751	0,00	0,01	0,99
DIST * RSD * CORR	Traço de Pillai	0,01	9,06	6	9.502	0,00	0,01	1,00
	Lambda de Wilks	0,99	9,08	6	9.500	0,00	0,01	1,00
	Traço de Hotelling	0,01	9,10	6	9.498	0,00	0,01	1,00
	Maior Raiz de Roy	0,01	18,19	3	4.751	0,00	0,01	1,00
AMP * RSD * CORR	Traço de Pillai	0,00	1,37	6	9.502	0,22	0,00	0,54
	Lambda de Wilks	1,00	1,37	6	9.500	0,22	0,00	0,54
	Traço de Hotelling	0,00	1,37	6	9.498	0,22	0,00	0,54
	Maior Raiz de Roy	0,00	2,74	3	4.751	0,04	0,00	0,67
DIST * MAGN * CORR	Traço de Pillai	0,01	4,51	6	9.502	0,00	0,00	0,99
	Lambda de Wilks	0,99	4,52	6	9.500	0,00	0,00	0,99
	Traço de Hotelling	0,01	4,52	6	9.498	0,00	0,00	0,99
	Maior Raiz de Roy	0,01	9,04	3	4.751	0,00	0,01	1,00
RSD * MAGN * CORR	Traço de Pillai	0,01	7,55	6	9.502	0,00	0,00	1,00
	Lambda de Wilks	0,99	7,57	6	9.500	0,00	0,00	1,00
	Traço de Hotelling	0,01	7,59	6	9.498	0,00	0,00	1,00
	Maior Raiz de Roy	0,01	15,15	3	4.751	0,00	0,01	1,00
DIST * AMP * RSD * MAGN	Traço de Pillai	0,01	12,87	3	4.750	0,00	0,01	1,00
	Lambda de Wilks	0,99	12,87	3	4.750	0,00	0,01	1,00
	Traço de Hotelling	0,01	12,87	3	4.750	0,00	0,01	1,00
	Maior Raiz de Roy	0,01	12,87	3	4.750	0,00	0,01	1,00
DIST * AMP * RSD * CORR	Traço de Pillai	0,00	0,79	6	9.502	0,58	0,00	0,32
	Lambda de Wilks	1,00	0,79	6	9.500	0,58	0,00	0,32
	Traço de Hotelling	0,00	0,79	6	9.498	0,58	0,00	0,32
	Maior Raiz de Roy	0,00	1,57	3	4.751	0,20	0,00	0,42
DIST * AMP * MAGN * CORR	Traço de Pillai	0,00	0,72	6	9.502	0,63	0,00	0,29
	Lambda de Wilks	1,00	0,72	6	9.500	0,63	0,00	0,29
	Traço de Hotelling	0,00	0,72	6	9.498	0,63	0,00	0,29
	Maior Raiz de Roy	0,00	1,44	3	4.751	0,23	0,00	0,38
DIST * RSD * MAGN * CORR	Traço de Pillai	0,01	6,36	6	9.502	0,00	0,00	1,00
	Lambda de Wilks	0,99	6,37	6	9.500	0,00	0,00	1,00
	Traço de Hotelling	0,01	6,38	6	9.498	0,00	0,00	1,00
	Maior Raiz de Roy	0,01	12,75	3	4.751	0,00	0,01	1,00
AMP * RSD * MAGN * CORR	Traço de Pillai	0,00	0,36	6	9.502	0,91	0,00	0,15
	Lambda de Wilks	1,00	0,36	6	9.500	0,91	0,00	0,15
	Traço de Hotelling	0,00	0,36	6	9.498	0,91	0,00	0,15
	Maior Raiz de Roy	0,00	0,69	3	4.751	0,56	0,00	0,20
DIST * AMP * RSD * MAGN * CORR	Traço de Pillai	0,00	0,53	6	9.502	0,79	0,00	0,22
	Lambda de Wilks	1,00	0,53	6	9.500	0,79	0,00	0,22
	Traço de Hotelling	0,00	0,53	6	9.498	0,79	0,00	0,22
	Maior Raiz de Roy	0,00	1,05	3	4.751	0,37	0,00	0,29

^a Computado com base em $\alpha = 0,05$

Quadro 16 - Resultados da MANOVA

A interação de quinta ordem, isto é, entre todos os cinco fatores, não se mostrou significativa. Três das cinco interações de quarta ordem existentes também estão nesta

posição. Com relação aos efeitos de terceira ordem, assim como os de segunda, apenas um não é significativo em cada caso. Quando focalizamos individualmente os fatores, porém, vemos que todos apresentaram significância estatística.

Tal evidência é um achado bastante confortante para o gestor logístico. A ordem tipicamente reduzida dos efeitos significativos (que envolvem fatores sob seu controle) facilita seu trabalho de planejamento e tomada de decisão.

Conforme visto na seção 4.4, a MANOVA controla adequadamente o Erro do Tipo I e por isso sua aplicação traz mais segurança do que testes univariados no momento de dizer se há diferença significativa entre sistemas descritos por mais de uma variável dependente. Entretanto, vimos também que ela não é capaz de dizer qual ou quais variáveis dependentes são responsáveis pelas diferenças. Tendo a MANOVA atestado diferença estatística, cabe então a elaboração de testes univariados para fazer a separação dos efeitos por variável dependente (Sharma, 1996; Hair et al., 2005).

5.4.2. Procedimentos univariados

Nesta seção, damos continuidade ao escrutínio dos dados de saída da simulação através de testes univariados. O objetivo é descobrir de que maneira as variáveis dependentes contribuem para a diferença entre os vetores de médias, além de descobrir como atuam os diferentes tratamentos em cada uma das variáveis (o que é feito através de testes de hipótese sobre as médias marginais dos tratamentos). Apresentamos primeiramente os resultados de *QCRcd* e *QCRv*, de análise mais simples, para posteriormente discutir *FRUES*.

Acrescentamos que para os trabalhos aqui elaborados, foi estabelecido um ponto de corte a partir do Eta Quadrático Parcial (*EQP*) a fim de definir o que valia a pena ser investigado sob uma ótica de custo benefício, ou seja, o que tinha efeito realmente relevante. O critério utilizado foi $EQP > 0,01$.

5.4.2.1. A variável QCR_v

A rodada de ANOVA para QCR_v atesta que a mesma tem apenas três efeitos significativos, os quais são formados por apenas dois dos fatores incluídos na pesquisa (vide Quadro 17). Para melhor organizar a informação e facilitar o entendimento, ocultamos as combinações de fatores consideradas não significativas sob o rigor estatístico. Adicionalmente, marcamos em negrito os efeitos fatoriais com $EQP > 0,01$.

Os únicos dois fatores de efeito significativo são curiosa e felizmente os fatores sob controle do gestor logístico e atuam praticamente de maneira independente, visto o EQP insignificante do termo de interação. Esse resultado sugere que, uma vez conhecidas as médias de demanda dos mercados atendidos e de tempos de transporte entre elos, deve haver boa previsibilidade sobre os custos de transporte de longo prazo ligados a distribuição, não importando muito as características da demanda (em termos de variabilidade e movimento conjunto dos mercados), nem tampouco a variabilidade dos tempos de resposta.

Efeito	Estatística-F	Significância	Eta Quadrático Parcial	Poder do teste ^a
Intercepto	2.748.712,22	0,00	0,99	1,00
<i>RSD</i>	93.999,08	0,00	0,95	1,00
<i>DIST</i>	636,74	0,00	0,12	1,00
<i>DIST * RSD</i>	40,46	0,00	0,01	1,00

^a Computado com base em $\alpha = 0,05$

Quadro 17 - Resultados da ANOVA para QCR_v

Os Gráficos 8 e 9 apresentam as médias marginais estimadas para QCR_v em relação aos fatores *DIST* e *RSD*, respectivamente, e permitem concluir, pela distância entre os níveis de cada um desses fatores, que o impacto individual de *DIST* é o menos intenso, o que o EQP do Quadro 17 já informava.

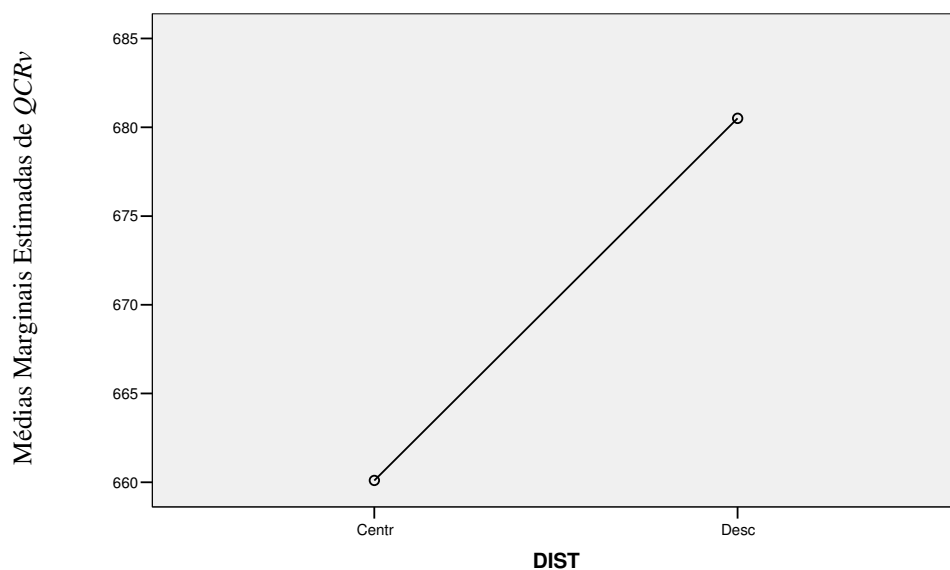


Gráfico 8 – Efeito principal de $DIST$ em QCR_v

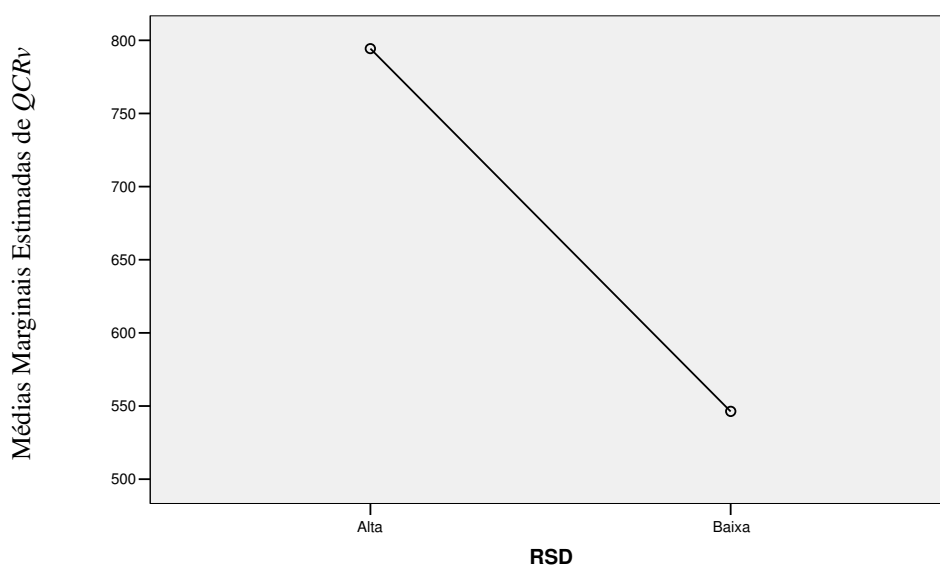


Gráfico 9 - Efeito principal de RSD em QCR_v

O maior número de carregamentos ao varejo na distribuição descentralizada decorre da menor disponibilidade média de produtos que apresenta nos armazéns quando comparada à centralizada. Havendo mais ocorrências de falta nos armazéns, conseqüentemente, efetua-se um número maior de envios parciais de mercadorias ao varejo.

