

**Marcellus Vinagre da Silva**

Localização de Estoques na Rede de Distribuição de  
uma Empresa do Setor Siderúrgico

Dissertação apresentada à Escola de Engenharia da  
Universidade Federal de Minas Gerais para obtenção  
do título de Mestre em Engenharia de Produção.

Belo Horizonte - MG

Março / 2006

Marcellus Vinagre da Silva

Localização de Estoques na Rede de Distribuição de  
uma Empresa do Setor Siderúrgico

Dissertação apresentada à Escola de Engenharia da  
Universidade Federal de Minas Gerais para obtenção  
do título de Mestre em Engenharia de Produção.

Orientador:

Prof. Dr. Carlos Roberto Venâncio de Carvalho

MESTRADO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO  
ESCOLA DE ENGENHARIA  
UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS

Belo Horizonte - MG

Março / 2006

Dissertação de Mestrado sob o título *Localização de Estoques na Rede de Distribuição de uma Empresa do Setor Siderúrgico*, defendida por Marcellus Vinagre da Silva e aprovada em 31 de março de 2006, em Belo Horizonte, Minas Gerais, pela banca examinadora constituída pelos doutores:

---

Prof. Dr. Carlos Roberto Venâncio de Carvalho  
Departamento de Engenharia de Produção - UFMG  
Orientador

---

Prof. Dr. Marcone Jamilson Freitas Souza  
Departamento de Computação - UFOP

---

Prof. Dr. Ricardo Poley Martins Ferreira  
Departamento de Ciência da Computação - PUC/MG

---

Prof. Dr. Solon Venâncio de Carvalho  
Laboratório Associado de Computação e Matemática Aplicada - INPE

*Dedico esta dissertação à minha querida e amada  
avó Totó, seu legado de alegria, simplicidade  
e afeto estará sempre presente comigo, por toda minha vida.  
Tó, onde quer que esteja, saiba que te amo demais!*

# Agradecimentos

Dedico meus sinceros agradecimentos:

- aos meus pais, Person e Marlise, por terem possibilitado de todas as formas minha caminhada até aqui;
- ao meu filho Marcos, que embora não compreenda no momento a dimensão e dosagem de sacrifício para realização deste trabalho, teve que conviver com momentos de maior ausência de minha parte;
- à Fabiana, pela paciência, compreensão e grande incentivo durante todo o desenrolar deste trabalho;
- aos meus padrinhos, Roberto e Marinália, por todo o apoio e carinho concedidos a mim, em toda minha vida;
- ao professor Carlos Roberto Venâncio de Carvalho, pela orientação deste trabalho e por sempre ter acreditado na minha capacidade e no sucesso dessa dissertação;
- aos professores participantes da banca examinadora, Marcene Jamilson Freitas Souza, Ricardo Poley Martins Ferreira e Solon Venâncio de Carvalho pelas valiosas sugestões de melhorias do texto final;
- ao professor Peter Wanke da COPPEAD/UFRJ, pelos oportunos debates e discussões sobre estoques e redes logísticas, os quais me ajudaram a despertar o interesse pelo tema abordado neste trabalho;
- à mamãe e Marina Padula, por terem ajudado de forma decisiva na revisão deste texto, sugerindo melhorias significativas;
- ao Henrique Moraes e Enrique Soares, por terem me concedido a flexibilidade de horário de trabalho necessária para a realização do mestrado;
- a todos os colegas e professores do programa de mestrado, em especial ao saudoso colega Renato Jardim (*in memoriam*) pelo convívio sadio e enriquecedor.

*"Por isso eu pergunto  
À você no mundo  
Se é mais inteligente  
O livro ou a sabedoria  
O mundo é uma escola  
A vida é o circo  
Amor, palavra que liberta  
Já dizia o profeta."*

**Marisa Monte**

# Resumo

Estudos de localização e desenho de rede têm recebido grande atenção da literatura especializada desde a década de 60. Em sistemas logísticos de distribuição, o projeto de rede se constitui, para muitos autores, como o principal problema de planejamento logístico de uma empresa, pois suas decisões impactam profundamente aspectos táticos e operacionais do sistema como um todo. Um planejamento logístico consistente deve levar em conta um conjunto integrado de decisões de transporte, localização de instalações e estoques. Os modelos clássicos de desenho de redes de distribuição tendem a simplificar as questões de estoque, ou mesmo negligenciá-las. Uma abordagem comum a esses problemas é inicialmente estabelecer a rede de distribuição para somente depois dimensionar uma política de estoques. Esta dissertação procura incorporar questões de estoque no desenho de uma rede de distribuição, possibilitando avaliar em uma perspectiva ampla o grau de centralização / descentralização de estoques adequado para um determinado produto em uma rede de instalações estabelecida. Um modelo de programação não-linear inteira mista é proposto para a resolução de um problema real de uma empresa do setor siderúrgico nacional. Os conceitos de custo logístico total e segmentação de estratégia de distribuição são explorados, juntamente com possíveis ganhos de escala em centralizações de estoque. Os resultados obtidos com a implementação computacional do modelo se mostraram adequados para a resolução do problema proposto, estando as conclusões obtidas em concordância com a literatura especializada.

**Palavras-chave:** desenho de rede, centralização de estoques, problemas de localização, programação não-linear inteira mista.

# Abstract

Location and network design studies have received great attention from specialized literature since the 1960's. For many authors, network design is the main problem of logistic planning, as its decisions deeply affect tactical and operational aspects of a logistic system as a whole. A consistent logistic planning must take into account integrated decisions related to transportation, location of facilities and inventory issues. The classical distribution network design models tend to simplify inventory issues, or even neglect them. A common approach to these problems is initially to establish a distribution network and only later implement an inventory policy. This work incorporates inventory issues in a distribution network design allowing the evaluation, through a wider perspective, of the best degree of inventory centralization / decentralization for a product in an established network facility. A nonlinear mixed integer model is proposed to solve a real problem of a national steel company. The total logistic cost and distribution segmentation strategy concepts are explored together with possible economies of scale through inventory centralization. The results obtained with the model implementation showed to be adequate for the resolution of the proposed problem, and the conclusions are in accordance with specialized literature.

**Keywords:** network design, inventory centralization, location problems, nonlinear mixed integer programming.

# Sumário

<b>Lista de Figuras</b>	<b>xiii</b>
<b>Lista de Tabelas</b>	<b>xv</b>
<b>1 Introdução</b>	<b>17</b>
1.1 Motivação do estudo . . . . .	19
1.2 Objetivos da dissertação . . . . .	21
1.2.1 Objetivo geral . . . . .	21
1.2.2 Objetivos específicos . . . . .	21
1.3 Organização da dissertação . . . . .	22
<b>2 Contextualização do Estudo</b>	<b>23</b>
2.1 O Setor siderúrgico . . . . .	23
2.1.1 O aço e sua importância . . . . .	23
2.1.2 A siderurgia no Brasil . . . . .	26
2.1.2.1 Breve histórico . . . . .	26

---

2.1.2.2	Situação atual . . . . .	27
2.2	A empresa . . . . .	32
2.2.1	Histórico . . . . .	32
2.2.2	Situação atual . . . . .	33
2.3	A rede de distribuição da empresa . . . . .	35
2.3.1	Tamanho atual da rede de distribuição . . . . .	35
2.3.2	A plataforma de tecnologia de informação . . . . .	38
2.3.2.1	Sistemas de <i>SCM (Supply Chain Management)</i> . . . . .	40
2.3.3	Planejamento logístico da rede de distribuição . . . . .	43
2.4	Situação problema . . . . .	44
<b>3</b>	<b>Fundamentação Teórica</b>	<b>46</b>
3.1	Logística Empresarial . . . . .	46
3.1.1	Planejamento logístico . . . . .	49
3.1.1.1	Projeto da rede logística . . . . .	53
3.1.2	Estoques . . . . .	56
3.1.2.1	Lote Econômico . . . . .	57
3.1.2.2	Controles de estoque puxados . . . . .	58
3.2	Pesquisa Operacional . . . . .	61
3.2.1	Programação linear . . . . .	62

3.2.1.1	Otimização linear em redes . . . . .	63
3.2.2	Programação linear inteira mista . . . . .	64
3.2.3	Programação não-linear . . . . .	65
3.3	Revisão de literatura de modelos de localização e centralização de estoques . . . . .	68
3.3.1	Histórico e tipos de modelos de localização . . . . .	68
3.3.2	Modelos de centralização de estoques . . . . .	75
3.3.3	Modelos de desenho da rede de distribuição que incorporam decisões de estoque . . . . .	78
3.3.4	Modelo referencial . . . . .	80
<b>4</b>	<b>Modelo Proposto</b>	<b>87</b>
4.1	Formulação do problema . . . . .	88
4.1.1	Diagnóstico do ambiente . . . . .	88
4.1.1.1	Política de atendimento à demanda . . . . .	89
4.1.1.2	Política de distribuição e estoque . . . . .	89
4.1.1.3	Política de instalações . . . . .	91
4.1.1.4	Política de transporte . . . . .	91
4.1.1.5	Outros aspectos relevantes . . . . .	91
4.1.2	Objetivos do modelo . . . . .	92
4.1.3	Características do problema . . . . .	93

4.1.4	Premissas do modelo . . . . .	94
4.1.5	Escopo do problema . . . . .	96
4.1.5.1	Quantidade de lojas a ser tratada . . . . .	96
4.1.5.2	Quantidade de produtos a ser tratada . . . . .	98
4.1.6	Elementos do problema . . . . .	99
4.1.6.1	Custos logísticos relevantes . . . . .	99
4.1.6.2	Outros elementos para a modelagem . . . . .	101
4.2	Construção do Modelo . . . . .	102
4.2.1	Elementos de entrada e saída . . . . .	102
4.2.1.1	Parâmetros . . . . .	102
4.2.1.2	Variáveis . . . . .	103
4.2.1.3	Síntese dos elementos do modelo . . . . .	104
4.2.2	Relações matemáticas entre os elementos do modelo . . . . .	105
4.2.3	Modelo proposto de programação não-linear inteira mista . . . . .	111
4.2.4	Discussões sobre o modelo . . . . .	112
4.2.4.1	Aspectos modelo proposto x modelo referencial . . . . .	113
<b>5</b>	<b>Análises e Resultados</b>	<b>115</b>
5.1	Implementação . . . . .	115
5.1.1	<i>Software</i> escolhido . . . . .	116

5.2	Análise de cenários . . . . .	118
5.2.1	Comportamento do modelo em função dos componentes da função objetivo . . . . .	119
5.2.2	Comportamento do modelo com a variação combinada de parâmetros	126
5.3	Resultados obtidos . . . . .	132
5.3.1	Análise de custos e soluções . . . . .	133
5.3.2	Aspectos computacionais . . . . .	138
5.3.2.1	Limitações computacionais do modelo . . . . .	140
<b>6</b>	<b>Conclusões</b>	<b>143</b>
6.1	Sugestões para trabalhos futuros . . . . .	145
	<b>Referências bibliográficas</b>	<b>147</b>
	<b>Apêndices</b>	<b>151</b>
	APÊNDICE A - Dados comparativos de previsão de vendas e vendas reais dos produtos da loja 2 . . . . .	152
	APÊNDICE B - Dados quantitativos dos produtos do escopo . . . . .	153
	APÊNDICE C - Dados padrões do produto 17 e custos de transporte entre lojas	154
	<b>Anexos</b>	<b>155</b>
	ANEXO A - Relatório de solução do <i>What's Best!</i> <sup>®</sup> . . . . .	156

# Lista de Figuras

2.1	Fluxo de produção clássico do aço . . . . .	25
2.2	Evolução de vendas de produtos siderúrgicos brasileiros . . . . .	29
2.3	Participação relativa de cada região na produção mundial de aço bruto . . . . .	31
2.4	Mapa da rede de distribuição da empresa em dezembro de 2005 . . . . .	36
2.5	Módulos do sistema de <i>SCM</i> e seus horizontes de atuação . . . . .	43
3.1	Representação de uma cadeia de suprimentos de uma empresa . . . . .	49
3.2	Triângulo de decisões logísticas interligadas . . . . .	51
3.3	Impacto do tempo de resposta das operações e da visibilidade da demanda na escolha da política de atendimento . . . . .	52
3.4	Compensação de custos relevantes de estoque com o tamanho do lote . . . . .	54
3.5	Modelo de ponto de pedido e revisão contínua . . . . .	58
3.6	Representação da rede de distribuição tratada por Miranda e Garrido . . . . .	81
4.1	Grupamentos de lojas candidatos a escopo do modelo . . . . .	97
4.2	Classificação ABC de produtos comuns ao escopo de lojas . . . . .	98

4.3	Grafo esquemático de uma possível configuração da rede nordeste . . . . .	104
4.4	Evolução do nível de estoque na loja $i$ . . . . .	106
5.1	Ganhos na aplicação do modelo proposto em relação à política vigente como função das diversas combinações entre os parâmetros - Nível de serviço 90% . . . . .	130
5.2	Ganhos na aplicação do modelo proposto em relação à política vigente como função das diversas combinações entre os parâmetros - Nível de serviço 99.9% . . . . .	131
5.3	Estratégias de localização de estoques de ciclo em função do valor do produto e do giro do estoque . . . . .	137
5.4	Número de iterações do algoritmo para chegar à solução como função da variação de parâmetros . . . . .	140
5.5	Tempo de processamento do algoritmo (segundos) para chegar à solução como função da variação de parâmetros . . . . .	140
1	Exemplo de relatório de solução gerado pelo <i>What's Best!</i> <sup>®</sup> . . . . .	156

# Lista de Tabelas

2.1	Indicadores econômicos do setor siderúrgico . . . . .	28
2.2	Vendas no mercado interno e externo de produtos siderúrgicos brasileiros .	29
2.3	Produção mundial de aço bruto em 2004 . . . . .	30
2.4	Instalações utilizadas para distribuição em cada canal . . . . .	34
2.5	Quantidade de lojas por região . . . . .	37
4.1	Características de dois produtos da rede de distribuição . . . . .	93
4.2	Síntese dos parâmetros e variáveis do modelo . . . . .	105
5.1	Respostas para simulações do cenário 1 . . . . .	120
5.2	Respostas para simulações do cenário 2 . . . . .	121
5.3	Respostas para simulações do cenário 3 . . . . .	122
5.4	Respostas para simulações do cenário 4 . . . . .	123
5.5	Respostas para simulações do cenário 5 . . . . .	124
5.6	Respostas para simulações do cenário 6 - variando nível de demanda . . . .	125

5.7	Respostas para simulações do cenário 6 - variando valor do produto . . . . .	125
5.8	Custos para as simulações de cenário com nível de serviço 90% . . . . .	128
5.9	Custos para as simulações de cenário com nível de serviço 99.9% . . . . .	129
5.10	Resultados do modelo para o escopo do problema - Custos e configuração da rede por produto . . . . .	133
5.11	Resultados do modelo para o escopo do problema - Configurações das soluções e aspectos computacionais . . . . .	135
5.12	Resumo das estratégias de localização de estoques sugeridas pelo modelo para o escopo proposto . . . . .	136
5.13	Aspectos computacionais do modelo em função da variação de alguns parâmetros . . . . .	139
5.14	Performance computacional variando o tamanho de lojas e nível de demanda	141
1	Aderência da previsão de vendas dos produtos do escopo na loja 2 . . . . .	152
2	Características dos produtos do escopo . . . . .	153
3	Dados padrões do produto 17 para simulação de cenários . . . . .	154
4	Custos de Transporte entre as lojas . . . . .	154

# Capítulo 1

## Introdução

As duas últimas décadas foram marcadas por grandes transformações no mundo dos negócios. Especificamente nos anos 90, a queda das barreiras tarifárias na economia de vários países contribuiu para a consolidação da internacionalização da economia mundial, provocando a abertura dos mercados. As fronteiras geográficas protegiam cada vez menos as economias locais, causando um grande acirramento na competição entre empresas. A pressão por redução de custos e a exigência por maiores níveis de qualidade de produtos e serviços se intensificava.

A lógica do comércio global provocou fortes mudanças nos diversos segmentos de negócios em todas as partes do mundo. Fusões e aquisições de empresas deram origem às grandes corporações, as quais passaram a dominar seus respectivos mercados, buscando sempre a obtenção de maior escala em suas operações, mais recursos, tecnologia e maior racionalização de custos.

Esses grandes movimentos juntamente com o acirramento da competição provocaram uma razoável dinâmica de mudanças no ambiente empresarial. Desde então é comum ver instituições comerciais iniciarem e encerrarem suas operações em curtos intervalos de tempo. Além disso, outros fatores também contribuíram para acelerar ainda mais as mudanças: o advento da internet, meios (modais) de transportes mais rápidos e confiáveis, meios de telecomunicações mais eficientes e baratos. A informação ficou mais barata e rapidamente disponível a um número maior de pessoas. O consumidor ganhou força, se tornando menos leal às marcas e mais exigente. As tecnologias de processo de fabricação

se tornaram cada vez mais disponíveis aos fornecedores, resultando em produtos cada vez mais semelhantes e padronizados (*commodities*). Fez-se necessária a busca por novas estratégias a fim de garantir, em primeira instância, a própria sobrevivência, e por fim o sucesso de uma empresa em seu segmento de negócio.

Segundo Kotler [27], as estratégias de marketing de uma empresa se traduzem na formação do seu composto (*mix*) mercadológico: Preço, Produto, Praça e Promoção. O componente Praça corresponde à definição de canais de distribuição, cobertura de mercado e outras questões logísticas. Para Christopher [12], a logística deve ser entendida como um instrumento dentro da estratégia geral de marketing através do qual se gera valor por meio de serviços.

Os componentes do *mix* de marketing Preço, Produto e Promoção não representam vantagens competitivas sustentáveis no ambiente atual, uma vez que os produtos estão cada vez mais padronizados, os preços podem ser rapidamente igualados pela concorrência, e por fim as promoções corroem as margens de lucro. Por outro lado, ter uma logística bem dimensionada e integrada, que gere valor ao cliente final e que ajude a organização a atender os objetivos de lucratividade, é uma vantagem competitiva sustentável porque não é fácil ser copiada. Christopher [12] sugere que um bom gerenciamento logístico pode levar uma empresa a obter vantagem competitiva tanto em custo como em valor (diferenciação).

De acordo com Bowersox e Closs [8], a chave para o sucesso de uma estratégia logística consiste na coordenação de alguns fatores, tais como: projeto de rede logística, informação, transporte, estoque e armazenagem. Para Ballou [6], a âncora de um bom desempenho logístico está no alinhamento do planejamento logístico com as diretrizes e objetivos da empresa. Tal planejamento logístico se traduz, segundo o autor, em um triângulo de decisões que envolvem questões de localização de instalações, decisões de estoque e de transporte e seus modais, as quais estão atreladas aos objetivos de serviço ao cliente.

O primeiro problema e o mais importante no processo de planejamento logístico é o projeto de rede (BALLOU [6]). A localização de instalações (número, tamanho e localização geográfica dos pontos de estocagem), a definição das fontes de fornecimento e o esquema de associação das instalações às demandas finais impactam profundamente o custo total do sistema logístico. Encontrar a configuração de mínimo custo total para um determinado nível de serviço é uma estratégia muito utilizada por diversos autores da área. Trata-se

de um problema muito complexo e de natureza combinatória, caracterizado também pelo uso intensivo de dados.

Conforme ressaltam Ambrosino e Scutellà [1], os problemas de desenho de rede de distribuição em um cenário real envolvem uma série de decisões integradas, as quais são difíceis de serem consideradas conjuntamente. Geralmente os autores consideram tais problemas de ordem estratégica, porém tais decisões acabam por influenciar aspectos táticos e operacionais da rede, os quais nem sempre são considerados em uma modelagem.

Neste trabalho, é desenvolvido um modelo matemático de programação não-linear inteira mista a fim de se obter o desenho de uma rede logística de menor custo, levando-se em conta decisões de estoque. Com isso, é possível determinar o grau de centralização e descentralização de estoques mais adequado para a configuração de uma rede de lojas estabelecidas, através da modelagem do fenômeno de agregação de risco, conhecido na literatura especializada como *Risk Pooling*<sup>1</sup>.

Busca-se nesta dissertação contribuir para o estudo do tema na literatura, através da abordagem de um problema real. Aos profissionais de logística que lidam com questões de planejamento de redes de distribuição, é intenção que este texto os ajude no processo de tomada de decisões relativas ao assunto.

## 1.1 Motivação do estudo

Uma grande empresa do setor siderúrgico nacional fez, nos últimos anos, grandes investimentos em tecnologia de informação, visando suportar o aumento de complexidade de suas operações logísticas. Entre esses investimentos, a empresa adquiriu um sistema de gestão de recursos empresariais (*ERP-Enterprise Resource Planning*) o qual tem a finalidade de integrar todos os dados transacionais da mesma, focando-se portanto no nível operacional. Para administração da logística, adquiriu um sistema computacional específico do mesmo fabricante do sistema *ERP*. Esses sistemas visam integrar toda a logística da cadeia, desde o planejamento da demanda até as programações de operações mais detalhadas, e são conhecidos como sistemas de gerenciamento da cadeia de suprimentos (*SCM-Supply Chain Management*). O objetivo principal de um sistema de *SCM*

---

<sup>1</sup>Este conceito é apresentado na seção 3.3.2

é auxiliar na tomada de decisões de planejamento logístico.

Santos [44] ressalta que em função da diversidade de decisões que podem ser tomadas, os sistemas *SCM* possuem estrutura modular frequentemente dividida em função do horizonte de planejamento de cada decisão. Ocorre que as decisões do sistema são tomadas de maneira estanque e independente em cada horizonte, ou seja, os resultados de um módulo são dados de entrada para outro. Os resultados obtidos no módulo de planejamento de rede (*network design*) são restrições para os módulos subsequentes de caráter mais táticos, como o planejamento da cadeia de suprimentos (*master planning*). As decisões de desenho de rede não integram aspectos táticos e estratégicos. Define-se a estrutura da rede logística, as instalações e os fluxos de produtos entre elas com base em dados estáticos. Aspectos que podem ser interessantes, como análise de centralização de estoques, não são considerados.

Vários autores têm sugerido a incorporação de aspectos dinâmicos nos modelos de localização. Owen e Daskin [39] argumentam que os planejadores de redes devem configurá-la para uma operação satisfatória não somente para uma dada situação, mas para toda a vida útil de uma instalação. Os trabalhos de alguns autores, como Nozick e Turnquist [36], Miranda e Garrido [34] e Das e Tyagi [15] incorporam alguns desses aspectos, como demandas estocásticas, considerações de estoque, transporte, dentre outras.

O sistema de *SCM* configura a rede de distribuição associando as demandas aos locais, sem levar em conta a variabilidade da demanda, a política de estoque e o nível de serviço (disponibilidade de estoque). Não questiona se, dado um nível de serviço, é realmente necessário ter estoque de um determinado produto em cada instalação da rede.

Para a empresa em questão (e outras organizações), o capital imobilizado em estoque corresponde a uma fonte permanente de preocupação. Segundo relatórios internos da empresa em estudo, a mesma imobiliza atualmente em estoque aproximadamente R\$ 43 milhões distribuídos em suas 25 lojas que atendem à demanda do mercado varejista. O ponto que se apresenta é: dada uma rede de distribuição com instalações fixas, como as demandas devem ser associadas aos locais e, mais especificamente, onde os estoques devem ser localizados ao longo da rede, de forma a garantir um atendimento com nível de serviço acordado a um custo logístico total mínimo<sup>2</sup>.

---

<sup>2</sup>Os conceitos de nível de serviço e custo logístico total são apresentados na seção 3.1

Dado que o sistema de *SCM* não considera os pontos anteriormente citados, seria interessante para a empresa (e comunidade científica) ter um modelo que represente a rede com algumas incertezas pertinentes a um cenário real, e que auxilie nos questionamentos apresentados. No contexto da teoria da localização, constitui um desafio interessante e relativamente recente, o qual vem crescendo com novas pesquisas a cada ano.

## 1.2 Objetivos da dissertação

### 1.2.1 Objetivo geral

O objetivo desta dissertação é desenvolver e implementar um modelo de programação matemática para representação do problema de desenho de uma rede de distribuição estabelecida, a fim de se determinar o melhor fluxo de produtos e localização dos estoques no contexto em estudo. Para tanto, é utilizado o conceito de custo logístico total do sistema. Também são exploradas as compensações entre os custos envolvidos e algumas variações de parâmetros, a fim de se ter maior domínio e sensibilidade sobre as respostas do modelo.

### 1.2.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos envolvem os seguintes itens:

1. Realizar uma descrição do contexto de estudo, visando a identificação do problema;
2. Identificar um referencial teórico através de levantamento na literatura de teoria de localização de algumas modelagens existentes;
3. Desenvolver um modelo matemático para representar o problema identificado e auxiliar nas tomadas de decisões pertinentes;
4. Implementar o modelo desenvolvido em um pacote computacional;
5. Analisar os resultados obtidos do modelo na simulação de cenários e na aplicação do escopo delimitado.

## 1.3 Organização da dissertação

O conteúdo desta dissertação está dividido em seis capítulos.

O capítulo 1 faz uma introdução ao trabalho, citando os fatos e as tendências relevantes do cenário mundial que contribuem para o aumento do grau de importância da logística e seu adequado dimensionamento, principalmente no que tange ao planejamento de redes. São apresentadas também a justificativa e a motivação para o presente estudo, assim como se estabelecem os objetivos para a realização do mesmo.

O capítulo 2 apresenta o cenário em estudo, primeiramente descrevendo o setor da empresa e sua relevância. Feito isso, é descrito um breve histórico da empresa, as principais mudanças ocorridas no que concerne à estratégia de atuação comercial e logística nos últimos anos, e por fim as transformações e estruturações necessárias. Ao final do capítulo é identificada a situação problema.

A revisão de literatura sobre o tema é tratada no capítulo 3. Primeiramente, são abordados os principais pontos da logística empresarial. São feitas breves considerações sobre a pesquisa operacional e programação matemática como suporte às decisões de planejamento logístico. Alguns modelos e formulações existentes na literatura especializada são apresentados. Por fim, é definido o modelo referencial, que é a base para a formulação do modelo proposto para abordar o problema identificado.

No capítulo 4 é apresentada a elaboração da formulação e construção do modelo matemático. É realizado um diagnóstico do ambiente, visando a identificação dos elementos relevantes para o modelo. Em seguida, são estabelecidos os objetivos da modelagem, seu escopo, suas premissas e, por fim, é formalizado um modelo de programação não-linear inteira mista proposto para o problema, enfatizando-se ao final do capítulo as diferenças em relação ao modelo referência.

No capítulo 5 são apresentados alguns aspectos de implementação do modelo, os resultados obtidos e são discutidas algumas simulações de cenário realizadas. Possíveis ganhos na utilização do modelo proposto em relação ao modelo logístico atual são analisados.

As conclusões e sugestões para futuros trabalhos sobre o tema, bem como possíveis extensões do modelo são apresentadas no capítulo 6.

# Capítulo 2

## Contextualização do Estudo

Definidos os objetivos do trabalho, é necessário fazer uma descrição detalhada do contexto em estudo. Primeiramente, é apresentado o segmento de atuação da empresa em questão, seu histórico no Brasil e sua importância no atual cenário industrial. Em seguida, é realizada uma caracterização da empresa, enfatizando-se sua estrutura logística. São feitas considerações sobre as estratégias atuais mercadológicas e sobre as estruturas de suporte (notadamente tecnologia de informação) para apoiar tais estratégias.

Com a apresentação do contexto de estudo, é analisado o planejamento logístico da empresa no que concerne à distribuição de produtos acabados para um segmento específico de seu mercado, de forma a identificar a situação problema a ser abordada neste trabalho.

### 2.1 O Setor siderúrgico

#### 2.1.1 O aço e sua importância

O aço é uma liga que tem como principais elementos o carbono e o ferro (o carbono com teor máximo em torno de 2%). O carbono pode ser encontrado em várias formas na natureza, sendo que no processo siderúrgico usa-se o carvão mineral (em alguns casos utiliza-se o carvão vegetal). Já o ferro é encontrado em toda a crosta terrestre sob a forma de minério de ferro, um óxido de ferro misturado com areia fina. Portanto, o ferro

se encontra associado em estado natural com o oxigênio e sílica.

O processo clássico de fabricação do aço compreende as seguintes etapas (ARAÚJO [3]; INSTITUTO BRASILEIRO DE SIDERURGIA [18]):

1. Preparação da carga - O minério de ferro e o carvão, matérias-primas do processo, são previamente preparados para melhoria de rendimento do processo. Geralmente o minério é transformado em pelotas ou sinter, e o carvão é destilado para se obter o coque;
2. Redução - Os materiais preparados são carregados em um equipamento chamado alto forno. O oxigênio aquecido a uma temperatura de 1000°C é soprado na parte inferior do alto forno. O carvão age como combustível e ajuda no aumento da temperatura necessária à fusão do minério, associa-se ao oxigênio (que se desprende do minério) deixando livre o ferro. Este se liquefaz e dá origem ao chamado ferro gusa (a uma temperatura de +/-1600°C), que é o produto principal do processo de redução. Um subproduto gerado neste processo é a escória, usada na fabricação de cimento;
3. Refino - O ferro gusa é levado para a aciaria ainda em estado líquido para ser transformado em aço, através de queima de impurezas e adições. Parte do carbono é removido do gusa juntamente com impurezas, para dar origem ao aço na especificação química desejada. Este processo pode ocorrer em fornos elétricos ou a oxigênio;
4. Lingotamento - O aço líquido é solidificado em equipamentos adequados de lingotamento contínuo, dando origem aos tarugos ou blocos de aço, chamados de semi-acabados;
5. Laminação - Os semi-acabados são aquecidos em um equipamento chamado forno de rea aquecimento (se for laminação a quente) ou conformados diretamente (se for laminação a frio). Os materiais são processados por equipamentos chamados laminadores, os quais dão origem a uma grande variedade de produtos de aço, tais como arames, bobinas, perfis, vergalhões, chapas, etc.

A figura a seguir sintetiza o esquema de produção em uma indústria siderúrgica:

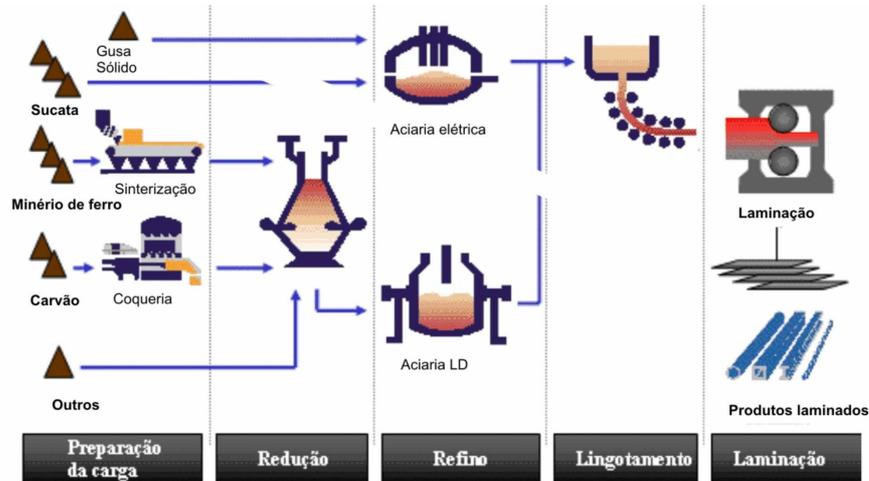


Figura 2.1: Fluxo de produção clássica do aço  
 Fonte: Instituto Brasileiro de Siderurgia (IBS) [18]

As usinas siderúrgicas classificam-se em dois tipos segundo seu processo de produção: integradas e semi-integradas. As integradas operam basicamente todos os processos descritos (opcionalmente preparação da carga) e utilizam aciarias a oxigênio. As semi-integradas utilizam aciarias elétricas e operam a partir do processo de refino. Partem principalmente de ferro gusa líquido ou sólido e sucata metálica para transformação do aço. Existem ainda unidades produtoras ditas não integradas que operam apenas uma parte do processo (por exemplo, redução ou laminação).

A produção de aços laminados em siderurgia pode ser dividida em dois grandes grupos de produtos: produtos longos, compreendendo barras, fios-máquina, vergalhões, perfis, tubos e trilhos; produtos planos, que compreendem chapas, bobinas e folhas para embalagens.

O aço é um material de grande utilidade na vida cotidiana devido às suas propriedades mecânicas e custo baixo quando comparado a produtos similares, tendo portanto um bom custo-benefício em suas aplicações. Encontra-se presente em vários segmentos da economia, como agricultura (arados, ceifadeiras, colheitadeiras), transporte (navios, aviões, caminhões), construção civil, indústria automobilística, energia, embalagens, diversos aparelhos domésticos e vários outros ramos.

Segundo o Instituto Brasileiro de Siderurgia (IBS) [17], as indústrias siderúrgicas representam hoje um dos alicerces de um país desenvolvido. Constitui-se um segmento de base, pois fornece produtos e equipamentos para todos os outros, sendo portanto de grande

valor estratégico para o desenvolvimento de uma nação.

## 2.1.2 A siderurgia no Brasil

### 2.1.2.1 Breve histórico

A história da siderurgia no Brasil pode ser considerada recente. Mesmo assim, a primeira iniciativa que se tem notícia em relação à produção de ferro data de 1587, quando Afonso Sardinha construiu em Sorocaba os primeiros engenhos de ferro do país. Após isso, houve um longo período de estagnação entre os finais dos séculos XVI e XVIII. No século XIX ocorreram alguns eventos relevantes, como a primeira corrida de ferro-gusa no Brasil (Congonhas do Campo-MG, em 1812) obtida pelo Barão de Eschwege (mineralogista alemão). Houve também a retomada da exploração do minério de ferro e a produção do ferro em Sorocaba, em 1818.

Foi no início do século XX que os empreendimentos siderúrgicos no Brasil se consolidaram. O grupo Gerdau lançou suas bases no ano de 1901, com a fundação da fábrica de pregos Pontas de Paris, em Porto Alegre-RS. Outro fato marcante foi a fundação da Companhia Siderúrgica Mineira no ano de 1917 em Sabará-MG, para em 1921 dar origem à fundação da Companhia Siderúrgica Belgo Mineira, através de aporte estrangeiro de capital.

A inauguração da Companhia Siderúrgica Nacional (CSN) por Getúlio Vargas em 1941 é considerada um marco na siderurgia brasileira. Com o início de suas atividades em 1946, a CSN viabilizou a implantação das primeiras indústrias nacionais, contribuindo de forma decisiva para o desenvolvimento do setor no Brasil.

Após a inauguração da CSN, várias outras siderúrgicas se instalaram no Brasil, tais como a Acesita, fundada em 1944 e a Usiminas, fundada em 1956 como uma empresa privada (em 1958, tornou-se uma *joint-venture* com a participação de capital estatal). A história dessas usinas se confunde com a própria história de fundação das cidades onde elas se situam. Outras siderúrgicas foram criadas, culminando mais recentemente com a inauguração da Companhia Siderúrgica de Tubarão (CST), em 1983, e da Açominas, em 1986.

Até o final da década de 80, o setor era composto por aproximadamente 43 empresas

(estatais e privadas) que operavam sob proteção de mercado. O panorama começou a mudar no início da década de 90, quando houve um grande movimento de privatização das usinas estatais (CSN, Usiminas, Acesita, etc), reestruturando radicalmente o parque siderúrgico brasileiro. Houve uma redução significativa de empresas devido às fusões e aquisições no setor.