Por sua vez, a existência de um valor de QCR_v maior em RSD alta do que em RSD baixa é fruto do maior número de ciclos de pedidos de reposição na primeira ocasião, decorrente da menor distância entre varejo e centro de distribuição.

5.4.2.2. A variável QCR_{cd}

Somente quatro efeitos apresentaram influência estatisticamente significativa sobre a variável dependente QCR_{cd} , conforme demonstrado no Quadro 18. Novamente, visando melhorar a qualidade da visualização, ocultamos os efeitos não significativos estatisticamente e destacamos em negrito aqueles de relevância prática.

Os efeitos principais que merecem alguma discussão estão ilustrados nos Gráficos 10 e 11. Vale notar desde já que, assim como ocorreu com QCR_v , temos que os fatores de real relevância são apenas $DIST$ e RSD , os dois fatores de decisão do gestor logístico. Tira-se daí que a estratégia é o fator fundamental no planejamento de redes, e não o impacto do ambiente externo, quando se toma como variável de análise o custo do transporte (seja de suprimento ou de distribuição). As oscilações em torno da média na demanda e no tempo de resposta pouco ou nada importam. O que realmente importa são as próprias médias. É com esses parâmetros que o gestor logístico tem que se preocupar para definir estrutura e localização das instalações na rede.

Efeito	Estatística-F	Significância	Eta Quadrático Parcial	Poder do teste ^a
Intercepto	978.244,37	0,00	1,00	1,00
<i>DIST</i>	116.923,24	0,00	0,96	1,00
<i>RSD</i>	4.726,29	0,00	0,50	1,00
<i>MAGN</i>	11,32	0,00	0,00	0,92
<i>DIST * AMP * RSD</i>	4,40	0,04	0,00	0,55

^a Computado com base em $\alpha = 0,05$

Quadro 18 - Resultados da ANOVA para QCR_{cd}

Esse resultado traz total suporte às premissas de tempo de resposta e demanda constantes comumente empregadas em estudos de redes que buscam otimizar exclusivamente custos de transporte e de instalações através de programação matemática. Embora irrealistas, tais premissas trazem simplicidade aos modelos sem que isso implique em conclusões enganosas.

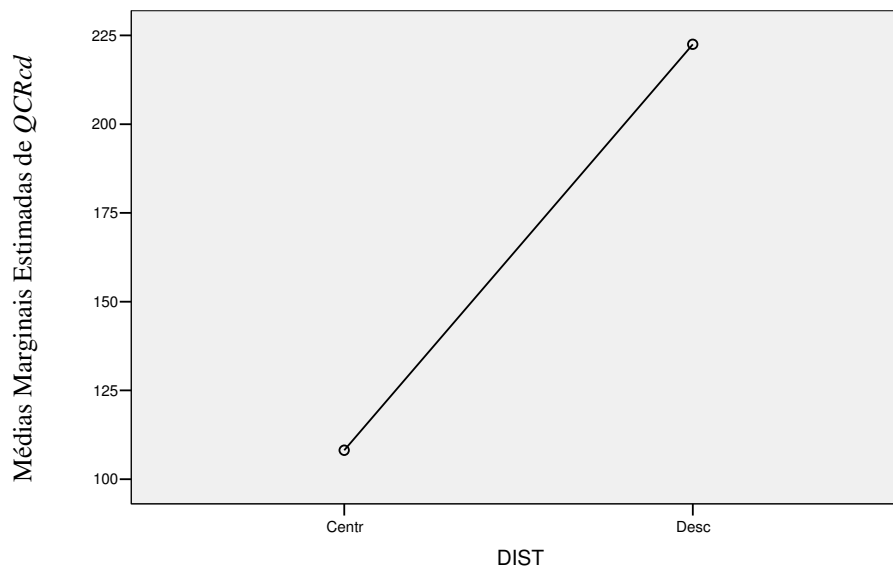


Gráfico 10 - Efeito principal de $DIST$ em $QCRcd$

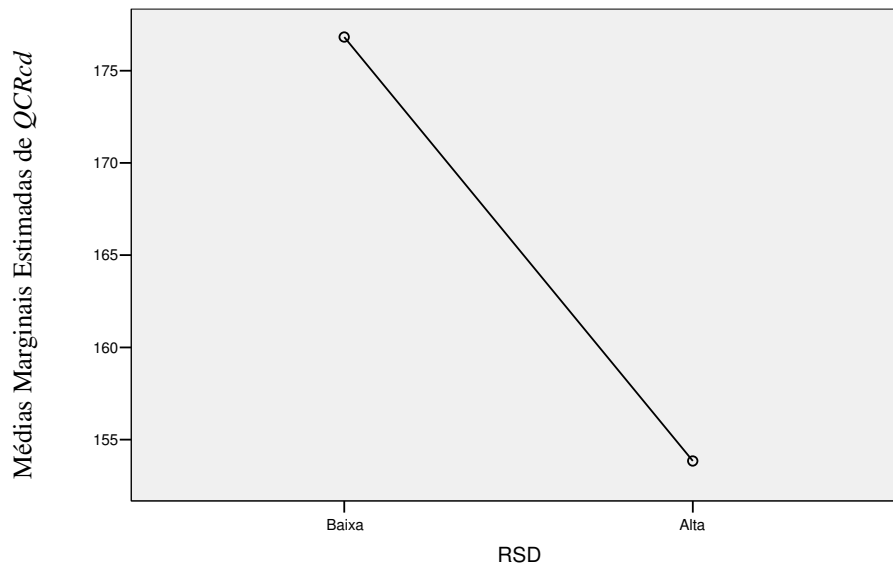


Gráfico 11 - Efeito principal de RSD em $QCRcd$

O Gráfico 10 mostra $QCRcd$ menor, na média, para o caso centralizado. Essa é uma relação absolutamente dentro das expectativas, visto que essa estrutura de distribuição possibilita a consolidação de cargas. De fato, percebe-se que, na média, o número de carregamentos recebidos pelo armazém no sistema centralizado é aproximadamente a metade do que se observa para o sistema descentralizado. Fruto de um ponto de pedido no armazém centralizado que é igual ao dobro do ponto de pedido de um armazém descentralizado.

O raciocínio para o efeito principal de *RSD* em *QCRcd* (vide Gráfico 11) é o seguinte. Quando tal fator encontra-se num nível alto, a distância entre a fábrica e o elo em referência alarga, exigindo a retenção de maiores estoques de ciclo e causando, conseqüentemente, uma redução no número de recebimentos de carregamentos.

5.4.2.3. A variável *FRUES*

FRUES trouxe à análise uma complexidade maior do que as demais variáveis dependentes em virtude de sofrer impacto significativo não só de fatores individuais, mas também de interações de segunda e terceira ordem. Certamente, da mesma forma que traz complexidade a este trabalho, também traz complexidade aos gestores logísticos que necessitam incorporar os custos de falta e excesso em seu processo de planejamento da rede. Por poder auxiliá-los nessa difícil tarefa, a discussão aqui apresentada torna-se particularmente relevante.

O Quadro 19 apresenta os resultados da ANOVA destacando em negrito os efeitos com $EQP > 0,01$. Mais uma vez, para facilitar a visualização, estão expostos somente os efeitos significantes a 5%. Foram excluídos também do Quadro 19 todos os efeitos que não continham interferência dos fatores sob controle do gestor logístico.

Apesar de *DIST* ter apresentado efeito principal significativo, sua análise se torna realmente interessante em conjunto com outros fatores e, portanto, será deixada para mais adiante.

Tomemos então os movimentos em *RSD* como foco de análise. Na média, um nível baixo para este fator traz maiores valores para *FRUES* do que um nível alto. Suporte para essa afirmação é demonstrado no Gráfico 12. Ressaltamos que tal resultado é análogo ao encontrado por Wanke et al. (2006). Neste artigo, foram comparadas, através de simulação computacional, as seguintes estruturas de distribuição ao varejo: direta (a partir da fábrica) contra escalonada (a partir de um centro de distribuição intermediário na cadeia). Constatou-se que a direta oferecia maior nível de serviço por apresentar menor número de ciclo de pedidos no ponto de venda, assim como acontece com *RSD* baixa.

Efeito	Estatística-F	Significância	Eta Quadrático Parcial	Poder do teste ^a
Intercepto	0,00	1,00	0,00	0,05
<i>DIST</i>	858,83	0,00	0,15	1,00
<i>RSD</i>	779,37	0,00	0,14	1,00
<i>DIST * AMP</i>	223,08	0,00	0,04	1,00
<i>DIST * RSD</i>	177,03	0,00	0,04	1,00
<i>RSD * AMP</i>	21,31	0,00	0,01	1,00
<i>DIST * MAGN</i>	20,38	0,00	0,00	1,00
<i>DIST * CORR</i>	556,02	0,00	0,19	1,00
<i>RSD * CORR</i>	20,70	0,00	0,01	1,00
<i>DIST * RSD * AMP</i>	15,65	0,00	0,01	1,00
<i>DIST * AMP * MAGN</i>	20,52	0,00	0,00	0,99
<i>DIST * RSD * MAGN</i>	13,46	0,00	0,00	0,95
<i>AMP * RSD * MAGN</i>	22,85	0,00	0,01	0,96
<i>DIST * AMP * CORR</i>	8,60	0,00	0,00	0,97
<i>DIST * RSD * CORR</i>	23,31	0,00	0,01	1,00
<i>RSD * AMP * CORR</i>	3,32	0,04	0,00	0,63
<i>DIST * MAGN * CORR</i>	10,09	0,00	0,00	0,99
<i>RSD * MAGN * CORR</i>	19,53	0,00	0,01	1,00
<i>DIST * RSD * AMP * MAGN</i>	32,74	0,00	0,01	1,00
<i>DIST * RSD * MAGN * CORR</i>	16,39	0,00	0,01	1,00

^a Computado com base em $\alpha = 0,05$

Quadro 19 - Resultados da ANOVA para *FRUES*

Conforme exposto na subseção 2.1.1, Wanke (2003a) menciona que a “premissa da presença local” vem sendo reavaliada pelas empresas distribuidoras porque os serviços de transporte se tornaram mais confiáveis, logo, permitindo atender seus clientes com adequado nível de serviço mesmo a maiores distâncias.

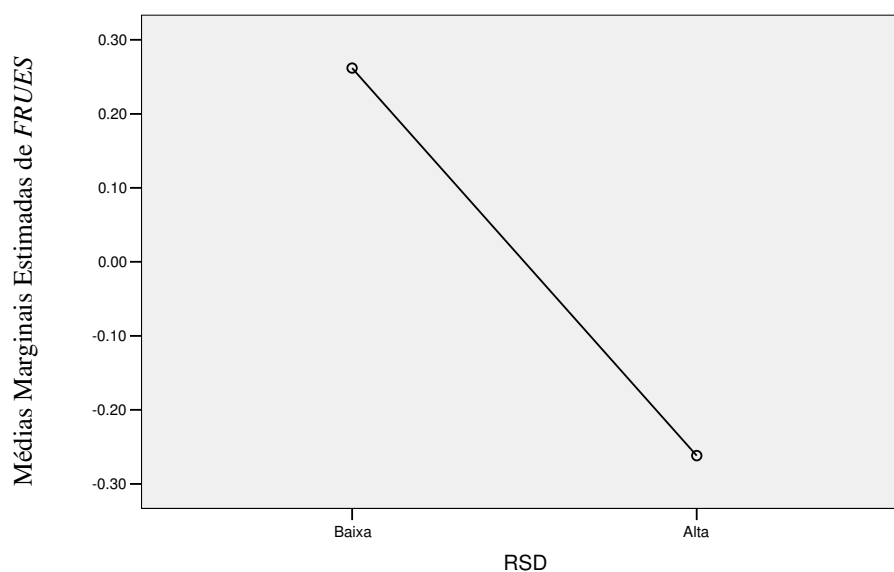


Gráfico 12 - Efeito principal de *RSD* em *FRUES*

Recordando, o tempo de trânsito desde os centros de distribuição até a ponta varejista foi modelado nesta dissertação como sendo plenamente previsível, compatível com a afirmação de Wanke (2003a). Deve ser observado, todavia, que embora a passagem de *RSD* alta para baixa tenha mostrado melhoria em *FRUES*, tal resultado é derivado do aumento no estoque de ciclo arcado pelo varejo.