### 2.1.2.2 Situação atual

Em 1993, oito empresas estatais com capacidade para produzir 19,5 milhões de toneladas (70% da produção nacional) tinham sido privatizadas. O grande aporte de capital privado e os movimentos de fusões e aquisições no setor contribuíram para que as empresas conseguissem melhorar seus resultados financeiros, possibilitando a retomada de investimentos em expansão de capacidade e atualização tecnológica. Citando fonte do IBS [19], entre 1994 e 2004, as siderúrgicas investiram US\$ 13 bilhões, o que acabou por resultar em um aumento de produção no parque siderúrgico brasileiro entre os anos de 1999 e 2004 da ordem de 32%. Esses investimentos inegavelmente possibilitaram um aumento da eficiência operacional, gerando maior poder de competitividade às empresas brasileiras em nível mundial.

Hoje o setor é formado por onze empresas, sendo que os quatro maiores grupos (Usiminas-Cosipa, Arcelor Brasil, Gerdau-Açominas e CSN) concentravam em 2004 aproximadamente 91% da produção nacional de aço bruto, segundo dados do anuário estatístico do IBS [16]. Isto demonstra a grande concentração de atividades do setor em poucas e grandes corporações. Foram empregadas no ano de 2004, entre efetivo próprio e terceiros, 90385 pessoas no setor. Ao contrário do que poderia se pensar, os postos de trabalho vêm subindo, pois em 1999 o número de pessoas empregadas era de aproximadamente 60000, segundo dados da mesma fonte citada acima.

O destaque que a indústria siderúrgica brasileira tem no cenário industrial nacional é expressivo. A seguir é apresentada uma tabela que evidencia alguns indicadores econômicos importantes:

<b>Indicadores Econômicos</b>	<b>Em milhões de US\$</b>
Faturamento em 2004	17639
Mercado interno	12191
Mercado externo	5363
Outras Receitas	85
Impostos pagos em 2004	3263
Contribuições sociais em 2004	285
Investimentos realizados 1994/2004	13970
Investimentos previstos 2005/2010	12552

Tabela 2.1: Indicadores econômicos do setor siderúrgico

Fonte: Anuário estatístico do IBS [16]

Dados preliminares de fechamento do ano de 2005 (IBS [16]) mostram que o valor total faturado (vendas sem frete) com a exportação de produtos siderúrgicos chega a US\$ 6,5 bilhões contra um total de exportações brasileiras de US\$ 118,3 bilhões, ou seja, atualmente 5,5% do valor das exportações brasileiras são atribuídas ao setor siderúrgico. O saldo comercial do setor (diferença entre exportação e importação) fechou 2005 com superávit de US\$ 5,6 bilhões, representando 12,6% do saldo da balança comercial brasileira de US\$ 44,7 bilhões.

A seguir são apresentadas na tabela 2.2 e na figura 2.2 as vendas dos produtos siderúrgicos brasileiros nos últimos anos:

Mercado	Produto	Quantidade (mil toneladas) por ano					
		1999	2000	2001	2002	2003	2004
Interno	Semi-acabados	481	567	571	573	590	689
	Laminados Longos	5476	5746	6182	6331	5555	6558
	Laminados Planos	7478	8625	8939	8922	9263	10536
	<i>Total Mercado Interno</i>	<i>13435</i>	<i>14938</i>	<i>15692</i>	<i>15826</i>	<i>15408</i>	<i>17783</i>
Externo	Semi-acabados	6379	6213	6365	7779	7238	6339
	Laminados Longos	968	1000	1015	1190	2093	1834
	Laminados Planos	2417	2108	1494	2191	3301	3285
	Outros	253	278	417	526	353	524
	<i>Total Mercado Externo</i>	<i>10017</i>	<i>9599</i>	<i>9291</i>	<i>11686</i>	<i>12985</i>	<i>11982</i>
Geral	<b>Total Geral</b>	<b>23452</b>	<b>24537</b>	<b>24983</b>	<b>27512</b>	<b>28393</b>	<b>29765</b>

Tabela 2.2: Vendas no mercado interno e externo de produtos siderúrgicos brasileiros

Fonte: Anuário estatístico do IBS [16]

Com base na tabela anterior é possível visualizar melhor a evolução nos últimos anos das vendas dos produtos siderúrgicos brasileiros, conforme ilustra figura a seguir:

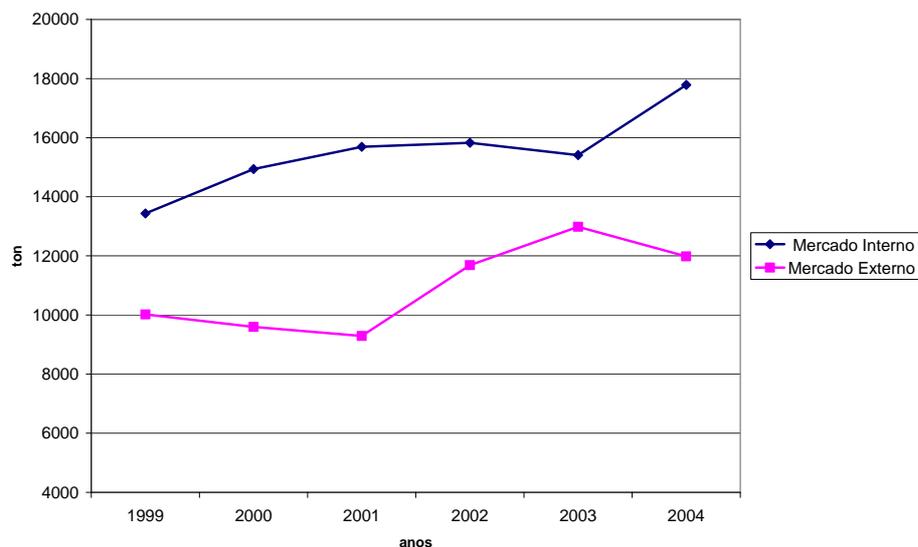


Figura 2.2: Evolução de vendas de produtos siderúrgicos brasileiros

Fonte: Anuário estatístico do IBS [16]

Nota-se uma tendência expressiva de crescimento das vendas de produtos de aço nos últimos anos (27% de 1999 a 2004). Para acompanhar este aumento de demanda, o setor deve monitorar atentamente sua capacidade instalada para projeções estratégicas.

Com relação à produção de aço bruto, a tabela 2.3 e a figura 2.3 mostram como o Brasil estava colocado em relação aos outros países e continentes produtores em 2004:

<b>País</b>	<b>(milhões de ton)</b>
China	272.5
Japão	112.7
EUA	98.9
Rússia	65.6
Coréia do Sul	47.5
Alemanha	46.4
Ucrânia	38.7
Brasil	32.9
Índia	32.6
Itália	28.4
França	20.8
Turquia	20.5
Outros	239.1

Tabela 2.3: Produção mundial de aço bruto em 2004

Fonte: Anuário estatístico do IBS [16]

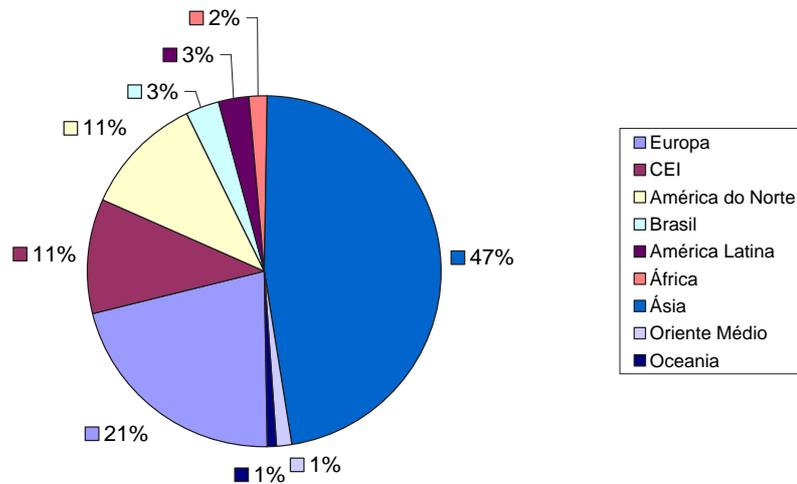


Figura 2.3: Participação relativa de cada região na produção mundial de aço bruto

Fonte: Anuário estatístico do IBS [16]

O Brasil ocupava em 2004 a oitava posição no *ranking* dos países produtores de aço bruto, com uma produção de aproximadamente 33 milhões de toneladas, contra um total de produção mundial de 1,056 bilhões. Na América latina, a produção brasileira corresponde a 51,5% do total da região; entretanto, em relação à produção mundial, corresponde a apenas 3%. A China destaca-se no cenário internacional, com produção de 272,5 milhões de toneladas, correspondendo a mais de 25% da produção mundial de aço.

Cabe ressaltar que o setor siderúrgico tem um importante papel no cenário industrial brasileiro, com grandes volumes de faturamento, grande participação na balança comercial, arrecadação e sendo grande empregador de força de trabalho. Todavia, em relação a alguns países do restante do mundo (notadamente China, Japão e EUA), ainda tem pouca representatividade no total de volume produzido no mundo.

Com um mercado interno dividido entre poucos e grandes concorrentes, a empresa que conseguir obter qualquer ganho em relação à concorrência, seja em nível de serviço ou em redução de custos, terá uma vantagem competitiva (CHRISTOPHER [12]). Vale lembrar que os processos descritos na seção 2.1.1 estão muito padronizados e difundidos; consequentemente, os produtos estão muito semelhantes. Portanto, a logística pode ajudar consideravelmente uma empresa a atingir um patamar de diferenciação competitiva.

## 2.2 A empresa

### 2.2.1 Histórico

A empresa em foco nesse trabalho é uma das mais tradicionais organizações do setor siderúrgico brasileiro, e sua história se confunde com a da própria siderurgia nacional. Ao longo de décadas, adquiriu e fundou instalações siderúrgicas e manteve participações em empresas de setores derivados do aço, tais como fabricação de arames, parafusos e cabos de aço. Sua atuação englobava até mesmo outros segmentos bem diferentes, como mineração, geração de energia, produção de carvão, reflorestamento e informática.

No ramo da siderurgia, até o início da década de 90, a empresa operava com apenas duas unidades de produção. Atendia basicamente aos mercados de aço para construção civil e aço para indústria.

Uma decisão estratégica ao final da década de 70 fez com que a empresa saísse do mercado de construção civil, passando a atuar somente no ramo de produtos industriais, dando ênfase à comercialização de produtos de maior valor agregado. Com o passar do tempo, o segmento de construção civil mostrou-se atraente, e suas concorrentes acabaram ganhando espaço nesse mercado. Com isso houve novo redirecionamento de foco, que culminou na aquisição de outras unidades industriais especialistas nesse segmento, visando o retorno a esse mercado.

Foram adquiridas, criadas e arrendadas unidades industriais nos estados de Minas Gerais, Espírito Santo e São Paulo. A empresa, portanto, saiu de uma condição de logística muito delimitada, com poucas unidades fabris, linha de produto específica e poucos clientes para uma condição de múltiplas instalações industriais (que produziam produtos semelhantes), linha mais diversificada de produtos e uma carteira maior e mais pulverizada de clientes.

Entre 1998 e 2003, houve reforços na política de ampliação de capacidade instalada, através da consolidação das aquisições em andamento e de novas iniciativas de expansão (inclusive no exterior). Um fator importante no processo de aceleração de expansão foi o aporte de capital obtido com a venda de algumas empresas de outros segmentos. A decisão era de manter a empresa nas suas atividades *core*, isto é, em siderurgia e fabricação de trefilados, visando a concentração de investimentos nas áreas priorizadas.

### 2.2.2 Situação atual

Atualmente a empresa ocupa papel de destaque no cenário da siderurgia brasileira, tendo produzido mais de 3 milhões de toneladas de produtos acabados laminados no ano de 2004, o que equivalia a aproximadamente 13% da produção nacional. Em relação à produção de aço bruto, respondeu por 10% da produção nacional.

Em termos de vendas, a empresa detém cerca de 34% de participação no mercado doméstico de laminados acabados longos e 43% de participação nas exportações do mesmo segmento. Obteve um faturamento líquido da ordem de R\$ 4,3 bilhões em 2004, empregando mais de 7000 funcionários.

No que tange ao sistema de produção e distribuição de produtos e serviços, a empresa possui a seguinte estrutura física de instalações em todo o Brasil:

- 3 usinas semi-integradas;
- 1 usina integrada;
- 1 usina não integrada (laminação);
- 2 fábricas de produtos trefilados;
- 19 centros de serviço;
- 8 centros de distribuição (fins logísticos);
- 25 lojas de atendimento ao varejo.

Em resumo, possui atualmente 7 unidades fabris, 19 centros de serviços, 8 centros de distribuição logísticos e 25 lojas de atendimento ao segmento varejista. Vale ressaltar que alguns centros de distribuição também têm a função de redistribuir produtos comprados de terceiros.

Através da estrutura relatada, a empresa busca atender à demanda do seu mercado (indústria em geral, construtoras, auto-construtores, serralherias, lojas de materiais de construção e revendas, estruturas metálicas, etc) através de três canais de distribuição principais:

- Vendas usina - se caracteriza para as vendas em grandes quantidades, geralmente para grandes clientes (como construtoras ou indústrias), onde não se paga nenhum preço especial pela mercadoria;
- Vendas usina com agregação de serviços de corte ou dobra - são as vendas descritas acima com entrega do aço já cortado e dobrado na medida certa para o cliente, visando agilizar o uso do produto. São vendas basicamente destinadas à construção civil. É pago um preço diferenciado pelo serviço prestado;
- Vendas ao consumidor final (varejo) - são vendas destinadas a qualquer consumidor final que se utilize dos produtos da empresa. Caracteriza-se por vendas feitas em pequenas quantidades e de forma pulverizada. As vendas têm um preço especial em relação à venda usina, pois é justamente a margem do sistema de varejo.

A tabela abaixo mostra como os canais de distribuição estão relacionados com as instalações da empresa, isto é, que tipos de instalações são utilizadas para atender cada canal:

<b>Canal de Distribuição</b>	<b>Tipo de instalação para distribuição</b>
Venda usina	Unidades fabris e centros de distribuição logísticos
Venda usina com corte e dobra	Centros de serviços próprios ou credenciados
Varejo	Lojas próprias ou credenciadas

Tabela 2.4: Instalações utilizadas para distribuição em cada canal

As lojas e centros de corte e dobra podem ser próprias da empresa ou de credenciados. O estoque e o faturamento nessas instalações, entretanto, são da empresa.

Cabe aqui comentar que a estratégia de diversificar os canais de distribuição é relativamente recente. Até meados dos anos 90, a empresa atendia todo seu mercado a partir das unidades produtivas. Percebeu-se que alguns clientes valorizavam a agregação de serviços à venda de aço, particularmente clientes de construção civil que tinham que cortar e dobrar o produto na medida certa para o emprego em obras. Com isso, as empresas que atendiam esse nicho de mercado passaram a oferecer esse serviço, através de redes próprias ou credenciadas de corte e dobra de aço. A empresa passou a assumir esse canal de distribuição no final dos anos 90.

Houve também a percepção de que oportunidades poderiam surgir através de uma rede de distribuição própria. Até o final dos anos 90, boa parte dos clientes da empresa eram grandes distribuidores que compravam grandes quantidades das fábricas a um preço pouco atrativo para a empresa. Tais distribuidores atingiam os consumidores finais repassando os produtos a um preço maior; ou seja, faziam o papel de intermediários na cadeia e conseguiam boas margens de lucro. Com esta motivação, surgiu a idéia de criação da rede de distribuição<sup>1</sup> da empresa, que é o foco principal desse trabalho.

## 2.3 A rede de distribuição da empresa

A partir do ano 2000, a empresa resolveu assumir a distribuição ao mercado de varejo, cortando os elos intermediários para atingir diretamente o consumidor final. Esta ação visava galgar melhores margens de lucro nas vendas dos seus produtos. Foi estruturada, então, a rede de distribuição.

Foi feito um mapeamento de todo território nacional para uma posterior divisão do Brasil em regiões, de acordo com o potencial de consumo de aço. Cada região mapeada necessitava da presença física da empresa no sentido mercadológico; ou seja, era necessário o estabelecimento de uma loja para comercialização em cada região mapeada.

Após a definição das praças, o passo seguinte era identificar se valia a pena estruturar uma loja própria ou credenciar um distribuidor local com a incumbência de vender os produtos para a empresa mediante uma remuneração acordada. A escolha entre terceirizar a estrutura ou não dependia do montante de custos fixos e do valor esperado de faturamento da praça. Definidos os tipos de estruturas para cada região, foi elaborado um cronograma de implantação para as lojas entrarem em operação.