Numa empresa com distribuição e venda integrada, não há muito o que pensar: avançar o centro de distribuição na cadeia não vale a pena, em média, sob as condições aqui testadas. Por outro lado, quando distribuidor e varejista forem pessoas separadas, a decisão do distribuidor de afastar seu centro de distribuição do local do varejista pode trazer à tona conflitos entre os dois. Por ter que carregar maiores níveis de estoque de ciclo, o varejista pode exigir compensações do distribuidor, como, por exemplo, redução nos preços dos produtos adquiridos, mesmo experimentando aumento no nível de serviço a um mesmo custo de carregamento do estoque de segurança.

Passando agora à análise de efeitos de ordem superior, investigamos, em primeiro lugar, uma interação de especial interesse, inclusive pelo fato de a literatura trazer evidências que seu impacto é bastante relevante. Trata-se da interação entre *DIST* e *CORR*. Os resultados confirmam as expectativas e estão em linha com a teoria do *Portfolio Effect*. Muito embora esta teoria foque, em geral, os impactos da centralização no nível de serviço de um elo específico, em contraposição ao nosso estudo, onde a centralização é feita no elo intermediário e a medida de desempenho de serviço é tomada no elo final da cadeia, os resultados são comparáveis.

O Gráfico 13 mostra claramente que a decisão sobre a estrutura de distribuição tem, na média, efeito de extrema importância segundo o cenário de correlação. Sendo esse fator nulo ou positivo, centralizar promove forte melhoria na eficiência da empresa, ressaltando que as médias desses níveis são diferentes entre si estatisticamente. A decisão de descentralizar, como seria de se esperar, não muda de acordo com o cenário de correlação, porque não há como haver compensações entre estoques fisicamente separados. Armazéns descentralizados devem estar preparados para atender isoladamente suas demandas, não havendo nenhuma relação com outros armazéns no sistema.

Quando a correlação for positiva, por outro lado, será melhor descentralizar. Esse último resultado é estatisticamente significativo e não condiz com aquele identificado por Zinn, Levy e Bowersox (1989). No trabalho desses autores, num ambiente de correlação positiva alta como é o do nosso experimento, a centralização ainda seria mais vantajosa, sendo equivalente à descentralização somente na pior das hipóteses, ou seja, quando a correlação se igualasse a 1. O resultado aqui encontrado será melhor explorado adiante, quando apresentaremos outras evidências que permitem explicá-lo com maior segurança.

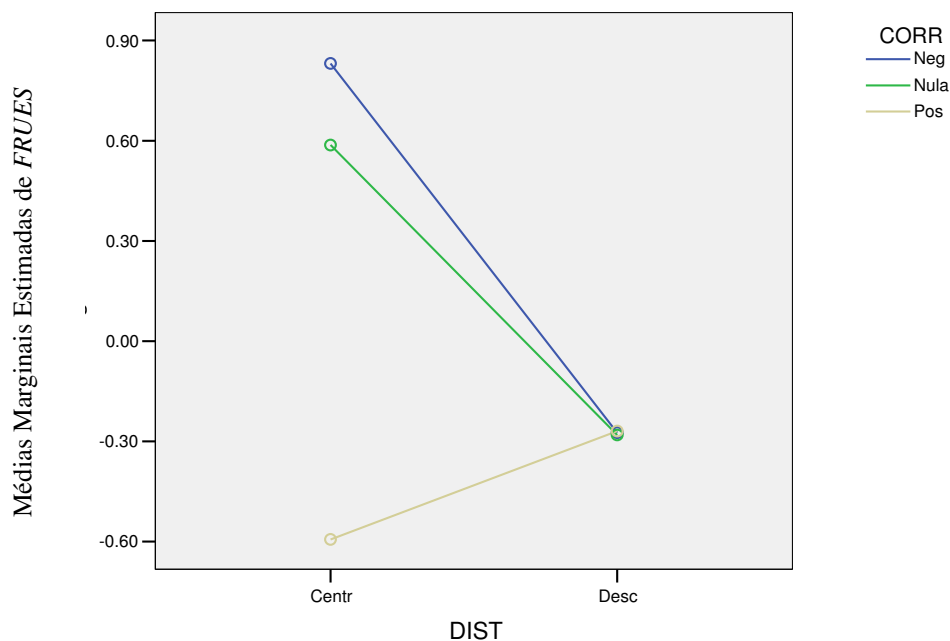


Gráfico 13 - Efeito da interação entre *DIST* e *CORR* em *FRUES*

A interação entre *DIST* e *RSD* (os dois fatores sob controle do gestor logístico), ilustrada no Gráfico 14, também se mostrou significativa e coerente com a bibliografia. Isso significa que uma decisão conjunta sobre esses fatores tem efeito diferente do que a simples soma de seus efeitos individuais, logo, o gestor logístico deve estar atento a isso.

Conforme já dito, na média, *RSD* alta é pior do que *RSD* baixa. Porém, tal efeito é ainda mais exacerbado quando se está num sistema descentralizado, o que é evidente pelo não paralelismo das retas no Gráfico 14. Esse fenômeno foi levantado por Caron e Marchet (1996) quando mostraram que valores maiores para sua variável denominada *pt* (análoga ao fator *RSD*) favoreciam a escolha pela centralização. A centralização é favorecida com *pt* (ou *RSD*) alta porque, quando o tempo entre a fábrica e armazém

aumenta em relação ao tempo da segunda perna da cadeia, se intensifica o potencial de aproveitamento de compensações entre movimentos inversos nas demandas dos varejos.

Cabe frisar que nossa modelagem e a dos mencionados autores são similares em diversos pontos, visto que reproduzimos grande parte de suas premissas, explicita-se: (a) a quantidade de elos na cadeia; (b) a política de origens e destinos de produtos, inclusive a política de não-transferência de estoques entre varejos; (c) a normalidade da demanda; (d) a inexistência de autocorrelação temporal da mesma; (e) a equivalência dos tempos de reposição dos varejos; (f) a natureza determinística deste tempo; (g) a equivalência do fator k de estoque de segurança entre os varejos (igual a zero na corrente dissertação); (h) a agregação negligenciável de valor ao produto desde o armazém até o varejo e; (i) no cenário específico de baixa *MAGN*, respeitamos também a homogeneidade de variâncias das demandas dos diferentes mercados.

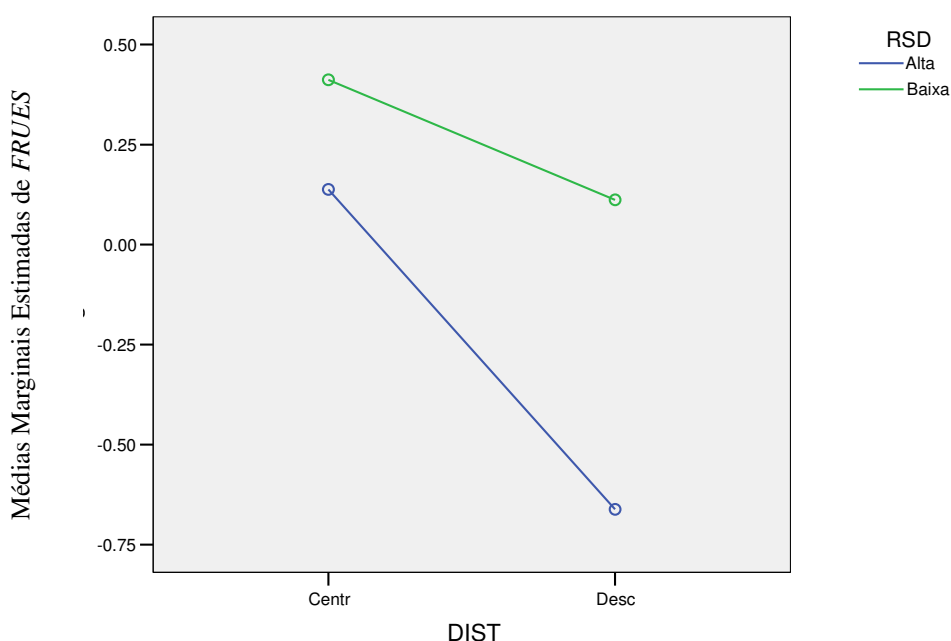


Gráfico 14 - Efeito da interação entre *DIST* e *RSD* em *FRUES*

No entanto, algumas divergências estão presentes, dentre as quais citamos duas consideradas mais importantes. A primeira é relacionada à variável dependente. No trabalho da dupla, a mesma (R) tratava apenas os estoques de segurança, os quais não foram modelados aqui. Isto não inviabiliza, porém, a comparação entre *FRUES* e R , visto que a análise da eficiência da centralização pode ser medida mantendo-se a

disponibilidade de produto constante e variando o estoque de segurança ou fazendo-se o inverso (os efeitos da ausência de estoque de segurança são sentidos em valores mais baixos de *FRUES*). O que torna as duas realmente singulares é que *FRUES* agrega informações sobre os estoques de trânsito e de ciclo.

A segunda divergência é que a modelagem do artigo em questão leva em conta tempo de reabastecimento determinístico, ao passo que ele é representado de modo estocástico no nosso trabalho. Sendo assim, podemos dizer que o trabalho corrente introduz novidades ao problema colocado por Caron e Marchet (1996) e o testa empiricamente num novo ambiente, mais amplo e realista, sugerindo que a contribuição oferecida pela dupla é bastante robusta.

Terminada a análise acima, resta somente a interação *DIST*AMP* para concluir os efeitos de segunda ordem significativos. Entretanto, pelo fato de a mesma se inserir muito bem para explicar uma conclusão que apresentamos mais a frente, deixaremos sua investigação para depois, passando agora a nos aprofundar sobre os efeitos significativos de terceira ordem.

Havíamos notado anteriormente que os resultados da interação entre *DIST* e *CORR* para um nível de correlação positiva alta não estavam compatíveis com os apresentados por Zinn, Levy e Bowersox (1989). Lançar o olhar sobre a interação de terceira ordem *DIST*RSD*CORR* permite extrair evidências adicionais que explicam esse achado. Os Gráficos 15 e 16 mostram a relação entre esses fatores num contexto de *RSD* baixa e alta, respectivamente.

A diferença entre centralizar e descentralizar sob *CORR* positiva é significativa a 5% em ambos os cenários de *RSD*. O que está em jogo conferindo vantagem à descentralização é atributo seu capaz de ser revelado provavelmente apenas através da simulação, a qual, conforme defendido na literatura: oferece mais flexibilidade do que as fórmulas derivadas analiticamente (Wagner, 1969; Moskowitz e Wright, 1979; Banks e Carson II, 1984). Foi justamente simulação a técnica de pesquisa operacional utilizada por Evers (1997), quando alegou pioneiramente que armazéns descentralizados teriam a propriedade de balancear o risco do tempo de reabastecimento.

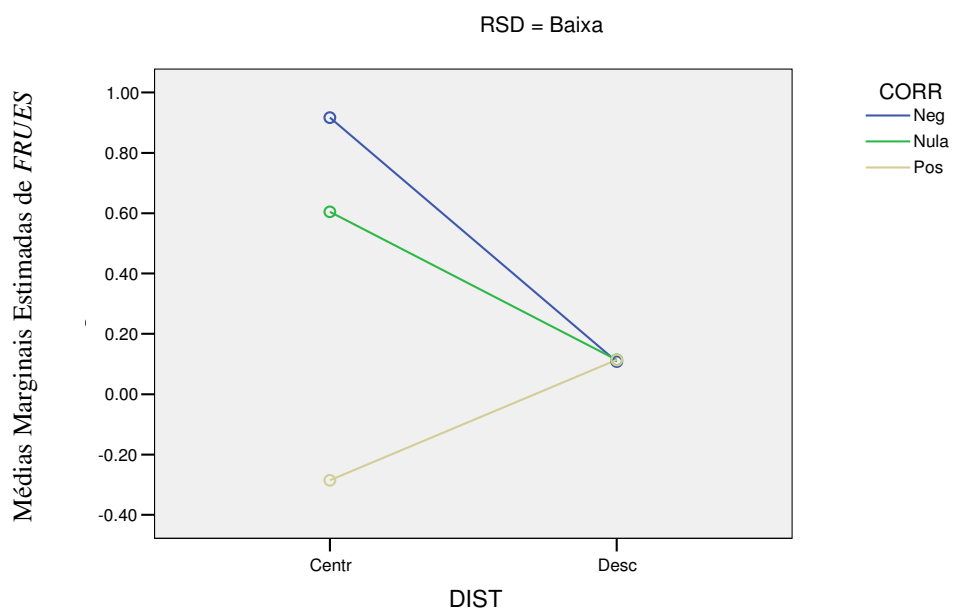


Gráfico 15 - Efeito da interação entre *DIST* e *CORR* em *FRUES* num contexto de *RSD* baixa

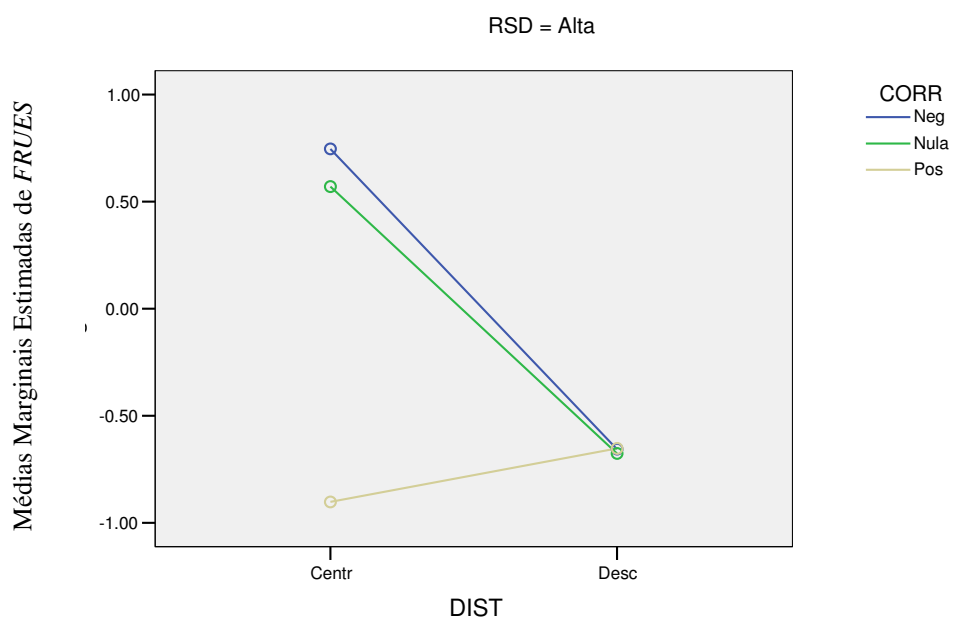


Gráfico 16 -Efeito da interação entre *DIST* e *CORR* em *FRUES* num contexto de *RSD* alta

A lógica subjacente a essa alegação é que, na estrutura centralizada, ocorrendo um atraso na entrega de um pedido ao centro de distribuição, todo o sistema é afetado, ao passo que no caso descentralizado somente um mercado fica comprometido. De acordo com Evers (1997), este atributo reproduz naturalmente os efeitos da técnica de separação de pedidos. De fato, a separação de pedidos é nítida. Num sistema de

estoques como o ora modelado, cada armazém descentralizado coloca um pedido que é igual à metade do tamanho do pedido centralizado.

A evidência que efetivamente suporta este argumento para o nosso estudo é que a superioridade da descentralização é bem mais expressiva quando *RSD* é baixa. Uma vez que modelamos a primeira perna da cadeia com tempo estocástico, distanciar o armazém do varejo (e, conseqüentemente, aproximá-lo da fábrica) aumenta o número de ciclos de suprimentos, logo, permitindo que haja mais chances de ruptura de estoque no centro de distribuição em função de atrasos no recebimento dos pedidos de reabastecimento. Num contexto assim, a descentralização, com o potencial que tem de mitigar o impacto de atrasos ao sistema, é ainda mais favorecida em relação à centralização, que não possui tal característica.

Outro resultado que termina por confirmar esse atributo da descentralização deriva-se do Gráfico 17, onde é apresentado o efeito da interação entre *DIST* e *AMP*. Nele, vemos que a diferença prejudicial em *FRUES* gerada por um aumento de amplitude é levemente maior para a estrutura centralizada do que para sua alternativa. Assim se esperaria, pois a natural separação de pedidos da descentralização atua no sentido de mitigar atrasos mais prolongados decorrentes do aumento de *AMP*.

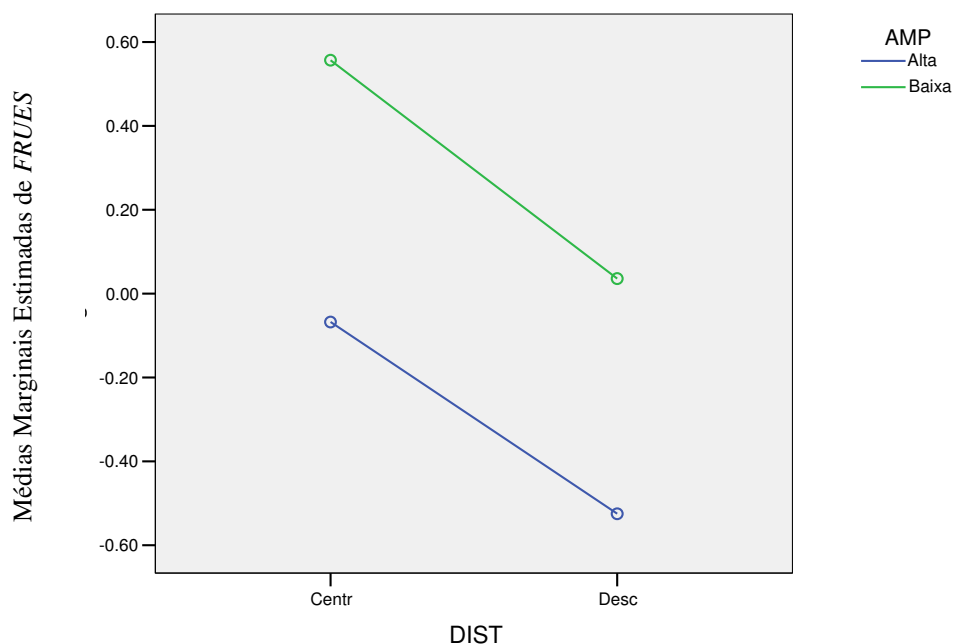


Gráfico 17 - Efeito da interação entre *DIST* e *AMP* em *FRUES*

Em desenhos como o proposto no artigo de Evers (1993), o desempenho da estrutura descentralizada em termos de nível de serviço tende a ser superior ao observado no nosso, pelo motivo de o autor ter admitido transferências entre os centros de distribuição e mais, por tais transferências ocorrerem instantaneamente em seu modelo. É inclusive por isto que encontrou indicador na média melhor para a descentralização até mesmo num ambiente de correlação nula.

Nossos achados reforçam, portanto, essa propriedade da descentralização e traz evidência de que a intensidade de seu efeito é relevante mesmo na ausência de transferências laterais. Outrossim, é relevante num contexto de elos múltiplos. Os resultados de nosso modelo estão, todavia, sujeitos à ausência de correlação entre os atrasos ocorridos para atendimento dos pedidos feitos pelas instalações descentralizadas, premissa que vimos ser criticada por Thomas e Tyworth (2006) para o caso de múltiplas fontes vendendo a um comprador único.

Acrescentamos que o fato de os pedidos serem colocados para um mesmo fornecedor pode enfraquecer ainda mais a aplicabilidade desta premissa no mundo real. Contudo, acredita-se que em função de tais pedidos ocorrerem, via de regra, em momentos distintos e também em decorrência de tais instalações serem muitas vezes administradas independentemente (o que configuraria na prática dois compradores ao invés de um comprador singular), os empecilhos mencionados não chegam a falsificá-la. Este contexto será particularmente a tendência em empresas sem política de transferências e sem atendimento cruzado, conforme é o caso estudado.

Por fim, convém mencionar que alguns efeitos que se esperava que fossem relevantes (num sentido prático, ou seja, com $EQP > 0,01$), assim não se mostraram. É o caso de $DIST * MAGN$ e $DIST * MAGN * CORR$. Era de se esperar, de acordo com o que se viu em Zinn, Levy e Bowersox (1989), que, em tais interações, $MAGN$ baixa trouxesse maiores níveis de $FRUES$ em um sistema centralizado do que num descentralizado. Talvez pelos parâmetros de entrada utilizados para esses fatores (isto é, os níveis de tratamento) na presente pesquisa, não se observou isso. Estudos futuros que contemplem outros níveis para esses fatores poderiam confrontar esse resultado.

6. CONCLUSÃO

Nesta dissertação, procurou-se reduzir a lacuna existente na literatura sobre planejamento de redes logísticas no que concerne à inclusão dos estoques na análise. O que se fez foi avaliar quatro configurações de rede distintas, tomando como critério de comparação entre elas diversos indicadores de desempenho intimamente ligados a custos logísticos. Dentre esses indicadores, foi incluída uma medida que refletia a relação entre falta e excesso de produtos em estoque. Apesar da destacada atenção à medida de estoques, não foi negligenciado o tradicional *trade-off* transportes/instalações existente no planejamento de redes.

As quatro configurações mencionadas foram definidas pela combinação de dois fatores, cada um com dois níveis, os quais correspondem a decisões sob a responsabilidade do gestor logístico. O primeiro fator se refere à estrutura de distribuição da rede (se centralizada ou descentralizada), enquanto que o segundo fator se refere à localização do armazém na cadeia logística (se próximo do varejo ou mais distante, em dias de viagem).

Foi avaliado se fatores ambientais poderiam exercer influência sobre essas decisões. Os fatores contemplados representam variáveis tipicamente associadas a estoques e foram selecionados com base em uma extensa revisão bibliográfica que identificou que devem possuir papel relevante. A originalidade da proposta está justamente em combinar todos os fatores (controláveis e ambientais) simultaneamente no mesmo estudo.

A metodologia de pesquisa utilizada foi a de desenho fatorial e teve seus experimentos implementados via simulação por eventos discretos. Os resultados da simulação foram analisados através de MANOVA e, uma vez que se atestou significância estatística para a diferença entre os diversos cenários testados, posteriormente aplicou-se ANOVA para descobrir qual o impacto de cada variável dependente (os indicadores de desempenho logísticos) sobre as diferenças observadas.