### 2.3.1 Tamanho atual da rede de distribuição

Do ano 2000 até final de 2005, foram implantadas 25 lojas, das quais 8 são de estrutura própria da empresa e 17 são estruturas de credenciados. A disposição geográfica das lojas

---

<sup>1</sup>Desse ponto em diante, rede de distribuição é o termo designado ao conjunto de lojas que atendem o mercado varejista

está ilustrada na figura a seguir:

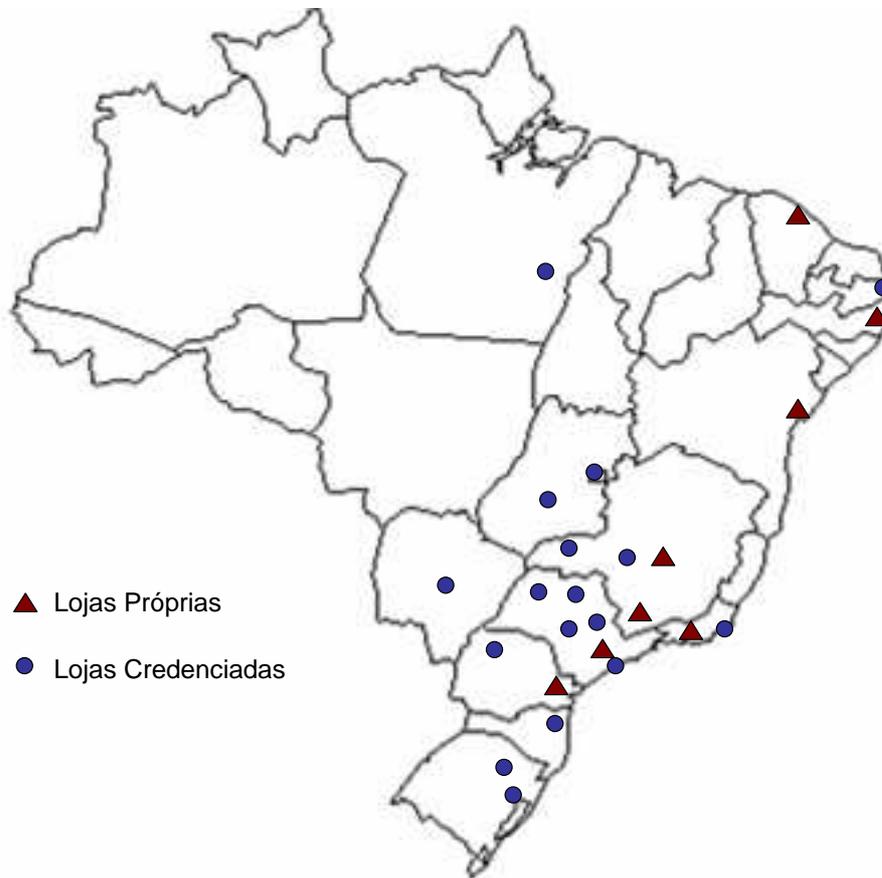


Figura 2.4: Mapa da rede de distribuição da empresa em dezembro de 2005

Observa-se claramente uma concentração de lojas próprias nas grandes capitais brasileiras: Curitiba, São Paulo, Belo Horizonte, Rio de Janeiro, Salvador, Recife e Fortaleza. A exceção é uma loja que se localiza na cidade de Pouso Alegre-MG. A explicação reside no fato de que com estrutura própria, mesmo com as margens de contribuição unitárias de cada produto, os custos fixos desembolsados pela empresa são maiores do que com estrutura de terceiros; portanto é preciso que haja um considerável volume de vendas para que se alcance o ponto de equilíbrio<sup>2</sup>. Para estas grandes cidades, o nível de atividade econômica da construção civil e indústrias é em geral superior às cidades de médio e pequeno porte, acarretando em uma maior demanda por aço (fato comprovado empiricamente pelo histórico de vendas da empresa), se justificando a estrutura própria de operação nesses casos.

<sup>2</sup>Considerações detalhadas sobre custos fixos, margem de contribuição e ponto de equilíbrio podem ser vistas em Martins [31]

A quantidade de lojas por região está detalhada na tabela a seguir:

Região	Quantidade de Lojas
RJ	2
SP	6
MG	4
Sul	5
Nordeste	4
Centro-Oeste	3
Norte	1
Total	25

Tabela 2.5: Quantidade de lojas por região

A rede de distribuição atende a uma variedade diversificada de produtos: vergalhões, arames, telas, pregos, barras, perfis, cantoneiras, chapas, rolos, tubos, treliças, produtos agropecuários e estribos. Esses grandes grupos de produtos podem ser detalhados em mais de 2000 itens de estoques (*skus*). Ou seja, a rede de distribuição administra mais de 2000 produtos diferentes.

Existem atualmente aproximadamente 14000 combinações de produto x loja. Em princípio existe um limite aproximado de 50000 combinações (25 lojas x 2000 produtos). No entanto, nem todos os produtos têm movimentações em todas as lojas. Mesmo assim, é um número expressivo que demonstra a complexidade de administração dessa rede.

Cada loja é suprida pela fábrica especialista em produzir determinado produto. A empresa possui 7 unidades fabris (conforme visto na seção 2.2.2); entretanto uma das unidades só produz um tipo de produto, o qual não é contemplado na rede de distribuição. Além disso, conforme citado na mesma seção, existem centros de distribuição de logística que também têm por finalidade distribuir produtos comprados de terceiros para a rede de distribuição. Existem 2 centros de distribuição nessa condição. Portanto, existem 8 possíveis fontes de fornecimento (6 unidades fabris e 2 centros de distribuição de produtos comprados) na rede de distribuição. Logo, se considerarmos a mesma abstraída em forma de um grafo<sup>3</sup>, existem 33 nós (8 fontes de suprimento e 25 lojas) e 200 arcos (8 x 25), nos quais trafegam

<sup>3</sup>Esse termo é definido na seção 3.2.1.1

mais de 14000 combinações de produtos x loja.

Vale ressaltar que a rede de distribuição está ainda em processo de formação. O número de lojas ainda tende a aumentar (a expectativa é no mínimo dobrar), produtos novos podem passar a ser ofertados no mercado pela empresa ou mesmo um produto existente pode passar a ser movimentado em uma loja que não o contemplava anteriormente em sua cesta de produtos.

Todo esse aumento de complexidade e, principalmente, a velocidade na qual ela está ocorrendo, exigia ações por parte da empresa para um correto planejamento e controle das novas operações. Grande parte das ações tomadas foi relativa ao suporte de tecnologia de informação (TI) para a operação da rede de distribuição.

### 2.3.2 A plataforma de tecnologia de informação

Em 1998, um pouco antes da criação da rede de distribuição, a empresa se via diante de algumas questões com as quais precisaria lidar. A incorporação de outras empresas (ver seção 2.2.1) trouxe o problema da coexistência de vários sistemas diferentes que não se comunicavam. Também havia a necessidade dos processos serem padronizados nas diversas empresas recém adquiridas (existiam várias fábricas produzindo produtos semelhantes, muitas vezes atendendo a clientes comuns e com procedimentos distintos). A solução encontrada para lidar com esses problemas foi a implantação de um sistema de gestão empresarial (*ERP*). Segundo Santos [44], tratam-se de sistemas transacionais que focam no nível operacional, ou seja, atuam na integração e controle das operações de uma empresa. O sistema foi implantado em meados de 1999 e integrou todas as unidades produtivas e administrativas da empresa. Os principais benefícios percebidos com sua implantação foram a consolidação de informações em uma única base de dados, facilidade de descentralização operacional e a integração em tempo real entre os diversos processos da empresa, como logística, compras, produção, vendas e financeiro.

A empresa fornecedora do sistema *ERP* também disponibilizou um pacote de soluções com múltiplas finalidades e objetivos, todas elas totalmente integradas ao referido sistema:

- Módulo de armazém de dados (*Data Warehouse*) - Plataforma que permite consolidar dados transacionais e gerenciais em um cubo de informações para extração e

- análises flexíveis, com amplas possibilidades de geração de relatórios personalizados;
- Módulo de gerenciamento de relacionamento com clientes (*CRM-Customer Relationship Management*) - Plataforma que permite um melhor gerenciamento do relacionamento com os clientes, visando a captura de clientes potenciais e a manutenção da lealdade dos clientes existentes;
  - Módulo de gerenciamento da cadeia de suprimentos (*SCM-Supply Chain Management*) - Plataforma de cunho analítico que faz o planejamento das atividades logísticas em um determinado nível de decisão. Geralmente envolvem ferramentas quantitativas avançadas como algoritmos de programação linear, programação inteira mista e heurísticas, como os algoritmos genéticos.

Com o advento da rede de distribuição, era necessário um bom suporte de informática para fazer frente a toda complexidade e novidade do novo segmento. Portanto, foram implantados os três sistemas acima citados. A possibilidade de integração plena com o sistema *ERP* já implantado foi decisiva para a manutenção da plataforma de TI no mesmo fabricante.

Para suportar as questões de logística, era necessário um sistema robusto que fosse capaz de resolver os seguintes problemas:

- Estabelecer um adequado desenho de suprimento às lojas;
- Sincronizar adequadamente oferta e demanda, de forma a se ter o controle dos níveis de estoque;
- Garantir um adequado instrumento de previsão de vendas;
- Otimizar a programação de produção nas fábricas, visando minimizar os custos e atender a demanda da empresa;
- Garantir o ressuprimento de cada produto em cada loja;
- Otimizar o uso dos recursos de transporte da empresa.

Os sistemas de *SCM* tentam planejar as operações logísticas, visando atender esses objetivos em cada nível de decisão pertinente.

### 2.3.2.1 Sistemas de *SCM* (*Supply Chain Management*)

A principal diferença entre os sistemas de *SCM* e os sistemas *ERP* reside no fato do último não possuir muita capacidade analítica para ajudar em decisões de planejamento e estratégia. Santos [44, p.30] faz a seguinte observação sobre os sistemas *ERP*: "Eles são ótimos em informar aos gerentes o que está acontecendo, mas não em informar o que deve estar acontecendo". Existe, entretanto, uma complementaridade entre os sistemas. O bom uso de um sistema de *SCM* está condicionado à disponibilidade e confiabilidade de dados para que se otimize um planejamento em dado nível. Da mesma forma, um sistema *ERP* sozinho controla e integra satisfatoriamente informações em tempo real, mas pouco melhora o processo.

Um sistema de *SCM* geralmente se apresenta na forma de vários módulos, cada qual tratando um tipo de decisão a ser tomada pertinente a um horizonte de tempo específico. Segundo Bradley, Hax e Magnanti [9], os módulos de um sistema de apoio à decisão são dispostos de acordo com a estrutura proposta por Anthony e Govindarajan [2]. Os autores sugerem que a validade de um planejamento seja restrita a um horizonte pré-definido, por isso propõem a estratificação dos diversos níveis de planejamento de acordo com seu horizonte. Segundo eles, as decisões podem ser de nível estratégico, tático e operacional.

Os módulos do sistema de *SCM* que a empresa utiliza estão enumerados abaixo com uma breve descrição de suas funcionalidades:

1. **Módulo de desenho da rede (*Network Design*<sup>4</sup>)** - É o módulo de planejamento da rede logística do sistema de *SCM*. Orienta a tomada de decisões de cunho estratégico, no sentido de dimensionar a melhor rede logística para a empresa. Basicamente, este módulo trabalha com dois tipos de decisões:
  - atribuição de locais - define a estrutura de atendimentos, isto é, que produtos serão produzidos em quais fábricas, como as demandas estão associadas aos pontos de suprimento (fábricas e armazéns), como os armazéns estão associados às fábricas, que rotas serão utilizadas, e quais são os custos associados à melhor estrutura de atendimento identificada. Não há análise de abertura ou fechamento de locais. O método de solução baseado em custo para definir a

<sup>4</sup>Um trabalho detalhado sobre este módulo pode ser encontrado em Pedrosa [43]

estrutura de atendimento está fundamentado em algoritmos de programação linear (ver seção 3.2.1).

- mudanças estruturais da rede - define a estrutura de atendimentos e também analisa a necessidade de ampliação ou redução da estrutura da rede. Por exemplo, dados alguns armazéns candidatos potenciais a serem instalados, o sistema analisa qual o número ótimo de armazéns e onde eles devem ser localizados, definindo também a estrutura de atendimento da rede resultante. Este método de solução baseado em custo utiliza algoritmos de programação linear inteira mista. Em seu trabalho, Oliveira [38] encontrou resultados similares aos do sistema de *SCM* através da formulação de um modelo de programação linear inteira mista, tendo como referencial o modelo de Geoffrion e Graves [23].

2. **Módulo de planejamento da demanda (*Demand Planning*)** - Este módulo define o plano de demanda em um nível adequado de planejamento que será base para os módulos posteriores (táticos e operacionais), visando o planejamento das operações da empresa. Com base no histórico de vendas obtido da plataforma do armazém de dados, este módulo utiliza-se de modelos estatísticos que analisam uma série histórica de vendas e projetam uma demanda para o horizonte futuro. Esta previsão estatística é disponibilizada para o conhecimento da força de vendas, que também faz uma previsão de demanda com base em conhecimentos de mercado. Com base nas informações de previsão de demanda estatística e de mercado, o planejador elabora uma previsão que tende a ser um consenso entre as informações disponíveis. Os critérios para estabelecimento desta previsão de consenso são flexíveis e podem ser alterados. Esse método de planejamento da demanda é enfatizado no artigo de Tanwari e Betts [45]. Os autores colocam que a melhor estimativa da demanda futura geralmente advém de uma combinação entre o julgamento gerencial e ferramentas de previsão estatística.

3. **Módulo de planejamento do suprimento da rede (*Supply Network Planning*)** - Este módulo é também conhecido como *Master Planning*, pois elabora o plano tático de operações com base nos resultados dos módulos anteriores. Definida a configuração da rede no módulo de planejamento de redes e a demanda a ser atendida no horizonte de tempo determinado, este módulo considera, no momento do seu planejamento, vários dados transacionais obtidos no sistema *ERP*, tais como pedidos de venda em carteira, situação de estoque, ordens de transferências e produção

firmes. O sistema de *SCM* faz a leitura de todas as necessidades de demanda no horizonte considerado e busca atendê-las, gerando o plano de produção e distribuição tático sujeito às restrições de armazenagem, produção e expedição, visando ainda a minimização dos custos de produção, transporte e estocagem da rede como um todo. Sua frequência de replanejamento é mensal.

4. **Módulo de planejamento da produção (*Production Planning*)** - É o módulo que faz a programação de produção e o sequenciamento detalhado das ordens de produção geradas pelo módulo tático nas fábricas. Seu horizonte de atuação é de curto prazo, podendo ser diário. Determina as datas de atividades de cada máquina e suas alocações, considerando em detalhes as restrições do processo produtivo de cada produto, as datas limites de atendimento das demandas confirmadas, os calendários de disponibilidade dos equipamentos e os tempos de *setup* por máquina entre cada troca de programa. O objetivo pode ser minimizar o custo total de *setup* ou atraso, sujeito às restrições acima citadas. Para este módulo, geralmente o sistema de *SCM* disponibiliza algoritmos heurísticos (como genéticos), dada a complexidade do problema.
  
5. **Módulo de planejamento do transporte (*Transportation Planning*)** - Este módulo é o responsável por programar a utilização da frota de veículos e as necessidades de transporte. É também um módulo de decisões operacionais (curto prazo). Prevê a consolidação de ordens de entrega dentro de um horizonte de tempo, programação de veículos, determinação de rotas e alocação de cargas junto aos transportadores cadastrados. Atualmente este módulo encontra-se em implantação na empresa estudada; portanto, suas funcionalidades e critérios de otimização ainda estão sendo avaliados.

A figura a seguir ilustra a disposição dos módulos do sistema de *SCM* utilizados na empresa e o horizonte de atuação no planejamento de cada um deles:

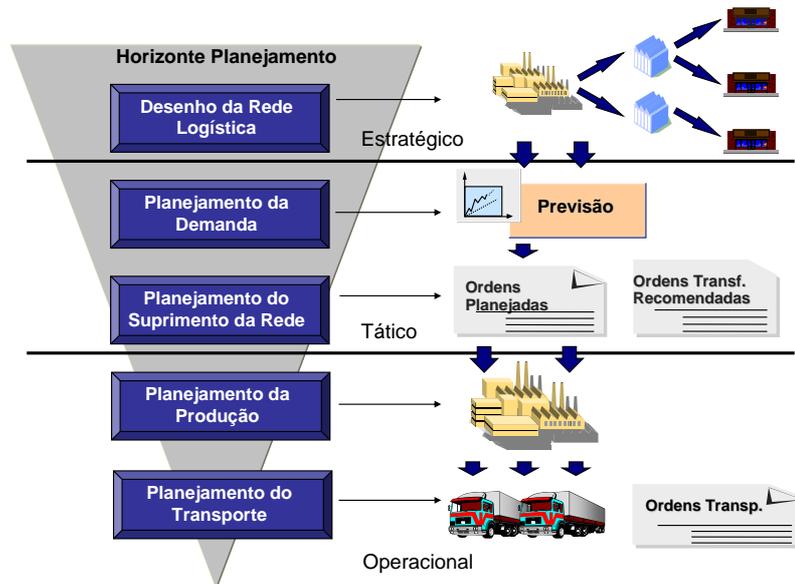


Figura 2.5: Módulos do sistema de *SCM* e seus horizontes de atuação

Observa-se que as decisões de nível estratégico são tomadas no módulo de desenho da rede logística, o qual possui um horizonte de planejamento mais longo. A configuração da rede impacta nas decisões dos módulos subsequentes, notadamente no módulo de planejamento do suprimento da rede. As decisões táticas de planejamento da demanda e de suprimento da rede refletem nos módulos mais operacionais (planejamento da produção e planejamento do transporte), os quais possuem horizonte mais curto de atuação.

### 2.3.3 Planejamento logístico da rede de distribuição

Conforme comentado no início da seção 2.3, o estabelecimento das lojas ao longo das regiões mapeadas é uma exigência do marketing da empresa, de acordo com as diretrizes estratégicas definidas por ocasião da implementação da rede de distribuição. Portanto, a rede logística considerada compreende apenas as lojas e os pontos primários de suprimento de produtos, ou seja, as fábricas e os centros de redistribuição de produtos comprados (os demais centros de distribuição são utilizados como canal de distribuição de vendas usina).

Com relação ao planejamento logístico estratégico dessa rede, nenhuma análise no que tange à localização de instalações foi necessária, pois existe a premissa de que as lojas e fábricas são fixas. Com relação à definição de estrutura de atendimento, nenhuma investigação mais profunda foi realizada; qualquer loja é atendida diretamente pela fonte

primária de suprimento do produto vendido pela loja.