Tanto a MANOVA como os procedimentos univariados identificaram que interações fatoriais de ordem superior a dois não são, em geral, relevantes do ponto de vista prático. Esse achado traz um conforto bastante grande para o gestor logístico, pois sua tarefa de

planejar a rede se torna muito mais simples. Basta focar sua análise nos efeitos principais e em algumas poucas interações de segunda ordem para obter desempenho satisfatório na rede.

A discussão que se segue procura responder as perguntas norteadoras da pesquisa inseridas na seção 3.1. Uma vez que os níveis dos fatores estudados são constantemente trazidos à tona durante essa discussão, repetimos aqui o Quadro 6 já apresentado na seção 4.3 a fim de tornar mais conveniente sua consulta.

Fator experimental	Escala	Níveis
(1) Estrutura de distribuição (<i>DIST</i>)	Nominal	(a) Centralizado: <i>DIST</i> = 1 (b) Descentralizado: <i>DIST</i> = 2
(2) Razão entre os tempos de transporte de suprimentos e de distribuição (<i>RSD</i>)	Métrica	(a) Baixo: <i>RSD</i> = 1,5 (b) Alto: <i>RSD</i> = 4
(3) Correlação entre as demandas dos mercados (<i>CORR</i>)	Métrica	(a) Negativo: <i>CORR</i> = -0,7 (b) Nulo: <i>CORR</i> = 0 (c) Positivo: <i>CORR</i> = 0,7
(4) Magnitude entre desvios-padrão das demandas (<i>MAGN</i>)	Métrica	(a) Baixo: <i>MAGN</i> = 1 (b) Alto: <i>MAGN</i> = 2
(5) Amplitude de variação no tempo de reabastecimento do centro de distribuição (<i>AMP</i>)	Métrica	(a) Baixo: <i>AMP</i> = 2 (b) Alto: <i>AMP</i> = 6

Quadro 6 (copiado da seção 4.3)

A discussão foi dividida a fim de avaliar separadamente os efeitos em indicadores de transportes e os efeitos no indicador de estoques. As conclusões são apresentadas individualmente por efeito observado, ou, quando mais proveitoso, em conjunto com outros efeitos. Os efeitos de um determinado tratamento nos indicadores são avaliados a partir da média marginal do respectivo tratamento.

TRANSPORTES

Os efeitos nos indicadores de transportes identificados na subseção 5.4.2.1 como tendo significância prática estão sumarizados e explicados no Quadro 20. Em seguida, são apresentadas as conclusões e implicações gerenciais para esses resultados.

Indicador	Efeito principal de <i>DIST</i>		Efeito principal de <i>RSD</i>	
	$(DIST=2) - (DIST=1)$		$(RSD=4) - (RSD=1,5)$	
	Efeito	Motivo	Efeito	Motivo
<i>QCRv</i>	> 0	Menor disponibilidade média nos armazéns descentralizados quando comparados ao armazém centralizado, implicando, conseqüentemente, num número maior de envios parciais ao varejo.	> 0	Menor distância entre varejo e armazém na localização avançada induz a um maior número de ciclos de pedidos de reposição.
<i>QCRcd</i>	> 0	Menor consolidação de cargas da distribuição descentralizada, visto que o ponto de pedido de um armazém descentralizado é igual à metade do ponto de pedido do armazém centralizado.	< 0	Maior distância entre armazém e fábrica na localização avançada induz a um menor número de ciclos de pedidos de reabastecimento.

Quadro 20 – Explicação para os efeitos de *DIST* e *RSD* em *QCRv* e *QCRcd*

CONCLUSÃO: Apenas fatores sob o controle do gestor logístico afetam os indicadores de transporte. Fatores ligados à variabilidade da demanda (*MAGN*) ou do tempo de resposta (*AMP*), além do fator representativo do movimento conjunto de mercados distintos (*CORR*), não afetam esses indicadores no longo prazo e não possuem nenhuma interação com as decisões inerentes ao planejamento de redes logísticas.

Tal resultado suporta a abordagem utilizada pelos estudos de programação matemática que buscam balancear exclusivamente os *trade-offs* entre instalações e transporte tomando demanda e tempos de resposta determinísticos. Essas premissas, embora irreais, se mostram totalmente válidas a fim de simplificar a análise, pois permitem conclusões sem distorções significativas. Deve ser observado, contudo, que tal abordagem deve ser utilizada somente quando se sabe que a proporção dos custos de

falta e excesso (isto é, os custos dos estoques) não é relevante no custo logístico total, pois, conforme se verá a seguir, quando tomado um indicador de estoque como objeto de análise, os fatores ambientais mencionados interagem sim com as decisões gerenciais estudadas e apresentam impacto significativo.

Uma vez que a modelagem utilizada para simular a demanda no presente estudo é especialmente válida para produtos de consumo não-supérfluos, pode-se extrair daí uma orientação prática aos gestores logísticos de setores como os de, por exemplo, alimentos e medicamentos. No primeiro, a proporção dos custos de estoque no custo logístico total não é tão significativa devido ao baixo valor agregado, em geral, desses produtos. Sendo assim, os estoques podem ser ignorados no processo de planejamento de redes. Isso não acontece, porém, com remédios, cujo elevado custo de oportunidade gerado às empresas farmacêuticas é marcante, fato que exerce pressão no sentido de se calibrar bem os estoques na rede.

ESTOQUES

O único indicador analisado referente a estoques foi *FRUES*. Os efeitos relevantes sobre o mesmo estão relacionados a seguir, acompanhados da discussão pertinente.

Efeito 1: efeito principal de *RSD*

$$(RSD=4) - (RSD=1,5) < 0$$

MOTIVO: Quando o centro de distribuição está mais distante, o varejo é obrigado a aumentar o seu ponto de pedido, ficando coberto por mais tempo pelo estoque de ciclo. Em outras palavras, um número menor de ciclos no varejo reduz as chances de falta de produto simplesmente por haver exposições menos freqüentes do estoque a variações inesperadas no sistema. Salienta-se que isso é válido para situações com tempo de transporte de distribuição determinístico ou razoavelmente previsível.

CONCLUSÃO: Os custos que permitem o aumento no nível de serviço são totalmente arcados pelo varejo, através do aumento nos estoque de ciclo, enquanto que o elo distribuidor tem redução em seus estoques de ciclo. Quando distribuidor e varejista forem representados por empresas diferentes, é possível que haja conflitos na decisão do

distribuidor de se afastar de seu cliente. O varejista, mesmo experimentando melhoras em seu nível de serviço sem que veja aumentado seu estoque de segurança, talvez exija compensações do distribuidor – como, por exemplo, reduções de preço – a fim de equilibrar o aumento no custo de carregamento do estoque de ciclo.

Efeito 2: Interação entre *RSD* e *DIST*

$$(RSD=6; DIST=1) - (RSD=6; DIST=2) > (RSD=1,5; DIST=1) - (RSD=1,5; DIST=2)$$

MOTIVO: Esse resultado suporta o que foi encontrado por Caron e Marchet (1996). Conforme esses autores colocaram, a centralização é favorecida quando o tempo de resposta da primeira perna da cadeia logística aumenta em relação ao tempo da segunda, porque assim se intensifica o potencial de aproveitamento de compensações entre movimentos inversos nas demandas dos varejos.

CONCLUSÃO: O presente estudo não só suporta o resultado de Caron e Marchet (1996), como o confirma num ambiente mais realista, com tempo de reabastecimento estocástico, atestando que seus resultados são robustos à violação da premissa de tempo determinístico.

Efeito 3: Interação entre *DIST* (nível centralizado exclusivamente) e *CORR*

$$(DIST=1; CORR=-0,7) > (DIST=1; CORR=0) > (DIST=1; CORR=0,7)$$

MOTIVO: Conforme Zinn, Levy e Bowerson (1989) enunciaram, o efeito benéfico da centralização no nível de serviço (ou, alternativamente, na redução do estoque de segurança) aumenta à medida que o coeficiente de correlação entre as demandas dos mercados atendidos caminha desde um extremo positivo até um extremo negativo.

CONCLUSÃO: Os resultados estão em linha com a Teoria do *Portfolio Effect*.

Efeito 4: Interação entre *DIST* (nível descentralizado exclusivamente) e *CORR*

$$(DIST=2; CORR=-0,7) = (DIST=2; CORR=0) = (DIST=2; CORR=0,7)$$

MOTIVO: Não há como aproveitar compensações entre mercados geograficamente separados caso o atendimento aos mesmos não seja centralizado. A relação entre os

diferentes mercados num sistema descentralizado é inócua e cada armazém deve estar capacitado a operar por si só.

CONCLUSÃO: Os resultados estão em linha com a Teoria do *Portfolio Effect*.

Efeito 5: Comparação de cenários específicos de *DIST* e *CORR*

$(DIST=2; CORR=-0,7; 0; 0,7) > (DIST=1; CORR=0,7)$

MOTIVO: Esse resultado não foi previsto por Zinn, Levy e Bowersox (1989), os quais encontraram que a descentralização seria no máximo igual, porém nunca melhor que a centralização. Todavia, tal resultado é comparável ao encontrado por Evers (1997). A discussão desse resultado será melhor detalhada quando da apresentação do Efeito 6, e complementada com a discussão do Efeito 7.

Efeito 6: Comparação de cenários específicos de *DIST*, *RSD* e *CORR*

$(DIST=2; RSD=1,5; CORR=-0,7; 0; 0,7) - (DIST=1; RSD=1,5; CORR=0,7) >$
 $> (DIST=2; RSD=4; CORR=-0,7; 0; 0,7) - (DIST=1; RSD=4; CORR=0,7)$

MOTIVO: A existência de armazéns descentralizados, segundo alegou Evers (1997), balancearia o risco inerente a variações do tempo de reabastecimento, pois o atraso no recebimento de um pedido por um armazém não afetaria todo o sistema como ocorre na centralização. Uma vez que cada armazém coloca seu pedido independentemente dos demais num sistema descentralizado, se reproduziria naturalmente os efeitos da prática de separação de pedidos (*order splitting*).

Essa propriedade se faz presente nos Efeitos 5 e 6 acima, conferindo vantagem à descentralização. O que explica a vantagem ser mais expressiva com *RSD* baixa é o maior número de ciclos de pedido de reabastecimento que ocorrem nesse cenário. Havendo mais ciclos, aumentam as chances de atrasos nos pedidos, permitindo, portanto, que a capacidade oferecida pela descentralização de mitigação desses atrasos se acentue. A discussão do Efeito 7, na sequência, agrega ainda mais um ponto relevante que suporta esse resultado.

Efeito 7: Interação entre *DIST* e *AMP*

$$(DIST=1; AMP=2) - (DIST=1; AMP=6) > (DIST=2; AMP=2) - (DIST=2; AMP=6)$$

MOTIVO: Uma vez que a separação de pedidos efetuada no âmbito da descentralização possibilita o balanceamento do risco no tempo de reabastecimento e amortece impactos de atrasos no sistema, ela é menos prejudicada com aumentos em *AMP* do que a centralização.

CONCLUSÃO: Há convergência com os resultados de Evers (1993), mesmo não havendo, no nosso modelo, liberdade para transferências laterais conforme utilizou esse autor. Por esse fato, a descentralização não se mostrou melhor do que a centralização quando *CORR* apresentou valores nulo ou negativo. Nesses casos, o balanceamento do risco de demanda proporcionado pela centralização preponderou sobre o balanceamento do risco do tempo de reabastecimento proporcionado pela descentralização.

6.1. Limitações do estudo

Nesta seção, reforçamos algumas premissas utilizadas na modelagem experimental a fim de manter os contornos da pesquisa explícitos para o leitor.

Em primeiro lugar, faz-se importante reiterar que uma característica fundamental da demanda dos mercados simulados é que inexistência de tendência em suas séries diárias. Tampouco sazonalidade. Cada série segue distribuição Normal de média não nula e é independente e identicamente distribuída ao longo do tempo. Isto significa dizer que não há influência da demanda de um determinado dia na demanda de qualquer dia seguinte. Fica evidente, portanto, que o estudo visa contribuir para o planejamento de redes logísticas de empresas operando em mercados razoavelmente consolidados e estáveis. Conforme já mencionado, produtos de consumo não-supérfluos como alimentos e medicamentos são exemplos bastante representativos desse tipo de mercado, desde que condicionado a regiões geográficas com crescimento populacional próximo de zero.

Alguns estudos mostraram que é inadequado assumir demanda durante o tempo de resposta Normal, quando da definição do estoque de segurança, se a premissa não

possuir sustentação na realidade (Mentzer e Krishnan, 1985; Lau, 1989). Muito embora o presente estudo não defina explicitamente a distribuição desta variável, tendo definido apenas as distribuições isoladas de seus componentes (tempo de resposta triangular e demanda Normal); e tampouco utilize estoque de segurança para definição do ponto de pedido; é importante que fique claro que generalizações dos resultados estão limitadas.

Quanto a isso, Lau (1989) sugere, aos gestores logísticos, a investigação empírica da distribuição da demanda durante o tempo de resposta como etapa anterior à definição dos pontos de pedidos, pois assim se evitaria a utilização de premissas às cegas. Em seu artigo, o autor menciona que boa precisão pode ser atingida focando a análise somente nos primeiros quatro momentos da distribuição. Momentos de ordem superior perderiam importância gradativamente e trariam menos informação, logo, trariam benefícios que não justificariam os custos de agregá-los à análise.

Dentre outras peculiaridades do presente estudo, deve ser atribuída especial atenção ao fato de que se simulou um único produto na cadeia logística da empresa. Embora não seja uma hipótese inimaginável de ser encontrada no mundo real, tampouco é algo tão comum, principalmente numa indústria como a de bens de consumo não-duráveis. A estratégia de modelagem teve como propósito facilitar a análise e a separação dos efeitos dos fatores pesquisados. Conforme adiantado na seção 2.2, a opção por esta modelagem inviabiliza, por exemplo, o estudo de técnicas de *risk pooling* ligadas à padronização de peças e componentes. Sem intenção de exaurir todas as possibilidades, outras decisões que podem afetar a operação de uma empresa quando se trabalha com múltiplos produtos são as decisões de compra ou transporte. Muitas vezes, a aquisição e/ou transporte de um determinado produto podem sofrer atrasos em função de economias de escopo envolvidas, respectivamente, no processo de negociação com fornecedores e na consolidação de cargas.

Com relação à parte ferramental, convém reforçar que o trabalho se baseou em um modelo de efeitos fixos. Sendo assim, os resultados não podem ser estendidos a quaisquer combinações de parâmetros de entrada para os grupos de tratamento. Numa situação concreta de dados próximos aos utilizados, o uso direto de nossas descobertas certamente não trará fortes distorções do ponto de vista prático. Quando isto não for

verdade, contudo, negligências nesse sentido aumentariam o risco de resultados frustrantes.

Por fim, lembramos também que algumas premissas da MANOVA não foram respeitadas. Todavia, tratam-se das premissas menos relevantes à sua implementação. Além disso, a modelagem dos experimentos foi desenvolvida de modo a mitigar tais violações. Sendo assim, teríamos possíveis problemas somente se tivéssemos encontrado valores de significância para os testes estatísticos relativamente próximos do valor crítico de 5% escolhido para a pesquisa (Sharma, 1996). Uma vez que os resultados encontrados foram, em geral, significantes mesmo a um nível de 1%, isto não configura limitação material às conclusões.

6.2. Direcionamentos futuros

Neste documento, foi estudada a influência exercida por fatores ambientais associados à demanda e ao tempo de reabastecimento em decisões inerentes ao planejamento de redes logísticas. Todavia, foram testados poucos níveis de tratamento por fator. Uma possibilidade de expansão da pesquisa seria então a inclusão de mais níveis. Esperar-se-ia, com isso, obter compreensão adicional sobre as interações entre os mesmos.

Apesar do presente trabalho ter evitado atribuir valores de custos unitários para as diversas variáveis presentes nos problemas logísticos, numa situação concreta onde esses custos sejam conhecidos, a utilização de um número maior de níveis por fator tornaria viável construir uma função, baseada no modelo experimental, capaz de estimar o custo total para níveis dos fatores não contemplados no estudo. De posse dessa função, poderia ser executado um procedimento de otimização da simulação a fim de descobrir a combinação de dados de entrada determinante do custo logístico mínimo.

Florio (2007) estudou impactos do tempo de resposta em alguns indicadores logísticos. Porém, não separou os efeitos provenientes do comportamento estocástico do tempo de reabastecimento dos efeitos provenientes do comportamento estocástico do tempo de reposição. A presente dissertação avançou nesse sentido e obteve conclusões sobre os impactos da variabilidade no tempo de reabastecimento. Uma oportunidade de pesquisa

futura bastante clara que surge daí está em efetuar o isolamento inverso, isto é, testar a amplitude do tempo de distribuição

Finalmente, a modelagem da demanda através de uma Normal impõe limitações à extensão das conclusões, conforme se argumentou na seção 6.1. Logo, há potencial para novas descobertas em investigações fundamentadas em distribuições de formatos distintos ou talvez incorporando sazonalidade. Da mesma forma, outras limitações e premissas indicadas ao longo do documento poderiam ser relaxadas a fim de alcançar resultados mais gerais.

7. BIBLIOGRAFIA

April, J.; Glover, F.; Kelly, J.; Laguna, M.; Practical Introduction to Simulation Optimization; Proceedings of the 2003 Winter Simulation Conference, p. 71-84. Disponível em <http://www.wintersim.org/prog03.htm#IT>, acessado em 05 de setembro de 2007.

Axsäter, S.; Modelling Emergency Lateral Transshipments in Inventory Systems; Management Science, v. 36, n. 11, 1990; p. 1329-1338.

Ballou, R.; Gerenciamento da Cadeia de Suprimentos: Planejamento, Organização e Logística Empresarial; Bookman, Porto Alegre; 2001.

Ballou, R.; Expressing Inventory Control Policy in the Turnover Curve; Journal of Business Logistics, v. 26, n. 2, 2005, p. 143-164.

Banks, J.; Carson II, J.; Discrete-Event System Simulation; Prentice-Hall, New Jersey; 1984.

Bowersox, D.; Closs, D.; Simulation in Logistics: a Review of Present Practice and a Look to the Future; Journal of Business Logistics, v. 10, n. 1, 1989, p. 133-148.

Brandeau, M.; Chiu, S.; An Overview of Representative Problems in Location Research; Management Science, v. 35, n. 6, 1989, p. 645-674.

Caron, F.; Marchet, G.; The Impact of Inventory Centralization/Decentralization on Safety Stock for Two-Echelon Systems; Journal of Business Logistics, v. 17, n. 1, 1996, p. 233-257

Carson II, J.; Introduction to Modeling and Simulation; Proceedings of the 2004 Winter Simulation Conference; p. 9-16. Disponível em <http://www.wintersim.org/prog04.htm#IT>, acessado em 05 de setembro de 2007.

Chiang, C.; Order Splitting under Periodic Review Inventory System; International Journal of Production Economics, v. 70, 2001, p. 67-76.

Chiang, C.; Chiang, W.; Reducing Inventory Cost by Order Splitting in the Sole Sourcing Environment; Journal of the Operational Research Society, v. 47, n. 3, 1996, p. 446-456.

Das, C.; Tyagi, R.; Effect of Correlated Demands on Safety Stock Centralization: Patterns of Correlation Versus Degree of Centralization; Journal of Business Logistics, v. 20, n. 1, 1999, p. 205-213.

Davariz, R.; Procedimento para Análise de Projeto de Rede Logística; Dissertação de Mestrado, Instituto Militar de Engenharia; 2006.

Evers, P.; Expanding the Square Root Law: an Analysis of Both Safety and Cycle Stocks; Logistics and Transportation Review, v. 31, n. 1, 1995, p. 1-20.

Evers, P.; The Impact of Transshipments on Safety Stock Requirements; Journal of Business Logistics, v. 17, n. 1, 1996, p. 109-133.

Evers, P.; Hidden Benefits of Emergency Transshipments; Journal of Business Logistics, v. 18, n. 2, 1997, p. 55-76.

Evers, P.; Filling Customer Orders from Multiple Locations: a Comparison of Pooling Methods; Journal of Business Logistics, v. 20, n. 1, 1999, p. 121-139.

Evers, P.; Beier, F.; The Portfolio Effect and Multiple Consolidation Points: a Critical Assessment of the Square Root Law; Journal of Business Logistics, v. 14, n. 2, 1993, p. 109-125.

Evers, P.; Beier, F.; Operational Aspects of Inventory Consolidation Decision Making; Journal of Business Logistics, v. 19, n. 1, 1998, p. 173-189.

Fishman, G.; Principles of Discrete Event Simulation; John Wiley & Sons, New York; 1978.

Fleury, P. F.; Gestão Estratégica do Transporte; In: Figueiredo, K.; Fleury, P. F.; Wanke, P.; Logística e Gerenciamento da Cadeia de Suprimentos: Planejamento do Fluxo de Produtos e dos Recursos; São Paulo, Editora Atlas; 2003.

Fleury, P. F.; Wanke, P.; Logística no Brasil; In: Figueiredo, K.; Fleury, P. F.; Wanke, P.; Logística e Gerenciamento da Cadeia de Suprimentos: Planejamento do Fluxo de Produtos e dos Recursos; Atlas, Rio de Janeiro; 2003.

Florio, A.; O Impacto de Decisões da Indústria sobre Indicadores de Desempenho no Varejo à Luz de Diferentes Configurações do Tempo de Resposta: um Estudo de Simulação; Dissertação de Mestrado; Universidade Federal do Rio de Janeiro; 2007.

Hair Jr., J.; Anderson, R.; Tatham, R.; Black, W.; Babin, B.; Multivariate Data Analysis; Prentice Hall, New Jersey; 2005.

Hillier, F.; Lieberman, G.; Introdução à Pesquisa Operacional; Editora Campus, São Paulo; 1988.

Ingalls, R.; Introduction to Simulation; Proceedings of the 2002 Winter Simulation Conference; p. 7-16. Disponível em <http://www.wintersim.org/prog02.htm#IT>, acessado em 05 de setembro de 2007.

Jácome, B.; Benzecry, M.; Posicionamento Estratégico em Operações na Indústria e Simulação: Impactos de Decisões de Produção e Distribuição no Varejo sob Diferentes Condições de Erros de Previsão de Vendas; Monografia de Graduação; Universidade Federal do Rio de Janeiro; 2005.

Jayaraman, V.; Transportation, Facility Location and Inventory Issues in Distribution Network Design: na Investigation; International Journal of Operations and Production Management, v. 18, n. 5, 1998, p. 471-494.

Khoshnevis, B.; Discrete Systems Simulation; McGraw-Hill; Singapore; 1994.

Lacerda, L.; Considerações sobre o Estudo de Localização de Instalações; In: Fleury, P. F.; Wanke, P.; Figueiredo, K.; Logística Empresarial: a Perspectiva Brasileira; São Paulo, Editora Atlas; 2000a.

Lacerda, L.; Armazenagem Estratégica: Analisando Novos Conceitos; In: Fleury, P. F.; Wanke, P.; Figueiredo, K.; Logística Empresarial: a Perspectiva Brasileira; São Paulo, Editora Atlas; 2000b.