Tendo se fixado o desenho da rede de distribuição e sua estrutura de atendimento, a empresa realiza todo mês o planejamento logístico da rede de distribuição, que envolve os módulos do sistema de *SCM* descritos anteriormente (à exceção do módulo de desenho da rede). São realizados os planejamentos táticos e operacionais, descritos resumidamente abaixo:

1. Geração da previsão estatística para a demanda do mês seguinte;
2. Registro da previsão de demanda pela força de vendas com base em dados de mercado;
3. Consolidação e análise dos dados de previsão pelo planejador central, o qual efetua a previsão de consenso. É encerrado o planejamento da demanda;
4. Geração dos planos macros de distribuição de cada produto para cada loja, e de produção de cada produto em cada fábrica. É encerrado o planejamento do suprimento da rede;
5. Sequenciamento detalhado nas fábricas das ordens de produção geradas pelo planejamento macro. O módulo de produção (assim como o de planejamento do suprimento da rede) leva em conta também dados transacionais, como demandas firmes e pedidos já colocados;
6. Cumprimento do plano ao longo do mês com os devidos ajustes. Em função da falta de aderência na previsão de demanda de alguns produtos, os mesmos acabam na prática sendo ressupridos através de uma análise contínua de revisão de estoque.

## 2.4 Situação problema

Na ocasião da instalação das lojas, não foi feito um planejamento da rede logística que possibilitasse identificar qual seria a melhor estrutura de atendimento para esta rede. Na prática, para uma loja qualquer, todo o fluxo de atendimento é feito diretamente pelas fontes primárias de suprimento (fábricas e centros de distribuição de produtos comprados). Não é considerado, por exemplo, se uma determinada loja deveria ser atendida diretamente de um ponto de suprimento primário ou por intermédio de uma outra loja, e quais seriam as análises de custos pertinentes a este cenário.

Um ponto importante que é consequência do exposto anteriormente é que seria interessante avaliar se há necessidade de haver estoque de um determinado produto em todas as lojas (ao menos de uma determinada região). Conforme descrito na seção 2.3.1, a rede de distribuição atualmente contempla mais de 14000 combinações de produtos-lojas, podendo chegar a um número de 50000 combinações, somente para as lojas atuais.

Os produtos comercializados na rede têm perfis muito diferentes. Alguns são produtos de alto giro, outros de baixo ou médio giro. Da mesma forma, existem produtos com custos unitários muito diferentes. Produtos com grande assertividade das previsões de demanda, outros nem tanto. Ballou [6, p.48] sugere que as estratégias logísticas de distribuição e localização de estoques devem ser segmentadas para cada tipo de produto. Ele afirma que "estocar todos os produtos em todas as localizações pode simplificar a administração, mas essa estratégia nega as diferenças inerentes entre produtos e seus custos e acarreta custos de distribuição maiores que os necessários".

Conforme Eppen [20] e Zinn, Levy e Bowersox [50] apontam, quanto maior o número de instalações com estoque em uma rede, maior a quantidade de estoque de segurança<sup>5</sup> total necessária para manter um certo nível de serviço (mensurado pela disponibilidade de produto). Em contrapartida, quando o estoque é centralizado em um menor número de instalações, o montante total do estoque de segurança é reduzido. Ainda, mesmo o estoque de ciclo (para atender a demanda média de uma loja) pode ser reduzido com a centralização de estoques sob algumas premissas (ver seção 3.3.2).

O valor total imobilizado em estoque na rede de distribuição atualmente gira em torno de R\$ 43 milhões; logo, qualquer possibilidade de redução desse valor, sem perda no nível de serviço prestado, é muito importante. Como o módulo de desenho da rede do sistema de *SCM* não considera questões de política de estoques na otimização, faz-se necessário desenvolver um modelo próprio para análise de possíveis centralizações de estoque.

Tendo em vista os pontos acima ressaltados, surge o problema de se determinar o melhor desenho da rede de distribuição (estrutura de atendimento e grau de centralização de estoques das lojas) para cada produto.

---

<sup>5</sup>O conceito de estoque de segurança é apresentado na seção 3.1.2

# Capítulo 3

## Fundamentação Teórica

No presente capítulo é realizado o levantamento do arcabouço teórico que norteia o estudo do tema em questão. O conteúdo é dividido em três seções principais. Primeiramente, são abordados os pontos importantes da logística empresarial dentro do contexto da situação problema. Em seguida, são apresentadas breves considerações sobre a pesquisa operacional e programação matemática, como ferramentas importantes de suporte às decisões, notadamente às de natureza logística. Os principais tipos de modelos matemáticos são apresentados e comentados. Na seção seguinte, é realizada a revisão da literatura acerca dos problemas de localização/desenho de rede e centralização de estoques. Um breve histórico com algumas formulações são comentadas. Finalmente, é apresentado o modelo referencial, que é a base do modelo proposto para esta dissertação.

### 3.1 Logística Empresarial

A logística é praticada há muito tempo em todo o mundo. Desde épocas antigas, era necessário que as pessoas restringissem seu modo de vida às condições dos sistemas de armazenagem e movimentação de mercadorias disponíveis. As mesmas não estavam necessariamente disponíveis quando e onde se desejava. Mesmo hoje em dia, em alguns países com precária infra-estrutura, o consumo de produtos e serviços ainda pode ser razoavelmente limitado pelas condições de tempo e distância entre oferta e demanda.

Atualmente, a importância da logística no mundo é ímpar. Os avanços nos meios de comunicação, nos modais de transporte, nas tecnologias de gerenciamento de estoques, dentre outros aspectos, propiciaram o aumento da velocidade do fluxo de produtos ao longo de cadeias de suprimentos. Esses fatores foram importantes para sustentar estratégias de operações cada vez mais globais. Outro ponto que faz da logística um assunto extremamente relevante no contexto macroeconômico são os custos envolvidos em suas atividades. Dados de uma pesquisa realizada pelo Centro de Estudos em Logística do Instituto de Administração da Universidade Federal do Rio de Janeiro - COPPEAD/UFRJ (ver LIMA [28]), mostram que o montante de todos os custos logísticos no Brasil em 2004 chegou a R\$ 222 bilhões, equivalente a 12.6% do Produto Interno Bruto (PIB) nacional.

A missão da logística é dispor de forma eficiente para a empresa seus produtos ou serviços certos, na hora certa, no lugar certo e nas condições desejadas (BALLOU [6]). Bowersox e Closs [8] sugerem ainda que a logística deve ser entendida como um esforço integrado com o objetivo de criar valor para o cliente pelo menor custo possível.

A logística está sendo vista atualmente sob um novo conceito, a Logística Empresarial (BALLOU [6]). Compreende a gestão integrada de atividades visando a adição de valor aos produtos e serviços. Embora esse termo seja recente, suas idéias são antigas. Ballou [6] ressalta que em 1844 o francês Julie Dupuit já discutia aspectos de compensação entre custos e benefícios para diferentes modais de transporte. Esses conceitos foram evoluindo ao longo dos anos (principalmente no ramo militar), mas a prática efetiva de gestão integrada das atividades logísticas é relativamente nova, e se deve, principalmente, aos avanços obtidos nas plataformas de tecnologia de informação (TI) e das comunicações.

Segundo Ballou [6], a Logística Empresarial é também conhecida como gerenciamento da cadeia de suprimentos. Esta cadeia envolve a execução de várias atividades, as quais são classificadas, segundo o autor, em:

1. Atividades-chave - Envolvem o estabelecimento de padrões de serviço ao cliente, decisões de transporte, administração de estoques e o fluxo de informações e processamento de pedidos. São as atividades mais comuns e as que mais impactam no custo logístico total.
2. Atividades de suporte - Envolvem atividades de armazenagem, manuseio de materiais, compras, embalagens, *interface* com operações e manutenção da informação. São atividades consideradas contribuintes para a realização da missão logística, não

ocorrendo necessariamente em todo canal logístico, e em todas as empresas.

As atividades-chave estão no circuito crítico do canal logístico. São essenciais à coordenação das tarefas e sucesso da missão logística (BALLOU [6]). Os elementos chaves de um sistema logístico são:

- Nível de serviço ao cliente - Estabelecido, em princípio, pelas áreas de marketing e logística (BALLOU [6]). Determina o grau de preparação do sistema logístico. Os custos logísticos aumentam conforme a elevação requerida no nível de serviço prestado pelo sistema. Existem várias dimensões de serviço ao cliente: desempenho em estoque (probabilidade de falta de produtos), tempo de entrega, consistência de entrega, assertividade no preenchimento do pedido, entre outras<sup>1</sup>. Neste trabalho, o nível de serviço é considerado em termos da probabilidade de não faltar produtos;
- Estoque - O estoque adiciona valor de tempo aos produtos. É responsável por considerável parcela dos custos de um sistema logístico, sobretudo no Brasil, onde o custo de capital é alto. Segundo Lima [28], o custo com posses de estoque em 2004 no Brasil representou uma parcela de R\$ 69.8 bilhões, correspondendo a 3.9% do PIB brasileiro, contra 2.1% do PIB dos Estados Unidos. Existem várias razões para a formação de estoques, dentre as quais pode-se citar o gerenciamento de incertezas, necessidade de equilíbrio entre oferta e demanda, especialização geográfica e estoques intermediários (BOWERSOX;CLOSS [8]);
- Transporte - Este elemento é considerado o mais visível de um sistema logístico, pois envolve o fluxo de produtos e materiais pelo canal, adicionando, assim, valor de lugar aos produtos. Novamente citando os dados da pesquisa do Centro de Estudos em Logística (LIMA [28]), o transporte é o elemento de maior impacto em custos nos sistemas logísticos do Brasil e Estados Unidos, absorvendo respectivamente 7.5% e 5.0% do PIB;
- Processamento de pedidos - Elemento que aciona a movimentação de produtos e entrega de serviços aos clientes (BALLOU [6]). Geralmente apresenta custos bem menores do que os elementos de estoque e transporte.

A cadeia de suprimentos de uma empresa é segmentada de forma semelhante por diversos autores - todos apontam a importância da integração das atividades com os diversos

<sup>1</sup>Para mais detalhes sobre o assunto, consultar Ballou [6], capítulo 4

agentes ao longo da cadeia. Para Ballou [6], o gerenciamento da cadeia de suprimentos abrange duas grandes áreas (ou canais) que envolvem a administração das atividades previamente descritas:

1. Suprimento físico - corresponde ao hiato de tempo e espaço entre as fontes de materiais e matérias-primas de uma empresa e seus pontos de processamento;
2. Distribuição física - corresponde ao hiato de tempo e espaço entre os pontos de processamento da empresa e seus clientes.

A fig:

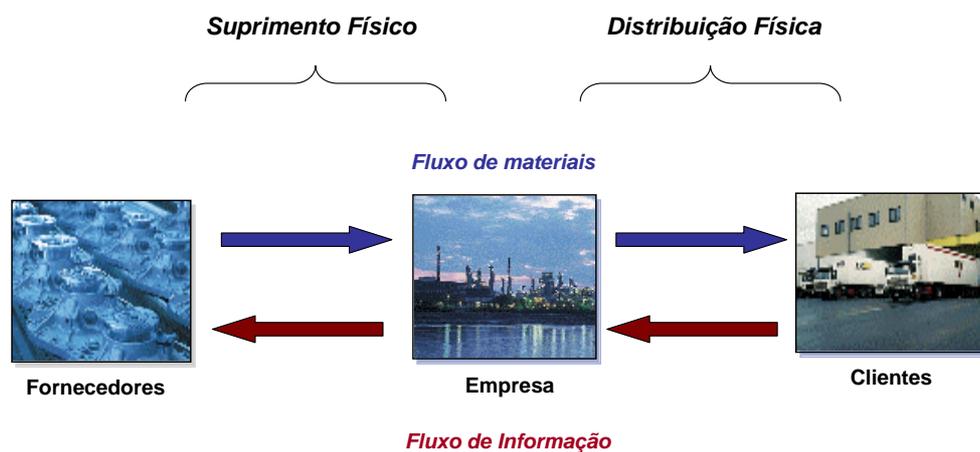


Figura 3.1: Representação de uma cadeia de suprimentos de uma empresa

Fonte: Adaptada de Ballou [6]

Conforme abordado no capítulo 2, o contexto deste trabalho engloba o estudo de uma rede distribuição de uma empresa do setor siderúrgico. Portanto, o foco das seções seguintes está direcionado aos aspectos de logística empresarial que afetam o canal de distribuição física de uma cadeia de suprimentos.

### 3.1.1 Planejamento logístico

Segundo Kotler [27], para uma organização atingir suas metas e ter sucesso em seu segmento, é fundamental que ela siga uma orientação de marketing. Significa ser mais efetiva

que a concorrência na criação, entrega e comunicação de valor para o cliente. O autor prega a adoção de uma visão de marketing integrada na qual se reflita e planeje ações para o mercado, ações que devem estar contempladas na definição do *mix* de marketing. Este termo é utilizado para classificar as ferramentas de marketing em quatro grandes grupos: Produto, Preço, Promoção e Praça. O componente do *mix* de marketing Praça se refere a questões de logística da empresa (canais de distribuição, estoque, transporte, políticas de cobertura, etc). Ballou [6] sugere que o escopo das atividades logísticas pode ser visto como elo de ligação entre as áreas de marketing e operações.

Para se estabelecer uma estratégia de logística consistente e alinhada com a estratégia de marketing e demais diretrizes da organização, é fundamental a elaboração de um planejamento logístico integrado (BALLOU [6]; BOWERSOX;CLOSS [8]).

Segundo Ballou [6], o planejamento logístico tenta resolver quatro das maiores áreas problemas:

- Objetivos do serviço ao cliente - Esta área é a interface entre a logística e o marketing. Define quais requisitos de serviço ao cliente o sistema logístico deve atender, portanto, o projeto do sistema logístico começa com esta definição;
- Estratégia de localização de instalações - A essência da estratégia de localização é encontrar a distribuição de mais baixo custo. Para isso, as decisões de localização visam definir o número, tamanho e localização das instalações, a estrutura de atendimento da demanda e o fluxo de produtos entre as instalações;
- Estratégia de estoque - Define os níveis de estoque a serem mantidos nas instalações, a localização dos estoques ao longo da rede e o grau de centralização dos estoques entre as diversas instalações;
- Estratégia de transporte - Envolve decisões sobre o tipo de modal utilizado, tamanho do carregamento, grau de consolidação do embarque e programação de transportadores.

O serviço ao cliente é o resultado da formulação das estratégias de estoque, localização e transporte (BALLOU [6]). Ainda segundo o autor, o planejamento logístico pode ser comparado a um triângulo de decisões inter-relacionadas que devem ser consideradas conjuntamente. A figura a seguir ilustra esse raciocínio:

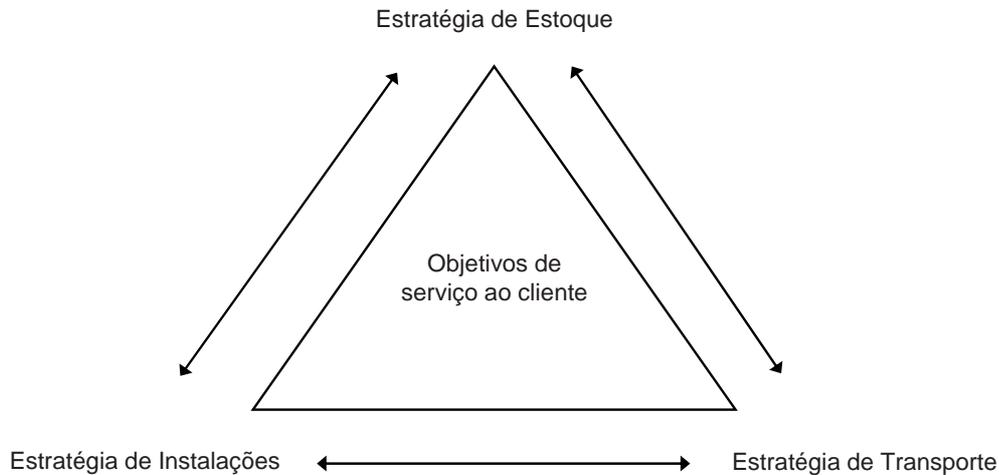


Figura 3.2: Triângulo de decisões logísticas interligadas

Fonte: Adaptada de Ballou [6]

Wanke [48] propõe que o conjunto das decisões integradas de estoque, transporte e instalações estabelecidos por uma empresa denomina-se posicionamento logístico. O autor ressalta que o posicionamento logístico pode apoiar a execução de uma determinada política de atendimento ao cliente ou mesmo fornecer subsídios importantes para a empresa elaborar ou reformular a política de atendimento. Ainda segundo o autor, existem dois tipos básicos de políticas de atendimento ao cliente: política de antecipação à demanda e política de reação à demanda.

Em uma política de antecipação total à demanda, o fluxo de produtos é empurrado pela cadeia em direção ao consumidor final. Neste caso, a empresa normalmente utiliza uma política de previsão de vendas, produção para estoque, estoques descentralizados e próximos aos clientes, modais mais baratos e consolidação de carregamentos.

Em uma política de reação total à demanda, o fluxo de produtos é puxado pelo elo mais próximo do consumidor final. Normalmente pouco se depende de previsões de demanda; produz-se contra pedido, utilizam-se poucas instalações; os estoques se encontram mais centralizados e modais de transporte expressos são mais utilizados.

A coordenação do fluxo de produtos (empurrar ou puxar) depende basicamente de dois fatores: visibilidade da demanda e tempo de resposta das operações (WANKE [49]). Em situações onde o tempo de resposta das operações é demasiadamente longo, a empresa não tem alternativa senão planejar parte ou a totalidade de suas operações, pois não é

possível aguardar um pedido para iniciar as atividades. Em contrapartida, se os tempos de operação são curtos, existe a possibilidade de reagir à demanda real. No tocante à visibilidade da demanda, se todos os elos da cadeia compartilham a informação de demanda em tempo real, existe a possibilidade de reação à demanda: fato que seria

		Tempo de resposta Produção/Distribuição	
		Longo	Curto
Visibilidade da demanda	Total	Sistemas Híbridos - Empurrar / Puxar	Puxar (Reação)
	Nenhuma	Empurrar (Antecipação)	Sistemas Híbridos - Empurrar / Puxar

Figura 3.3: Impacto do tempo de resposta das operações e da visibilidade da demanda na escolha da política de atendimento

Fonte: Adaptada de Wanke [49]

De acordo com o quadro anterior, um sistema pode ter uma configuração híbrida. É o caso de uma empresa que tenha tempos de operação longos e visibilidade de demanda. Se, por exemplo, a maior parte do tempo de resposta é devido à produção e existe visibilidade da demanda em tempo real, pode ser que existam oportunidades para reagir à demanda na distribuição. Uma análise cuidadosa para cada contexto e combinação de fatores deve ser realizada para se determinar a política de atendimento mais indicada.

Wanke [48] sugere que as decisões de posicionamento logístico (que dependem de fatores externos e internos à empresa) devem suportar a escolha da política de atendimento de menor custo logístico para determinado nível de serviço.

### 3.1.1.1 Projeto da rede logística

Ballou [6] sustenta que o problema de planejamento logístico é um problema de projeto, e que pode ser representado sob a abstração de uma rede de ligações e nós. Nos modelos matemáticos, geralmente problemas de projeto de rede são representados por um *grafo* (ver seção 3.2.1.1).

Quando a empresa é nova e não existe nenhum sistema logístico ou quando uma nova linha de produtos é inserida no mercado, a necessidade de planejamento de uma rede é óbvia (BALLOU [6]). Para o caso de uma rede já existente, existem alguns fatores que sugerem a necessidade de uma reavaliação de um projeto de rede:

1. Demanda - A dispersão geográfica da demanda influencia a configuração de uma rede de distribuição. Eventuais mudanças desproporcionais entre regiões nos níveis de demanda justificam uma reavaliação de uma rede.
2. Serviço ao cliente - Quando níveis de serviço são alterados em função de forças competitivas ou revisão de políticas faz-se necessária uma reavaliação da rede, uma vez que todo posicionamento logístico pode ser alterado para se adaptar aos novos objetivos.
3. Características de produto - Custos logísticos são sensíveis a aspectos do produto, como valor agregado, peso, perfil de venda, entre outros. Quando muitos produtos de perfis diferentes seguem a mesma estratégia, pode ser coerente um estudo para avaliar a necessidade de segmentações de estratégia.
4. Custos logísticos - Este aspecto é fundamental na determinação da necessidade de replanejamentos em uma rede. A configuração de uma rede é o resultado de inúmeras compensações entre custos logísticos. Se um determinado custo tem seu patamar alterado, pode ser que a melhor configuração seja diferente da anteriormente identificada.
5. Montagem de preços - Alterações de políticas de preço (exemplo, se uma mercadoria é vendida sem o valor do frete e depois passa a ser vendida com o frete) podem afetar a configuração da rede, uma vez que geralmente empresas planejam seus sistemas logísticos de acordo com os custos sob os quais elas são responsáveis.

Para Ballou [6] e Bowersox e Closs [8], alguns princípios e conceitos devem ser considerados em um projeto de rede logística:

- **Custo total e análise de compensações de custos** - Para se projetar uma rede logística é essencial considerar as compensações (*trade-offs*) entre os custos envolvidos. Padrões de custo de várias atividades da empresa podem apresentar características que as põem em conflito entre si. O ideal é que se busque um equilíbrio otimizado entre eles. Um caso clássico de *trade-off* de custos diz respeito à determinação do tamanho do lote de ressuprimento de um depósito qualquer (ver BALLOU [6], capítulo 10). Existe o custo de manutenção de estoques que é proporcional ao tamanho do lote, ou seja, quanto maior o lote, maior o estoque médio do depósito entre ressuprimentos sucessivos e maior o custo de posse do estoque. Existe também o custo de obtenção do estoque, ou custo do ressuprimento, que é o mesmo independente do tamanho do lote. Logo, para lotes maiores, tem-se um custo unitário de aquisição menor. Os custos apresentam comportamentos conflitantes: o custo de manutenção aumenta com o tamanho do lote, enquanto o custo

r

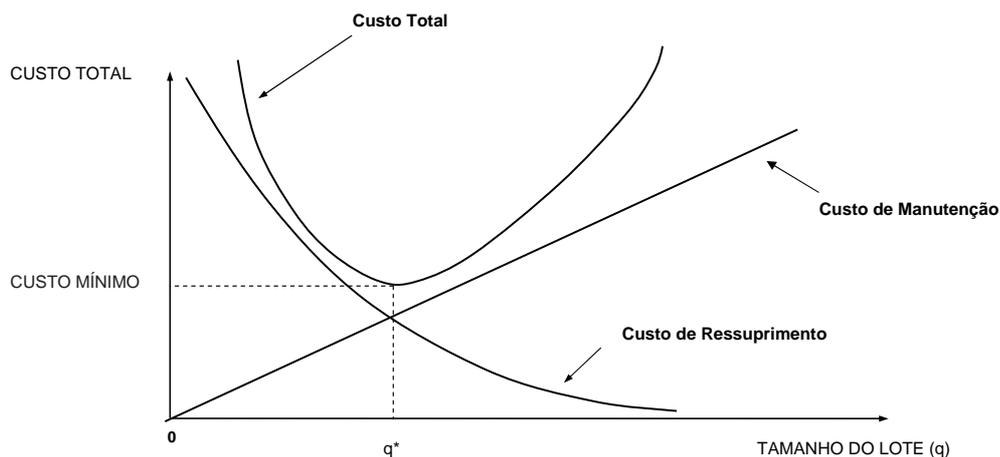


Figura 3.4: Compensação de custos relevantes de estoque com o tamanho do lote

Fonte: Adaptada de Ballou [6]

- **Distribuição diferenciada** - Este princípio é fundamentado na segmentação logística. Segundo Ballou [6], nem todos os produtos devem ser oferecidos ao mesmo nível

de serviços ao cliente. Diferentes perfis de venda e diferentes características entre produtos sugerem que múltiplas estratégias de distribuição devem ser adotadas. Este princípio também se aplica à localização de estoques. Wanke [48] e Ballou [6] concordam que estocar todos os produtos em todos os locais, sem analisar as diferenças entre eles pode acarretar custos de distribuição maiores que os necessários. Por sua vez, Wanke [48] assinala que alguns aspectos favorecem a centralização de estoques em uma rede, como por exemplo, alto valor agregado de produtos, alto grau de obsolescência, acesso à informação em tempo real, baixa previsibilidade de vendas, baixo giro de estoques, entre outros fatores;

- **Postergação (adiamento)** - O princípio do adiamento (ou postergação) é oposto à antecipação. A lógica de postergar operações reside no argumento de redução dos riscos associados à diferenciação de forma, lugar e tempo dos produtos que ocorrem durante as operações de manufatura e distribuição (PAGH; COOPER [40]). O adiamento da manufatura consiste em deixar o produto em uma forma neutra, uma plataforma para diversas combinações possíveis de forma, até o pedido firme do cliente, quando então o produto é manufaturado de acordo com as especificações exigidas. Na distribuição, o adiamento consiste em se deixar um estoque em uma ou mais instalações estratégicas, para só enviar os produtos aos demais locais no último instante possível, diminuindo, assim, os riscos de encalhes de estoque em várias localidades. Pagh e Cooper [40] elaboraram uma matriz de decisão de estratégias de antecipação/adiamento conjugada às operações de manufatura e distribuição. Eles propõem uma análise de perfil para identificar qual a estratégia mais indicada para cada empresa, levando em conta alguns aspectos determinantes, como características do produto, valor agregado, ciclo de vida, características do mercado e sistema de distribuição e produção da empresa;
- **Consolidação** - Consiste na criação de grandes embarques a partir de pequenos volumes. Trata-se de uma economia importante que pode ser obtida no transporte. Este conceito é explorado quando existem entregas muito fracionadas partindo de várias origens para um ponto de consumo. Se o total do volume puder ser consolidado em um ponto para posterior envio ao local de consumo, podem existir reduções de custos significativas.

Os princípios acima expostos são relevantes na condução de uma análise de projeto de rede. Deve-se ainda definir com clareza quais são os objetivos da análise, fazer um levanta-

tamento de dados e definir modelos e ferramentas computacionais para suporte à decisão (BALLOU [6]).

### 3.1.2 Estoques

Os estoques representam um dos pilares para um bom planejamento logístico. Ballou [6] define estoques como sendo pilhas de matérias-primas, insumos, componentes, produtos em processo e acabados que aparecem em vários pontos do canal logístico. Sua importância como atividade-chave no gerenciamento da logística já foi enfatizada na seção 3.1. Os estoques podem ser categorizados em cinco formas distintas (BALLOU [6]):

1. Estoques em trânsito - Correspondem aos estoques que estão em deslocamento no canal logístico, podendo estar transitando entre pontos de estocagem ou na produção;
2. Estoques especulativos - Podem ser de natureza especulativo-financeira ou referentes à antecipação de políticas de compra;
3. Estoques de ciclo - São de natureza regular, necessários para satisfazer a demanda média durante o tempo entre ressuprimentos sucessivos. Depende prioritariamente do tamanho do lote de ressuprimento;
4. Estoques de segurança - Servem como uma proteção excedente ao estoque regular devido às incertezas da demanda e do tempo de ressuprimento. O estoque de segurança é determinado pelos procedimentos estatísticos que tratam da natureza aleatória das variabilidades envolvidas. O nível do estoque de segurança depende do nível de disponibilidade de estoque que é oferecido e da extensão da variabilidade;
5. Estoques obsoletos - São perdas de estoque e ocorrem quando o material tem a validade vencida, é roubado ou deteriorado.

### 3.1.2.1 Lote Econômico

O modelo do lote econômico foi desenvolvido por Ford Harris<sup>2</sup> (*apud* BALLOU [6]) e tem por finalidade a determinação da quantidade ótima de pedido, servindo de base para muitas políticas de puxar estoques atualmente usadas. Este modelo apresenta como premissa de utilização a necessidade de a taxa da demanda ser constante, entretanto Axsäter [4] argumenta que o lote econômico pode ser empregado nos modelos estocásticos de estoque como uma boa aproximação. Na sua forma mais simples, não são considerados custos de falta, não há vendas perdidas e a reposição de estoque é instantânea, caracterizando um gráfico do tipo dente de serra (BALLOU [6]; BOWERSOX;CLOSS [8]; WANKE [49]). Existe um *trade-off* entre o custo de obtenção de estoque e o custo de manutenção de estoque, tal como ilustrado na figura 3.4.

Sejam:

$CR$  = Custo de obtenção do estoque

$CE$  = Custo de manutenção de estoque

$q$  = Tamanho do lote de ressuprimento

$D$  = Demanda que incide no estoque

$CT$  = Custo total

tem-se que:

$$CT = \frac{D}{q} \cdot CR + \frac{q}{2} \cdot CE \quad (3.1)$$

Derivando-se a equação 3.1 em relação a  $q$  e igualando a zero, tem-se o lote ótimo ou lote econômico de ressuprimento:

$$q^* = \sqrt{\frac{2 \cdot D \cdot CR}{CE}} \quad (3.2)$$

Para o valor de  $q^*$ , o custo de obtenção de estoque se iguala ao custo de manutenção de estoque. Substituindo 3.2 em 3.1 tem-se que:

<sup>2</sup>F.W.Harris (1913) "How many parts to make at once", *Factory, The Magazine of Management* 10, n°2:135-136,152

$$CT(q^*) = \sqrt{2 \cdot D \cdot CR \cdot CE} \quad (3.3)$$

que representa o custo da política de lote econômico.

### 3.1.2.2 Controles de estoque puxados

Segundo Ballou [6], existem dois métodos principais que são base para a maioria das filosofias de gerenciamento de estoques puxados: o método do ponto de pedido e revisão contínua e o método de revisão periódica. Bowersox e Closs [8] ressaltam que embora os sistemas de revisão periódica sejam mais simples de serem implementados (requerem revisões em intervalos regulares), eles exigem estoques médios maiores do que o sistema de revisão contínua em função do intervalo de contagem, portanto sendo mais onerosos.

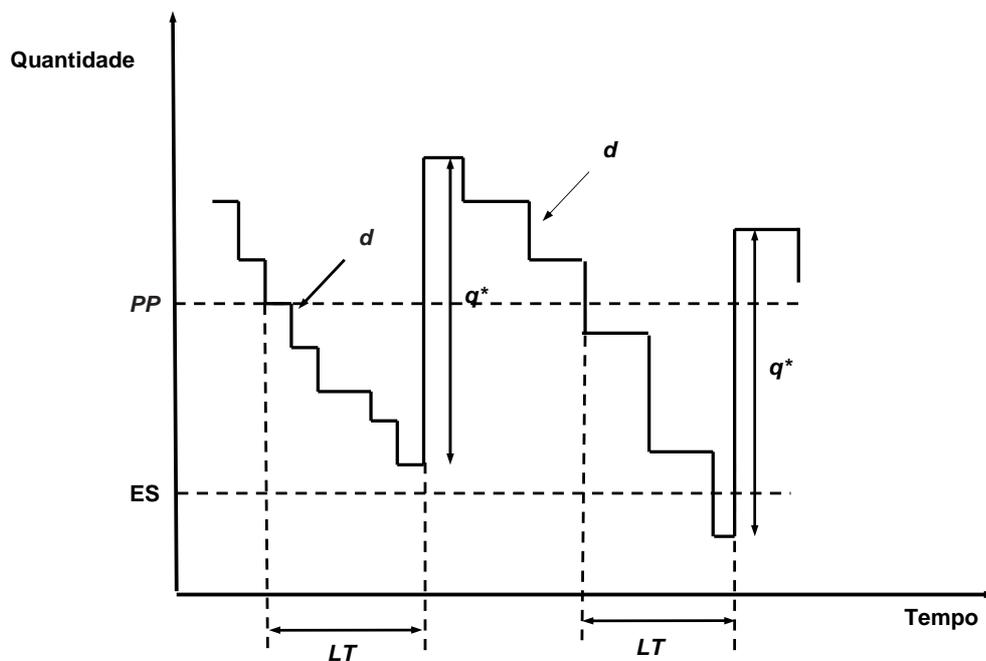


Figura 3.5: Modelo de ponto de pedido e revisão contínua

Fonte: Adaptada de Ballou [6]

A demanda  $d$  é considerada perpétua e atua sobre o estoque de forma a reduzir seu nível. O desvio padrão da demanda é  $sd$ . Quando a quantidade em estoque chega a um valor  $PP$  (ponto de pedido) uma quantidade econômica de pedido é colocada na fonte de fornecimento para reabastecer o estoque e chega  $LT$  tempos depois. Entre o tempo de colocação do pedido no ponto  $PP$  e sua chegada no estoque há o risco de falta de estoque. Controla-se o risco desta ocorrência com o estoque de segurança  $ES$ .

A demanda durante o tempo de ressuprimento é conhecida apenas na extensão de uma distribuição de probabilidade (supostamente normal). Esta distribuição tem média igual a  $d_{LT}$  e variância igual a  $s_{d(LT)}^2$ . A média da demanda durante o tempo de ressuprimento pode ser estimado através do desenvolvimento da distribuição da demanda média  $d$  sobre o tempo de ressuprimento por:

$$d_{LT} = d \cdot LT \quad (3.4)$$

De forma análoga, a variância da demanda durante o tempo de ressuprimento tem valor igual a  $s_{d(LT)}^2 = LT \cdot sd^2$ , logo:

$$s_{d(LT)} = \sqrt{LT} \cdot sd \quad (3.5)$$

O ponto de pedido  $PP$  pode ser encontrado pela relação:

$$PP = d \cdot LT + z \cdot s_{d(LT)} \quad (3.6)$$

O segundo termo da equação 3.6 representa o estoque de segurança, onde  $z$  é o número de desvios padrão da média da distribuição da demanda durante o tempo de ressuprimento. Este índice é obtido na tabela normal padronizada e mede a probabilidade desejada de se ter estoque durante o tempo de ressuprimento. Coleman [13] ressalta que este é o conceito correto de nível de serviço em termos de disponibilidade de estoque. Se, por exemplo, a intenção for ter estoque em 95% das vezes, o valor de  $z$  é aproximadamente igual a 1.65. Da mesma forma, para um valor de  $z$  igual a um, tem-se que aproximadamente 84.13% das vezes haverá estoque durante o tempo de ressuprimento, isto é, um desvio padrão, protege o sistema em mais de 80% das vezes. Obviamente, para  $z$  igual a zero não há estoque de segurança, o que garante apenas que em 50% das vezes não haverá ruptura de estoque.

Uma variação existente no cálculo da quantidade do estoque de segurança ocorre quando o tempo de ressuprimento também é incerto. Neste caso, adiciona-se a variância da demanda à variância do tempo de ressuprimento, de forma que a equação 3.5 toma a seguinte forma:

$$s_{d(LT)} = \sqrt{LT \cdot sd^2 + d^2 \cdot slt^2} \quad (3.7)$$

O valor do estoque de segurança e consequentemente do ponto de pedido aumenta consideravelmente quando são consideradas incertezas no tempo de ressuprimento.

## 3.2 Pesquisa Operacional

A situação problema foi apresentada na seção 2.4. É preciso uma análise dos diversos aspectos que envolvem o problema de forma a se obter a melhor localização de estoques e configuração dos fluxos de atendimento para a rede de distribuição. O problema apresenta uma característica que o torna particularmente difícil de ser tratado manualmente: as diversas combinações possíveis de soluções e os vários custos envolvidos no sistema como um todo. Muitos desses custos, inclusive, são conflitantes.

Para o contexto deste estudo, espera-se a exploração do problema identificado, sua análise e por fim a seleção de uma alternativa de solução que seja considerada a melhor dentre várias possíveis. Para o auxílio desse tipo de processo de tomada de decisão surgiu a disciplina da Teoria da Decisão, que visa o desenvolvimento de métodos e técnicas para uma abordagem sistemática, quantitativa e normativa de um problema (LUNA [29]).