Lau, H.; Toward an Inventory Control System Under Non-Normal Demand and Lead-Time Uncertainty; Journal of Business Logistics, v. 10, n. 1, 1989, p. 88-103.

Lau, H.; Zhao, L.; Optimal Ordering Policies with Two Suppliers When Lead Times and Demands Are All Stochastic; European Journal of Operational Research, v. 68, n. 1, 1993, p. 120-133.

Lau, H.; Zhao, L.; Dual Sourcing Cost Optimization with Unrestricted Lead-Time Distributions and Order-Split Proportions; IIE Transactions, v. 26, n. 5, 1994, p. 66-75.

Law, A.; How to Conduct a Successful Simulation Study; Proceedings of the 2003 Winter Simulation Conference, p. 66-70. Disponível em <http://www.wintersim.org/prog03.htm#IT>, acessado em 05 de setembro de 2007.

Law, A.; Kelton, W.; Simulation Modeling and Analysis; McGraw-Hill, New York; 1991.

Lee, H.; A Multi-Echelon Inventory Model for Repairable Items with Emergency Lateral Transshipments; Management Science, v. 33, n. 10, 1987; p. 1302-1316.

Lima, M.; Custos Logísticos na Economia Brasileira; 2006. Disponível em http://www.ilos.com.br/index2.php?option=com_docman&task=doc_view&gid=23&Itemid=44, acessado em 20 de agosto de 2008.

Mahmoud, M.; Optimal Inventory Consolidation Schemes: a Portfolio Effect Analysis; Journal of Business Logistics, v. 13, n. 1, 1992, p. 193-214.

Maister, D.; Centralization of Inventories and the “Square Root Law”; International Journal of Physical Distribution, v. 6, n. 3, 1976, p. 124-34.

Mentzer, J.; Krishnan, R.; The Effect of the Assumption of Normality on Inventory Control/Customer Service; Journal of Business Logistics, v. 6, n. 1, 1985, p. 101-120.

Monczka, R.; Trent, R.; Handfield, R.; Purchasing and Supply Chain Management; South Western College Publishing, Arizona; 2001.

Montgomery, D.; Design and Analysis of Experiments; John Wiley & Sons, Singapore; 1991.

Moskowitz, H.; Wright, G.; Operations Research Techniques for Management; Prentice-Hall, New Jersey; 1979.

Nash, J.; Compact Numerical Methods for Computers: Linear Algebra and Function Minimisation; Adam Hilger, Bristol; 1990.

Nazário, P.; Papel do Transporte na Estratégia Logística; In: Fleury, P. F.; Wanke, P.; Figueiredo, K.; Logística Empresarial: a Perspectiva Brasileira; São Paulo, Editora Atlas; 2000.

Needham, P.; Evers, P.; The influence of Individual Cost Factors on the Use of Emergency Transshipments; Transportation Research Part E, v. 34, n. 2, 1998, p. 149-160.

Norusis, M.; SPSS/PC+ Advanced StatisticsTM V2.0; SPSS Inc., Chicago; 1988.

Panisset, V.; O Impacto de Diferentes Distribuições de Demanda na Cadeia de Suprimentos: um Estudo Experimental de Simulação; Dissertação de Mestrado; Universidade Federal do Rio de Janeiro; 2007.

Peterson, R.; Silver, E.; Decision Systems for Inventory Management and Production Planning; John Wiley & Sons, Toronto; 1979.

Pidd, M.; Computer Modelling for Discrete Simulation; John Wiley & Sons, Avon; 1989.

Powers, R.; Optimization Models for Logistics Decisions; Journal of Business Logistics, v. 10, n. 1, 1989, p. 106-121.

Ramasesh, R.; Procurement Under Uncertain Supply Lead Times – a Dual Sourcing Technique Could Save Costs; Engineering Costs and Production Economics, v. 21, n. 1, 1991, p. 59-68.

Ripley, B.; Stochastic Simulation; John Wiley & Sons, New York; 1987.

Rodrigues, A.; Simulation Impact of Forecasting Accuracy on Supply Chain Performance: The Bias Effect; Tese de Doutorado; Michigan State University; 2004.

Ronen, D.; Inventory Centralization/Decentralization: the “Square Root Law” Revisited Again; Journal of Business Logistics, v. 11, n. 2, 1990, p. 129-137.

Saliby, E.; Repensando a Simulação: A Amostragem Descritiva; Editora Atlas, São Paulo; 1989.

Saliby, E.; Tecnologia da Informação: Uso da Simulação para a Obtenção de Melhorias em Operações Logísticas. In: Fleury, P. F.; Wanke, P.; Figueiredo, K.; Logística Empresarial; São Paulo, Editora Atlas; 2000.

Sargent, R.; Verification, Validation and Accreditation of Simulation Models; Winter Simulation Conference, 2000; *apud* Rodrigues, A.; Simulation Impact of Forecasting Accuracy on Supply Chain Performance: The Bias Effect; Tese de Doutorado; Michigan State University; 2004.

Sharma, S.; Applied Multivariate Techniques; John Wiley & Sons, New York; 1996.

Schmidt, J. W.; Taylor R. E.; Simulation and Analysis of Industrial Systems; Irwin, Illinois; 1970.

Sculli, D.; Wu, S.; Stock Control with Two Suppliers and Normal Lead Times; Journal of Operational Research Society, v. 32, 1981, p. 1003-1009.

Tagaras, G.; Cohen, M.; Pooling in Two-Location Inventory Systems with Non-Negligible Replenishment Lead-Times; Management Science, v. 38, n. 8, 1992, p. 1067-1083.

Tallon, W.; The Impact of Inventory Centralization on Aggregate Safety Stock: the Variable Supply Lead Time Case; Journal of Business Logistics, v. 14, n. 1, 1993, p. 185-203.

Thomas, D.; Tyworth, J.; Pooling Lead-Time Risk by Order Splitting: A Critical Review; Transportation Research Part E, v. 42, 2006, p. 245-257.

Tyagi, R.; Das, C.; Extension of the Square-Root Law for Safety Stock to Demands with Unequal Variances; Journal of Business Logistics, v. 19, n. 2, 1998, p. 197-203.

Tyworth, J.; Ruiz-Torres, A.; Transportation Role in the Sole Versus Dual-Sourcing Decision; International Journal of Physical Distribution and Logistics Management, v. 30, n. 2, 2000, p. 128-136.

Wagner, H.; Principles of Operations Research; Prentice-Hall, New Jersey; 1969.

Wanke, P.; Aspectos Fundamentais do Problema de Localização de Instalações Logísticas. In: Figueiredo, K.; Fleury, P. F.; Wanke, P.; Logística e Gerenciamento da Cadeia de Suprimentos: Planejamento do Fluxo de Produtos e dos Recursos; São Paulo, Editora Atlas; 2003a.

Wanke, P.; Gestão de Estoques na Cadeia de Suprimento: Decisões e Modelos Quantitativos; Editora Atlas, São Paulo; 2003b.

Wanke, P.; Logística, Gerenciamento de Cadeias de Suprimento e Organização do Fluxo de Produtos. In: Figueiredo, K.; Fleury, P. F.; Wanke, P.; Logística e Gerenciamento da Cadeia de Suprimentos: Planejamento do Fluxo de Produtos e dos Recursos; São Paulo, Editora Atlas; 2003c.

Wanke, P.; Arkader, R.; Lopes, P.; Rodrigues, A.; Um Estudo sobre os Impactos no Varejo das Principais Decisões Estratégicas de Produção e Distribuição da Indústria; Gestão e Produção, v. 13, n. 1, 2006, p. 1-13.

Wanke, P; Consolidation Effects and Inventory Portfolios; Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, DOI 10.1016/j.tre.2008.03.003; 2008 (aguardando publicação).

Zinn, W.; Levy, M.; Bowersox, D.; Measuring the Effect of Inventory Centralization/Decentralization on aggregate safety stock: the “Square Root Law” Revisited; Journal of Business Logistics, v. 10, n. 1, 1989, p. 1-14.

Zinn, W.; Levy, M.; Bowersox, D.; On Assumed Assumptions and the Inventory Centralization/Decentralization Issue; Journal of Business Logistics, v. 11, n.2, 1990, p. 139-142.

ANEXO I. Lista de *softwares* para simulação²⁶

Software	Fornecedor	Aplicações típicas
@RISK	Palisade Corporation	Análise de risco, tomada de decisão sob incerteza
AgenaRisk	Agena	Análise da probabilidade, simulação estatística, inteligência artificial, redes bayesianas, modelagem de negócios, avaliação de risco, análise da decisão, inferência bayesiana, estimação.
Analytica	Lumina Decision Systems, Inc	Investimentos, risco, decisões, análise de carteiras e de fluxo de redes, dinâmica de sistemas, planejamento de recursos e de pesquisa e desenvolvimento, simulação organizacional
AnyLogic 6.0	XJ Technologies	Modelagem mercadológica e competitiva, cadeias de suprimentos, logística, processos de negócio, gerência de recursos e projetos economia da saúde
Arena	Rockwell Automation	Desenho/configuração de instalações, programação de calendário, processos de movimentação de materiais, estratégia de distribuição e roteamento
AutoMod	BrooksSoftware	Instrumento de apoio de decisão para a análise estatística e gráfica da manipulação de materiais, de processos de manufatura e aplicações logísticas usando gráficos 3D.
AutoSched AP	BrooksSoftware	Operações de manufatura onde os dados estão disponíveis para descrever o equipamento, o roteamento de partes e os perfis de ordem do cliente. Tipicamente, AutoSched AP usa uma ligação ao sistema de ERP ou de MES para obter informação exata e atualizada sobre operações de manufatura.
Crystal Ball Professional	Decisioneering	Planejamento, análise de custo e benefício; gerência do risco e de projeto; exploração de petróleo; Seis Sigma
Crystal Ball Standard	Decisioneering	Planejamento e análise de negócios, análise de custo/benefício, gerência de risco, exploração de petróleo, avaliação ambiental
CSIM 19	Mesquite Software	Ferramental de simulação para modelos orientados por processos, modelos de eventos discretos, comunicações, sistemas de entrega de manufaturados e serviços
DecisionPro	Vanguard Software Corporation	Modelagem financeira do negócio, otimização de processos, tomada de decisão
DecisionScript	Vanguard Software Corporation	Planejamento financeiro baseado na <i>web</i> , auxílio <i>online</i> de vendas, simulação de carteira
Enterprise Dynamics Simulation Software	Production Modeling Corporation	Manipulação de materiais, manufatura, <i>call centers</i> e aplicações na indústria de serviços; melhoria processual; planejamento de capacidade
Enterprise Dynamics Studio	Incontrol Enterprise Dynamics	<i>Software</i> de simulação orientado a objetos. Para coordenadores da produção/logística ou consultores de processos de negócio.
ExpertFit	Averill M. Law	Ajuste de distribuições de probabilidades aos dados
Extend OR	Imagine That, Inc.	Modelagem de processos envolvendo objetos físicos ou lógicos
Extend Suite	Imagine That, Inc.	Modelagem de eventos contínuos ou discretos, modelagem 3D modeling e ajuste analítico de distribuições
Flexsim	Flexsim Software Products, Inc.	Manufatura, logística, manipulação de materiais, transporte de <i>containers</i> , armazenagem, distribuição, mineração, cadeia de suprimentos
ForeTell-DSS	DecisionPath, Inc.	Planejamento de cenários para decisões críticas. Aplicações a contra-terrorismo, gerência de carteiras, análise estratégica competitiva, treinamentos
GAUSS matrix programming language	Aptech Systems, Inc.	Resolução de problemas computacionais; problemas estatísticos e de simulação
GoldSim	GoldSim Technology Group	Sistemas ambientais, engenharia, modelagem de negócio
Lean MAST	CMS Research Inc	Operações de fluxo de produtos, fluxo de fábricas e células.
Lean-Modeler	Visual8	Mapeamento da cadeia de valor; nível de inventário, tempo de resposta, capacidade, gargalos e análise de prova de conceito.