Segundo Luna [29], a pesquisa operacional é a mais tradicional das ferramentas de apoio à tomada de decisão. Consiste em uma metodologia científica de apoio à decisão, e se caracteriza pela abordagem da solução de problemas através de modelagem matemática (guiada por um objetivo de otimização de tarefas ou rotinas de um sistema).

A abordagem da pesquisa operacional envolve o foco na tomada de decisões, uma avaliação baseada em critérios de eficácia econômica, confiança em um modelo matemático formal e a dependência de um computador. De acordo com Wagner [47, p.6], "a construção de modelos é a essência da abordagem de pesquisa operacional".

Um modelo pode ser definido como uma representação lógica de um sistema (LUNA [29]). Este modelo pode ser utilizado para fins de análise e experimentação, sem alterar o ambiente real representado. Pode ser encarado como um laboratório do sistema real através do qual podem ser determinadas mudanças de rotinas no sistema real de forma a melhorar seu desempenho. Construir um modelo que seja aplicável computacionalmente e que represente com razoável condição a realidade de um sistema é o grande desafio na formulação e implementação de modelos.

Um modelo resulta em um problema de programação matemática quando se trabalha com o objetivo de minimização de custos ou maximização de lucros, avaliado por uma função de variáveis que representam as atividades de um sistema, chamada de função objetivo.

O conjunto de alternativas disponíveis é, por sua vez, representado matematicamente por restrições associadas a valores que podem assumir outras funções das mesmas variáveis de decisão (LUNA [29]).

Os aspectos importantes em um modelo de programação matemática envolvem as variáveis de decisão do problema, as restrições a elas associadas e o objetivo para definir uma solução ótima ou próxima da ótima. Soluções ótimas garantem que não existe nenhuma solução melhor para o problema proposto. Geralmente tais soluções são geradas por métodos exatos em modelos de otimização. Já os métodos heurísticos geram soluções aproximadas, que podem eventualmente indicar soluções próximas da ótima.

Segundo Luna [29], os modelos de programação matemática podem ser classificados conforme o tipo de funções e o caráter discreto ou contínuo das variáveis de decisão.

### 3.2.1 Programação linear

Dantzig<sup>3</sup> (*apud* MINOUX [33]) propôs o termo *programação linear* para o estudo de problemas relacionados à otimização de modelos com termos lineares. De forma mais detalhada, um problema de programação matemática é classificado como um problema de programação linear se as variáveis são contínuas e todas as restrições e a função objetivo são descritas por funções lineares (LUNA [29]).

A formalização de um modelo de programação linear é proposta por Minoux [33] da seguinte forma:

$$\text{minimizar } f(x) \tag{3.8}$$

$$\text{sujeito a: } g_i(x) = 0 \quad \forall i \in I^0 \tag{3.9}$$

$$g_i(x) \leq 0 \quad \forall i \in I^- \tag{3.10}$$

$$g_i(x) \geq 0 \quad \forall i \in I^+ \tag{3.11}$$

$$x = (x_1, \dots, x_n)^T \geq 0 \tag{3.12}$$

No qual, as funções  $f$  e  $g_i$  ( $i \in I = I^0 \cup I^- \cup I^+$ ) são funções lineares das variáveis  $x_1, \dots, x_n$ .

<sup>3</sup>G.B.Dantzig (1949) "Programming in a linear structure", *Econometrica*, Vol 17, N°1

Para Wagner [47], os modelos de programação linear estão entre as abordagens mais bem sucedidas de pesquisa operacional, em virtude de suas aplicações serem as de maior impacto econômico. É uma das técnicas mais utilizadas no contexto das empresas, quer seja pela relativa facilidade de compreensão, quer seja pelas interessantes propriedades da técnica empregada na resolução dos problemas, o que garante a *otimalidade* da solução.

O método mais utilizado na solução de problemas de programação linear é o *Simplex* (ver GOLDBARG;LUNA [24]; MINOUX [33]; WAGNER [47]).

### 3.2.1.1 Otimização linear em redes

Um tipo particular e importante de problema de programação linear é o modelo de otimização em redes. Este tipo de problema pode ser generalizado para várias aplicações (redes de computadores, redes de telecomunicações, redes elétricas, de saneamento, entre outras). Uma das aplicações mais comuns, e particularmente importante para este trabalho, diz respeito aos modelos de distribuição de produtos.

Problemas de distribuição de produtos são normalmente tratados na literatura como modelos de otimização em redes e representados por uma estrutura chamada *grafo*. Luna [29] define *grafo* como sendo uma estrutura espacial composta por nós ligados através de arcos. Os nós podem representar cidades, armazéns, fábricas, centrais telefônicas, ou qualquer facilidade distribuída espacialmente em uma rede. Os arcos representam as ligações entre esses nós. O acréscimo de parâmetros a um grafo (por exemplo, custo ou capacidade associado a um arco e demanda ou oferta associado a um nó) caracteriza uma rede. Um grafo de  $N$  nós e  $A$  arcos é usualmente representado pela notação  $G = (N, A)$ .

Um exemplo de modelo em rede representado por um grafo e importante no ramo da logística é o problema do transporte. Envolve decidir as melhores rotas de distribuição de produtos entre nós que ofertam produtos e nós que demandam produtos, tendo em vista restrições de oferta e demanda nos mesmos nós.

Wagner [47] formaliza o problema do transporte da seguinte forma:

$$\text{minimizar } \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n c_{ij} x_{ij} \quad (3.13)$$

$$\text{sujeito a: } \sum_{j=1}^n x_{ij} \leq S_i \quad \forall i = 1, 2, \dots, m \quad (3.14)$$

$$\sum_{i=1}^m x_{ij} \geq D_j \quad \forall j = 1, 2, \dots, n \quad (3.15)$$

$$x_{ij} \geq 0 \quad \forall i, j \quad (3.16)$$

Muitos modelos de desenho de rede (*network design*) são baseados nesse modelo de otimização, podendo existir algumas variações.

### 3.2.2 Programação linear inteira mista

Um problema de programação matemática é classificado como um modelo de programação inteira quando as variáveis do problema estão restritas a assumirem valores discretos.

Em Minoux [33], um problema de programação inteira é definido da seguinte maneira:

$$\text{minimizar } z = c \cdot x \quad (3.17)$$

$$\text{sujeito a: } A \cdot x = b \quad (3.18)$$

$$x \geq 0 \quad x_j \text{ inteiro } (\forall j = 1, \dots, n) \quad (3.19)$$

Uma variação comum deste problema ocorre quando algumas variáveis do problema estão restritas a assumirem valores inteiros e outras a valores contínuos. Tem-se, nesse caso, um modelo de programação linear inteira mista (GOLDBARG;LUNA [24]).

Segundo Wagner [47], uma grande variedade de problemas de decisão pode envolver variáveis inteiras, como decisões do tipo "sim" ou "não", custos de preparação, utilização de equipamentos ou tamanhos de lote. Um grupo específico de problemas lida com decisões de sequências, programas e itinerários. Esses tipos de problemas são ditos problemas combinatórios e consistem na procura, dentre um conjunto finito de alternativas, de uma que

otimize o valor de uma função objetivo (WAGNER [47]). Entre os exemplos de problemas combinatórios pode-se destacar o problema do caixeiro viajante, da programação de uma máquina e o de roteamento de veículos.

Um fato importante sobre modelos de programação inteira mista é a complexidade computacional de resolução. Luna [29] afirma que a restrição das variáveis serem inteiras agrega uma complexidade ao modelo maior do que a introdução de não-linearidades de funções. Segundo Minoux [33], modelos com formulação linear inteira mista não são necessariamente mais fáceis do que problemas de programação não-linear inteira mista, tendo ambos os modelos a mesma dificuldade intrínseca.

Entre os métodos exatos de resolução desse tipo de problema, destacam-se os algoritmos baseados em métodos de decomposição e *branch and bound*. Com relação ao primeiro método, a maioria dos algoritmos segue a técnica de decomposição de Benders (este método pode ser visto em CARVALHO [11]), que consiste em separar em um problema inteiro misto a parte inteira da parte contínua, resolvendo-se problemas menores. Outro método de resolução bastante utilizado em problemas inteiros é o método de busca em árvores, também conhecido como *branch and bound*. Este método está descrito em detalhes em Wagner [47].

### 3.2.3 Programação não-linear

De acordo com Pardalos, Romeijn e Tuy [42] e Bazarra [7], muitos problemas reais não podem ser representados adequadamente por modelos lineares devido à não-linearidade da função objetivo e/ou das restrições envolvidas. Bazarra [7] define matematicamente um problema de programação não-linear da seguinte forma:

$$\text{minimizar } f(x) \quad (3.20)$$

$$\text{sujeito a: } g_i(x) \leq 0 \quad i = 1 \dots m \quad (3.21)$$

$$h_i(x) = 0 \quad i = 1 \dots l \quad (3.22)$$

$$x \in X$$

onde  $f, g_1, \dots, g_m, h_1, \dots, h_l$  são funções não-lineares, definidas em  $E_n$ ,  $X$  é um subcon-

junto de  $E_n$  e  $x$  é o vetor de  $n$  componentes  $x_1, \dots, x_n$ .

De acordo com Tian, Ma e Zhang [46], devido ao caráter "robusto" da formulação anterior, uma grande variedade de problemas reais pode ser classificada como problemas não-lineares. Bazarra [7], Wagner [47] e Pardalos [41] dão exemplos de alguns problemas que têm este tipo de formulação:

- Planejamento da produção;
- Mistura de gasolina;
- Desenho mecânico;
- Redes elétricas;
- Receita de vendas (quando a quantidade vendida é sensível ao preço, a receita não varia proporcionalmente a este elemento);
- Gerenciamento de recursos de saneamento (irrigação de áreas para agricultura);
- Seleção de carteira de títulos (considerando os riscos);
- Localização de facilidades (quando a localização das facilidades é desconhecida).

Quando existem variáveis inteiras no modelo não-linear, tem-se um problema de programação não-linear inteira mista. Uma questão inerente aos problemas desse tipo é a complexidade computacional. Tian, Ma e Zhang [46] apontam que tais problemas também são classificados como NP-completos<sup>4</sup>, e que as soluções ótimas podem não ser obtidas em um tempo computacional razoável.

Outro ponto importante a ser considerado nesses modelos é aquele referente às condições de *otimalidade* das soluções. As condições necessárias para *otimalidade* de um problema são conhecidas por condições de *Kuhn-Tucker* e podem ser vistas em Minoux [33] e Bazaraa [7]. Sob condições específicas de convexidade, as condições de *Kuhn-Tucker* são suficientes para garantia da *otimalidade* global no problema (BAZARAA [7]). Em linhas gerais, se um problema de programação não-linear, tal como enunciado nesta seção, for caracterizado como do tipo programação não convexa<sup>5</sup>, a capacidade de se obter

<sup>4</sup>A teoria da NP-Completeness pode ser vista em detalhes em Garey e Johnson [22]

<sup>5</sup>As definições de problemas de programação convexa e não convexa, bem como de convexidade de funções e conjuntos podem ser vistas com detalhes em Minoux [33] e Bazaraa [7]

soluções ótimas globais é em geral limitada (BAZARAA [7]; MINOUX [33]). Pardalos [41] aponta que em problemas de programação não-linear onde a função objetiva apresenta concavidade, ótimos locais não implicam em ótimos globais. O autor afirma ainda que as abordagens clássicas de programação não-linear para problemas desse tipo encontram apenas ótimos locais. Uma solução é dita ótima local se não existe nenhuma outra solução melhor dentro de uma vizinhança especificada em relação à solução encontrada.

Conforme cita Wagner [47], a teoria básica de programação não-linear está se desenvolvendo e a experiência computacional com algoritmos específicos é ainda limitada. Segundo o autor, a aplicabilidade de um determinado método varia de problema para problema. Pode-se destacar como exemplo algumas técnicas de resolução, como programação quadrática, programação separável, método das combinações convexas, método simplex côncavo, dentre outras (WAGNER [47]).

Um trabalho interessante sobre otimização global envolvendo problemas de programação não-linear pode ser visto em Pardalos, Romeijn e Tuy [42]. Os autores assinalam que muitos problemas nas áreas de engenharia, logística, desenho mecânico e outras áreas da ciência requerem soluções ótimas globais, mesmo para problemas ditos não convexos. Eles destacam as tendências e os recentes desenvolvimentos neste campo de pesquisa, ressaltando as abordagens determinísticas e estocásticas de problemas de otimização global, inclusive descrevendo algumas metaheurísticas, como Busca Tabu, Algoritmos Genéticos e Simulação de Recozimento (*Simulated Annealing*).

### 3.3 Revisão de literatura de modelos de localização e centralização de estoques

Brandeau e Chiu [10] definem um problema de localização como sendo uma alocação espacial de recursos. Nesses problemas, uma ou mais localizações servem a um conjunto espacialmente distribuído de demandas. Em geral, a topologia espacial dos problemas pode ser representada por uma rede generalizada ou especializada. O objetivo geral é localizar as instalações e associá-las às demandas de forma a se otimizar algum objetivo. Ainda segundo os autores citados, alguns dos critérios para otimização podem ser: minimização do tempo ou distância média de viagem entre as instalações e as demandas, minimização do tempo de resposta médio, minimização de uma função de custo de viagem ou tempo de resposta ou minimização do máximo tempo de viagem.

Os problemas de localização são geralmente tratados por modelos matemáticos. Jayaraman [26] ressalta que os modelos matemáticos de localização são desenhados para responder algumas questões, tais como:

- Quantas instalações devem operar em uma rede;
- Onde as instalações devem estar localizadas na rede;
- Como as demandas de clientes devem estar associadas às instalações na rede.

Jayaraman [26] e Owen e Daskin [39] apontam que o problema de localização corresponde a um aspecto crítico no planejamento estratégico de empresas públicas e privadas. Geralmente envolvem grandes investimentos na decisão de alocação de recursos, sendo que algumas dessas decisões são difíceis de serem revertidas (por exemplo, uma decisão sobre instalar uma fábrica em um determinado local).

#### 3.3.1 Histórico e tipos de modelos de localização

O início formal do estudo de teoria de localização é atribuído a Alfred Weber<sup>6</sup> (*apud* BRANDEAU;CHIU [10]) em 1909. O autor considerou o problema de localizar um ar-

---

<sup>6</sup>A.Weber (1909) "Uber den Standort der Industrien" traduzido como "Alfred Weber's Theory of the Location of Industries", *Universidade de Chicago*, 1929

mazém em uma rede para minimizar a distância total entre a instalação e um conjunto de clientes distribuídos espacialmente. Após essa iniciativa, a teoria da localização foi marcada por poucos trabalhos até meados da década de 1960. Segundo Brandeau e Chiu [10], eram aplicações pontuais e não unificadas em torno de uma teoria única. Algumas dessas aplicações envolviam estudos de localização de veículos de bombeiros, fábricas, depósitos de lixo e aplicações em redes de ferrovias e comunicações.

A teoria da localização ganhou impulso considerável em 1964, com a publicação do trabalho de Hakimi<sup>7</sup> (*apud* BRANDEAU;CHIU [10]) que considerou o problema geral de localizar uma ou mais instalações em uma rede para minimizar a soma das distâncias ou a máxima distância entre as instalações e outros pontos da rede. Depois disso, um grande número de pesquisas e trabalhos foram publicados. Brandeau e Chiu [10] ressaltam que diferentes classes de problemas foram identificadas e resolvidas, enquanto a metodologia de localização foi estendida a uma variedade de aplicações práticas.

Brandeau e Chiu [10] e Owen e Daskin [39] apresentam em seus trabalhos uma ampla revisão de literatura dos problemas de localização existentes. Brandeau e Chiu [10] ilustram exemplos típicos de problemas de localização:

- Desenho de rede (*network design*);
- Localização de armazéns;
- Problemas de cobertura;
- Localização competitiva de instalações (decisão sobre instalações de estabelecimentos comerciais para fins de aumento de participação de mercado).

Os autores realizam uma pesquisa sobre os problemas de localização, indicando os tipos de aplicação dos modelos levantados (separando as aplicações em setores públicos ou privados). É apresentada ainda uma taxionomia para a classificação de 50 tipos diferentes de problemas de localização de acordo com os objetivos dos modelos, variáveis de decisão e parâmetros de sistema.

Owen e Daskin [39] fazem uma revisão dos modelos existentes, separando-os em problemas determinísticos, estocásticos e dinâmicos. Para os autores, a complexidade computacional

---

<sup>7</sup>S.L.Hakimi (1964) "Optimal Locations of Switching Centers and The Absolute Centers and Medians of a Graph", *Operations Research*, Vol 12,p.450-459

de alguns problemas de localização tem limitado as formulações a problemas estáticos e determinísticos. Ainda segundo Owen e Daskin [39], a abordagem estática de problemas de localização apresenta como principais formulações os problemas das medianas, problemas de cobertura, problemas dos centros e problemas de localização com despesas fixas. Cada uma delas é detalhada a seguir:

**Problema  $P$ -mediana** - Consiste em localizar  $P$  instalações em uma rede de forma que seja minimizada a distância entre as instalações e os pontos de demanda, ponderados pela demanda (assume-se que a demanda não é sensível ao nível de serviço). A formulação do problema pode ser visualizada a seguir.

$$\text{minimizar} \quad \sum_i \sum_j h_i d_{ij} Y_{ij} \quad (3.23)$$

$$\text{sujeito a:} \quad \sum_j X_j = P, \quad (3.24)$$

$$\sum_j Y_{ij} = 1 \quad \forall i, \quad (3.25)$$

$$Y_{ij} - X_j \leq 0 \quad \forall i, j, \quad (3.26)$$

$$Y_{ij} \in \{0, 1\} \quad \forall i, j, \quad (3.27)$$

$$X_j \in \{0, 1\} \quad \forall j. \quad (3.28)$$

onde:

$h_i$  - demanda no ponto de demanda  $i$ ;

$d_{ij}$  - distância entre o ponto de demanda  $i$  e a instalação  $j$ ;

$P$  - número de instalações a ser localizada;

$X_j$  - variável de decisão, assume valor igual a 1 se a instalação for localizada em  $j$ , e 0 caso contrário;

$Y_{ij}$  - variável de decisão, assume valor igual a 1 se a demanda no ponto de demanda  $i$  for servida pela instalação  $j$ , e 0 caso contrário.