²⁶ Disponível em <http://www.lionhrtpub.com/orms/surveys/Simulation/Simulation.html>. Acesso em 05 de setembro de 2007. Ressalta-se que esta é a versão atualizada via *internet* do original Swain, James; Simulation Software Survey; OR/MS Today, December 2005.

Software	Fornecedor	Aplicações típicas
MAST	CMS Research Inc	Desenho e planejamento de células de máquinas automatizadas: sistemas guiados, manuseio robótico.
Micro Saint Sharp Version 2.1	Micro Analysis & Design	Propósito geral, ambiente de simulação de eventos discretos.
mystrategy	Global Strategy Dynamics Ltd	Planejamento estratégico e de negócios.
Plant Simulation	UGS	Orientado a objetos. Ferramenta de simulação de eventos discretos hierarquizados para visualização de modelos, planejamento e otimização.
Portfolio Simulator	ProModel Corporation	Simultânea análise de simulação e otimização de múltiplos projetos numa carteira de projeto.
Process Simulator	ProModel Corporation	<i>Lean</i> , Seis Sigma, mapeamento da cadeia de valor, mapeamento de processos, simulação de gráficos de fluxo, melhoria contínua de processos.
ProcessModel Version 5.1	ProcessModel, Inc.	Melhoria de processos de negócio, simulação e otimização de serviços e manufatura.
Project Simulator	ProModel Corporation	Permite gerentes de projeto visualizar, analisar e otimizar planos de projeto.
ProModel Optimization Suite	ProModel Corporation	<i>Lean</i> , Seis Sigma, planejamneto de capacidade, análise de custos, modelagem de processos, redução de tempo de ciclo, otimização de produtos em processo.
PSM++ Simulation System (new version of PASION)	Stanislaw Raczynski	Software de propósito geral. Suporta eventos discretos, modelos de filas com animação, contínuo ODE.
Quantitative Methods Software (QMS)	QuantMethods	Programação linear, programação inteira, transportes, alocação, rede e simulação.
Renque	Renque Corporation	Renque is a full-fledged Microsoft Windows application, capable to model any imaginable discrete event process.
SAIL	CMS Research Inc	Agendamento e monitoramento de desempenho para sistemas controlados por computador-célula.
SAS Software	SAS Institute Inc.	Tráfego de rede, atividades de centrais telefônicas, tráfego de centros de emergência, atividades de rede de informática, níveis de estoque, modelagem de complexos fluxos e filas.
SCIMOD, Techno Therm, Techno Therm plus, Technical Audit, Techno Maint, Techno Corr, Techno Pas, Process Models, Profimax etc	Techno Software International	Desempenho financeiro, maximização de lucros, melhoria da produtividade, energia, meio ambiente, manutenção, gerenciamento de operações, auditoria técnica.
ServiceModel Optimization Suite	ProModel Corporation	Melhoria e otimização de processos, análise de capacidade, transações e financeira, alocação de equipes, agendamento, volumes de clientes.
ShowFlow 2	Webb Systems Limited	Melhoria de processos, viabilidade de investimentos, análise de sensibilidade, tempo de ciclo, redução de trabalhos em processos e tempos de espera, melhoria de instalações
SIGMA	Custom Simulations	Sistemas de eventos discretos gerais, interface gráfica.
Simcad Pro	CreateASoft, Inc.	Planejamento de contingências, gerenciamento de riscos, visualização 3D, simulação, mapeamento da cadeia de valor, planejamento de capacidade
SIMPROCESS	CACI Products Company	Simulação e melhoria de processos, otimização, gerenciamento de processos de negócios, monitoramento de atividades, planejamento de capacidade, logística e cadeia de suprimentos, estoques, operação de aeroportos e hospitais, seguros, finanças, manufatura.
SIMSCRIPT II.5	CACI Products Company	Linguagem de simulação para construção de simulações em larga escala, interface gráfica.
SIMUL8 Professional	SIMUL8 Corporation	Gerenciamento de fluxos de trabalho, análise de produtos em processo, gargalos, desenvolvimento de novos processos e produtos, análise de capacidade, melhoria contínua.
SIMUL8 Standard	SIMUL8 Corporation	Gerenciamento de fluxos de trabalho, análise de produtos em processo, gargalos, desenvolvimento de novos processos e produtos, análise de

Software	Fornecedor	Aplicações típicas
		capacidade, melhoria contínua.
SLIM	MJC" Limited	Modelagem estratégica e otimização de redes logísticas.
Stat::Fit	Geer Mountain Software Corp.	Ajuste de dados a distribuições estatísticas discretas e contínuas, comparação entre tipos de distribuição, provê medidas absolutas de ajuste, traduz as distribuições ajustadas em formas para <i>softwares</i> de simulação.
Supply Chain Builder	Simulation Dynamics, Inc.	Foca problemas de estoque e transportes ou recursos.
Supply Chain Guru	LLamasoft	Simulação e otimização da cadeia de suprimentos.
Systemflow 3D Animator	Systemflow Simulations, Inc.	Software em animação 3D para uso em simulações de eventos discretos escritos em qualquer linguagem.
TreeAge Pro Suite	TreeAge Software, Inc.	Análise de decisão, risco e custos, gerenciamento de carteiras, decisão sob incerteza, análise de custom-benefício, planejamento e análise de negócios.
Visual Simulation Environment (VSE)	Orca Computer, Inc.	Ambiente integrado de desenvolvimento e execução de simulações de eventos discretos, de propósito geral e orientadas a objetos.
WebGPSS (micro-GPSS)	AcobiaFlux AB	Primeiro curso em simulações de eventos discretos.
WITNESS 2006	Lanner Group	Modelagem de fábricas, hospitais, logística e processos de negócios.
XLSim	AnalyCorp Inc.	Aplicações similares ao @RISK e Crystal Ball.

ANEXO II. Médias marginais e respectivos erros-padrão estimados

Variável Independente (fatores)					Variável dependente ²⁷		
<i>DIST</i>	<i>AMP</i>	<i>RSD</i>	<i>MAGN</i>	<i>CORR</i>	<i>QCRv</i>	<i>QCRcd</i>	<i>FRUES</i>
Centr	Baixa	Baixa	Baixa	Neg	537,48	118,63	1,11
					2,80	1,16	0,06
				Nula	537,65	118,33	0,75
					2,80	1,16	0,06
				Pos	539,05	118,16	-0,08
					2,80	1,16	0,06
			Alta	Neg	536,63	119,65	0,80
					2,80	1,16	0,06
				Nula	536,43	119,70	0,48
					2,80	1,16	0,06
				Pos	539,66	118,65	-0,26
					2,80	1,16	0,06
		Alta	Baixa	Neg	780,97	96,63	1,08
					2,80	1,16	0,06
				Nula	781,13	96,03	0,70
					2,80	1,16	0,06
				Pos	781,91	95,54	-0,10
					2,80	1,16	0,06
			Alta	Neg	780,44	98,18	0,66
					2,80	1,16	0,06
				Nula	781,30	97,97	0,48
					2,80	1,16	0,06
				Pos	782,23	95,94	-1,07
					2,80	1,16	0,06
	Alta	Baixa	Baixa	Neg	539,46	119,86	1,10
					2,80	1,16	0,06
				Nula	539,60	119,58	0,73
					2,80	1,16	0,06
				Pos	540,45	119,30	-0,26
					2,80	1,16	0,06
			Alta	Neg	538,85	120,68	0,66
					2,80	1,16	0,06
				Nula	538,30	121,04	0,45
					2,80	1,16	0,06
				Pos	541,06	119,90	-0,54
					2,80	1,16	0,06
		Alta	Baixa	Neg	780,97	96,63	0,78
					2,80	1,16	0,06
				Nula	781,13	96,13	0,70
					2,80	1,16	0,06
				Pos	782,45	96,37	-0,53
					2,80	1,16	0,06
			Alta	Neg	780,97	98,43	0,46
					2,80	1,16	0,06
				Nula	782,03	98,15	0,41
					2,80	1,16	0,06
				Pos	782,33	96,66	-1,91

²⁷ Médias marginais (em negrito) e respectivos desvios-padrão.

Variável Independente (fatores)					Variável dependente ²⁷		
<i>DIST</i>	<i>AMP</i>	<i>RSD</i>	<i>MAGN</i>	<i>CORR</i>	<i>QCRv</i>	<i>QCRcd</i>	<i>FRUES</i>
					2,80	1,16	0,06
Desc	Baixa	Baixa	Baixa	Neg	555,83	234,20	0,68
					2,80	1,16	0,06
				Nula	555,07	234,07	0,69
					2,80	1,16	0,06
				Pos	556,99	234,05	0,69
					2,80	1,16	0,06
			Alta	Neg	555,96	235,38	-0,08
					2,80	1,16	0,06
				Nula	555,21	235,87	-0,08
					2,80	1,16	0,06
				Pos	555,55	233,95	-0,09
					2,80	1,16	0,06
		Alta	Baixa	Neg	806,67	209,78	0,40
					2,80	1,16	0,06
				Nula	806,79	209,77	0,32
					2,80	1,16	0,06
				Pos	807,93	209,73	0,44
					2,80	1,16	0,06
			Alta	Neg	805,67	211,15	-0,54
					2,80	1,16	0,06
				Nula	806,37	211,03	-0,55
					2,80	1,16	0,06
				Pos	808,27	209,83	-0,56
					2,80	1,16	0,06
	Alta	Baixa	Baixa	Neg	552,52	233,76	0,39
					2,80	1,16	0,06
				Nula	551,90	233,33	0,40
					2,80	1,16	0,06
				Pos	553,27	232,96	0,40
					2,80	1,16	0,06
			Alta	Neg	551,62	234,70	-0,56
					2,80	1,16	0,06
				Nula	551,49	235,01	-0,55
					2,80	1,16	0,06
				Pos	552,34	232,99	-0,55
					2,80	1,16	0,06
		Alta	Baixa	Neg	807,09	210,90	-1,09
					2,80	1,16	0,06
				Nula	806,78	210,51	-1,09
					2,80	1,16	0,06
				Pos	808,49	210,20	-1,10
					2,80	1,16	0,06
			Alta	Neg	806,04	213,07	-1,39
					2,80	1,16	0,06
				Nula	806,21	213,20	-1,39
					2,80	1,16	0,06
				Pos	808,12	210,31	-1,40
					2,80	1,16	0,06

Livros Grátis

(<http://www.livrosgratis.com.br>)

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

[Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE](#)

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

[Baixar livros de Literatura](#)
[Baixar livros de Literatura de Cordel](#)
[Baixar livros de Literatura Infantil](#)
[Baixar livros de Matemática](#)
[Baixar livros de Medicina](#)
[Baixar livros de Medicina Veterinária](#)
[Baixar livros de Meio Ambiente](#)
[Baixar livros de Meteorologia](#)
[Baixar Monografias e TCC](#)
[Baixar livros Multidisciplinar](#)
[Baixar livros de Música](#)
[Baixar livros de Psicologia](#)
[Baixar livros de Química](#)
[Baixar livros de Saúde Coletiva](#)
[Baixar livros de Serviço Social](#)
[Baixar livros de Sociologia](#)
[Baixar livros de Teologia](#)
[Baixar livros de Trabalho](#)
[Baixar livros de Turismo](#)