A restrição 3.24 assegura que exatamente  $P$  instalações sejam localizadas. A demanda de cada ponto ser atendida por uma instalação é assegurada pela restrição 3.25. A restrição 3.26 garante que associações entre instalações e pontos de demanda somente são

possíveis quando a instalação é localizada. As demais restrições representam o domínio das variáveis.

**Problema de cobertura** - Problemas dessa natureza têm a cobertura geográfica como ponto chave de avaliação de eficiência de localização, devido a criticidade dos serviços envolvidos (hospitais, corpo de bombeiros, entre outros). Existem dois tipos principais de problemas de cobertura: o problema de cobertura de um conjunto de locais e o problema da máxima cobertura. O primeiro consiste em minimizar o custo de localização de instalações tal que um nível de cobertura especificado seja atendido. No problema da máxima cobertura, o objetivo é maximizar a porção de demanda coberta dentro de uma distância especificada  $S$  entre as instalações e os pontos de demanda. Esta formulação é ilustrada a seguir.

$$\text{maximizar} \quad \sum_i h_i Z_i \quad (3.29)$$

$$\text{sujeito a:} \quad Z_i \leq \sum_{j \in N_i} X_j, \quad \forall i, \quad (3.30)$$

$$\sum_j X_j \leq P, \quad (3.31)$$

$$Z_i \in \{0, 1\} \quad \forall i, \quad (3.32)$$

$$X_j \in \{0, 1\} \quad \forall j. \quad (3.33)$$

onde:

$h_i$  - demanda no cliente  $i$ ;

$N_i$  - conjunto de instalações  $j$  situado a uma distância menor ou igual a  $S$  do ponto de demanda  $i$ ;

$P$  - número de instalações a ser localizada;

$Z_i$  - variável de decisão, assume valor igual a 1 se o ponto de demanda  $i$  é coberto, e 0 caso contrário;

$X_j$  - variável de decisão, assume valor igual a 1 se a instalação for localizada em  $j$ , e 0 caso contrário.

A restrição 3.30 determina quais pontos de demanda estão dentro do raio de cobertura

especificado. A restrição 3.31 assegura que não mais que  $P$  instalações sejam localizadas. As demais restrições representam o domínio das variáveis.

**Problema  $P$ -centro** - Esses problemas são também conhecidos como problemas *minimax*, uma vez que se deseja minimizar a máxima distância entre qualquer ponto de demanda e a instalação mais próxima correspondente. Diferentemente do problema de cobertura, a premissa nesses problemas é cobrir toda a demanda através da localização de um dado número de instalações para minimizar a distância de cobertura. Se as instalações estão restritas aos nós da rede, o problema é conhecido como *vertex center problem*. A formulação desse problema é ilustrada a seguir.

$$\text{minimizar} \quad D \quad (3.34)$$

$$\text{sujeito a:} \quad \sum_j X_j = P, \quad (3.35)$$

$$\sum_j Y_{ij} = 1 \quad \forall i, \quad (3.36)$$

$$Y_{ij} - X_j \leq 0 \quad \forall i, j, \quad (3.37)$$

$$D \geq \sum_j d_{ij} Y_{ij} \quad \forall i, \quad (3.38)$$

$$Y_{ij} \in \{0, 1\} \quad \forall i, j, \quad (3.39)$$

$$X_j \in \{0, 1\} \quad \forall j. \quad (3.40)$$

onde:

$D$  - máxima distância entre um ponto de demanda e a instalação mais próxima correspondente;

$d_{ij}$  - distância entre o ponto de demanda  $i$  e a instalação  $j$ ;

$P$  - número de instalações a ser localizada;

$X_j$  - variável de decisão, assume valor igual a 1 se a instalação for localizada em  $j$  e 0 caso contrário;

$Y_{ij}$  - variável de decisão, assume valor igual a 1 se a demanda no ponto de demanda  $i$  for servida pela instalação  $j$  e 0 caso contrário.

As restrições 3.35, 3.36 e 3.37 são idênticas às restrições 3.24, 3.25 e 3.26 do problema

$P$ -mediana. A restrição 3.38 define a máxima distância entre um ponto de demanda e a instalação  $j$  mais próxima correspondente. As demais restrições definem os domínios das variáveis.

**Problema de localização com despesa fixa** - São também conhecidos na literatura especializada como *Fixed Charge Facility Location Problems*. São problemas onde existe um custo fixo associado à localização de potenciais instalações em uma rede. Um modelo comum a essa classe de problemas é o problema não capacitado de localização com despesa fixa, uma variação do problema  $P$ -mediana. Neste modelo, adiciona-se à função objetivo 3.23 uma parcela de custo fixo e remove-se a restrição que determina o número de instalações a ser localizado. Como resultado, a formulação resultante procura determinar o número e o local das instalações de forma a minimizar o custo total de abertura e viagem entre os pontos da rede. A formulação desse problema pode ser vista em Nozick e Turnquist [37] e é ilustrada a seguir.

$$\text{minimizar } \sum_j f_j X_j + \alpha \sum_i \sum_j h_i d_{ij} Y_{ij} \quad (3.41)$$

$$\text{sujeito a: } \sum_j Y_{ij} = 1 \quad \forall i, \quad (3.42)$$

$$Y_{ij} - X_j \leq 0 \quad \forall i, j, \quad (3.43)$$

$$Y_{ij} \in \{0, 1\} \quad \forall i, j, \quad (3.44)$$

$$X_j \in \{0, 1\} \quad \forall j. \quad (3.45)$$

Os parâmetros e variáveis são os mesmos da formulação do problema da  $P$ -mediana, com exceção da inclusão dos parâmetros  $\alpha$  e  $f_j$ . O parâmetro  $\alpha$  representa o custo por unidade de distância e por unidade de demanda. O parâmetro  $f_j$  representa os custos fixos de criação de uma instalação em  $j$ . Vale observar a ausência da imposição do número de instalações  $P$  a serem localizadas.

O problema acima pode ser transformado em um problema capacitado, ou seja, pode ser levado em conta questões de capacidade das instalações. Para isso, pode-se agregar à formulação anterior uma restrição do tipo:

$$\sum_i h_i Y_{ij} \leq W_j X_j \quad \forall j \quad (3.46)$$

onde  $W_j$  é a capacidade da instalação localizada em  $j$ .

Miranda e Garrido [34] ressaltam que os problemas de localização capacitados com despesas fixas são denominados na literatura especializada como *Capacitated Facility Location Problems* (CFLP). Melkote e Daskin [32] apresentam um modelo de programação linear inteira mista que generaliza o problema CFLP, no qual a topologia da rede é construída como resultado do modelo.

Vários outros modelos foram desenvolvidos com base nas quatro formulações gerais apontadas por Owen e Daskin [39]. Um exemplo de modelo derivado das formulações gerais é apresentado no trabalho de Nozick [35]. A autora incorpora questões de restrições de cobertura em um problema de localização com despesas fixas. A mesma ressalta que são dois dos modelos mais importantes na teoria da localização (ambos ilustrados nessa seção). Os objetivos de ambos os modelos, segundo Nozick [35], são conflitantes, pois enquanto o problema de cobertura tem como principal foco a qualidade de serviço, o problema de localização com despesa fixa tem como objetivo o menor custo possível. A formulação que ela propõe é idêntica à apresentada anteriormente para os problemas de localização com despesas fixas, apenas acrescentando uma nova variável  $q_{ij}$  e a restrição de cobertura, conforme ilustrado a seguir:

$$\sum_i \sum_j h_i q_{ij} Y_{ij} \leq V, \quad (3.47)$$

onde:

$q_{ij}$  - assume o valor 0 se a instalação em  $j$  consegue cobrir a demanda no ponto  $i$  e assume o valor 1, caso contrário;

$V$  - total de demanda não coberta permitida.

Outro modelo importante de localização de instalações que trata vários produtos é o modelo proposto por Geoffrion e Graves [23]. Os autores consideram uma rede genérica onde são produzidos vários itens em fábricas com capacidades conhecidas, que devem atender determinados pontos de consumo através de instalações intermediárias, onde cada instalação possui faixas de volumes de fluxos viáveis em um intervalo de tempo. O modelo determina onde localizar as instalações e qual o esquema de associação dos fluxos de cada

produto entre as fábricas, instalações e pontos de consumo.

As formulações apresentadas consideram questões de transporte, cobertura de mercado e custos fixos de instalação em uma rede. Nenhuma delas, entretanto, leva em conta questões táticas no desenho de uma rede, como aspectos de estoque. Conforme aponta Ballou [6], as questões de estoque são importantes para um projeto de rede, particularmente a análise sobre possíveis centralizações de estoque.

### 3.3.2 Modelos de centralização de estoques

Segundo Mahmoud [30], a criação de pontos centrais de estocagem é um artifício poderoso para obtenção de ganhos de escala no planejamento de sistemas logísticos.

Os primeiros estudos sobre centralização de estoques ocorreram na década de 60, e são creditados a Starr e Miller<sup>8</sup> (*apud* DAS;TYAGI [15]). Após isso, alguns trabalhos foram desenvolvidos. Uma contribuição relevante para o assunto foi dada por Maister<sup>9</sup> (*apud* DAS;TYAGI [15]) que formalizou a "regra da raiz quadrada". Esta estabelece uma relação que mede aproximadamente o impacto no montante de estoque de segurança de um produto em uma rede de instalações quando o número de pontos de estocagem se altera. Em forma matemática:

$$FR_{ES} = \sqrt{\frac{m}{n}} \quad e \quad ES_f = \frac{ES_i}{FR_{ES}}$$

onde:

$FR_{ES}$  - representa o fator de redução do estoque de segurança;

$m$  - representa o número inicial de instalações com estoque de segurança em uma rede;

$n$  - representa o número final de instalações com estoque de segurança em uma rede;

$ES_f$  - representa o estoque de segurança final;

$ES_i$  - representa o estoque de segurança inicial.

<sup>8</sup>M.K.Starr e D.W.Miller (1962) "Inventory Control: Theory and Practice", *Prentice Hall*, Englewood Cliffs, NJ

<sup>9</sup>D.H.Maister (1976) "Centralization of Inventories and the 'Square Root Law'", *International Journal of Physical Distribution*, Vol 06,p.124-134

No caso de um movimento de centralização de estoque, o número de instalações finais é menor que o número de instalações iniciais, portanto  $FR_{ES}$  é maior que um, e neste caso o estoque de segurança final da rede é menor que o inicial.

Segundo Maister, essa lei é aplicável também na redução do estoque de ciclo quando for empregado o lote econômico para pedidos de ressuprimento. Existem duas premissas que restringem a aplicação dessa regra: a consideração de que as demandas dos locais não são correlacionadas e a consideração de que a variabilidade da demanda é a mesma para todas as instalações.

Eppen [20] apresentou os efeitos da centralização de estoques no problema do jornaleiro de múltiplas instalações. O autor confirma o resultado encontrado por Maister de que os níveis de estoque são maiores quando os estoques estão mais descentralizados em uma rede, e sugere ainda que a redução do montante de estoque em movimentos de agregação também é função da correlação entre as demandas das instalações.

Zinn, Levy e Bowersox [50] apresentaram uma nova medida para avaliar os efeitos de centralização/descentralização de estoques, intitulada de *Portfolio Effect*. Mais especificamente, esta medida avalia o percentual de redução de estoque de segurança devido à agregação de estoques de múltiplas instalações em uma. O modelo do *Portfolio Effect* é representado matematicamente da seguinte forma:

$$PE = 1 - \frac{\sigma_a}{\sum_{i=1}^n \sigma_n}$$

onde,

$$\sigma_a = \sqrt{\sum_{i=1}^n \sigma_i^2 + 2 \sum_{i < j} \sigma_i \sigma_j \rho_{ij}}$$

$\sigma_a$  representa o desvio padrão agregado da demanda de  $n$  instalações. Para calculá-lo, é necessário estabelecer o coeficiente de correlação entre as demandas das instalações ( $\rho_{ij}$ ). Zinn, Levy e Bowersox [50] provam que a regra da raiz quadrada é um caso particular do *Portfolio Effect*, quando não existe correlação entre as demandas e a variabilidade da demanda para todas as instalações é a mesma.

Os autores concluem que o modelo é sensível à magnitude entre os desvios padrões de instalações (quociente do desvio padrão maior sobre o desvio padrão menor) e à correlação

entre as demandas das instalações. Para demandas altamente correlacionadas negativamente e níveis de magnitude pequenos, o modelo do *Portfolio Effect* aponta para reduções mais substanciais com a consolidação dos estoques.

Este modelo tem como princípio a noção de agregação de risco nos estoques. O desvio padrão agregado é menor do que a soma dos desvios individuais de cada instalação. Este fenômeno também é conhecido na literatura especializada como *Risk Pooling*, e seu princípio é também aplicado, por exemplo, na padronização de itens componentes em um estoque de manutenção. Por exemplo, o uso de um único item de reposição como padrão em substituição a um conjunto de vários itens pode ocasionar reduções nos estoques de segurança.

Várias extensões e modificações desse modelo foram sugeridas por diversos autores. Evers e Beier [21] propõem um modelo semelhante ao *Portfolio Effect*, porém considerando as incertezas no tempo de ressuprimento e a consolidação de estoques em múltiplas instalações ao invés de apenas uma. Mahmoud [30], propõe um modelo que quantifica a redução do estoque de segurança em situações de consolidação. Ele usa o *Portfolio Effect* como base, e ainda desenvolve um modelo de otimização para sugerir o esquema de consolidação ótimo entre instalações de uma rede.

Conforme apontam Das e Tyagi [15], a regra da raiz quadrada e o modelo do *Portfolio Effect* fornecem bons subsídios para entendimento do papel da centralização de estoques, porém são insuficientes para uma implementação dessa política. Eles ressaltam que um movimento de centralização de estoques em uma rede logística deve ser respaldado pela resposta de algumas questões, tais como a determinação do número apropriado de instalações, suas localizações e capacidades, os esquemas de associações entre os pontos de demanda e as instalações centralizadoras de estoque, além de questões específicas de políticas de estoque de cada local (método de controle e quantidades de reposição).

Portanto, é necessário um modelo de análise de localização que integre questões de transporte e políticas de estoque.

### 3.3.3 Modelos de desenho da rede de distribuição que incorporam decisões de estoque

Owen e Daskin [39] e Ambrosino e Scutellà [1] ressaltam que a complexidade de um cenário real de desenho de rede de distribuição leva muitas vezes à formulação de modelos simplificados, negligenciando importantes aspectos dos sistemas logísticos.

Um ponto que vem sendo discutido por diversos autores é a necessidade de se considerar outras questões no planejamento de redes, além de custos fixos de instalações e transportes. Outros fatores são importantes para a determinação de um desenho de rede logística, tais como considerações de estoque, escolha de modais ou rotas de veículos (ver AMBROSINO;SCUTELLÀ [1]; CROXTON;ZINN [14]; JAYARAMAN [26]; MIRANDA;GARRIDO [34]). Esses autores sugerem que tais aspectos devam ser considerados de forma integrada em um modelo de localização. Particularmente, as questões de estoque influenciam de forma decisiva os custos logísticos e o nível de serviço ao cliente, e forma juntamente com questões de transporte e localização de instalações a tríade para um bom planejamento logístico (BALLOU [6]).

Uma tentativa de integrar os custos de estoque com os demais custos de transporte e localização de instalações pode ser visto em Nozick e Turnquist [36]. Eles propõem um modelo que adiciona os custos de estoque de segurança ao modelo clássico de localização com despesas fixas (ver seção 3.3.1). Entretanto, os custos são considerados de forma aproximada, como uma função linear do número de instalações de estoque. Esta premissa é válida apenas para uma determinada faixa de número de instalações (geralmente quando o número de instalações é relativamente grande). Os mesmos autores seguem essa linha de formulação em outro trabalho, quando foi proposto um modelo para adicionar custos de estoque de segurança e questões de cobertura em um modelo de localização com despesas fixas (ver NOZICK;TURNQUIST [37]). Em ambos os trabalhos, o custo de estoque de segurança é estimado como uma regressão linear do número de instalações, e o coeficiente angular dessa regressão é incorporado ao fator  $f_j$  da função objetivo 3.41.

Jayaraman [26] também propõe um modelo de desenho de rede que considera simultaneamente questões de transporte, localização e estoques. Este modelo prevê a localização de fábricas e instalações intermediárias, além de determinar as quantidades e o esquema de associação de fluxos entre as instalações. O modelo considera também diferentes modais

de transporte utilizados, porém a abordagem dos custos de estoque não é completa, pois o autor apenas analisa os estoques em trânsito entre as fábricas e as instalações e considera o custo de estoque de ciclo linear nas instalações. Não são feitas considerações sobre estoques de segurança.

Das e Tyagi [15] apresentam um modelo matemático que incorpora efetivamente custos de estoque de ciclo e estoques de segurança em uma análise de desenho de rede. O trabalho dos autores pode ser visto como uma análise de centralização de estoques em uma rede de distribuição, sob uma ampla perspectiva. São também considerados custos de transporte entre instalações intermediárias e clientes, e custos de ressuprimentos das instalações, segundo uma política de lote econômico de pedido (ver seção 3.1.2.1). Os autores fazem simulações considerando vários cenários relativos aos diferentes custos logísticos da função objetivo, de forma a compreender como esses custos de forma individual ou combinada afetam o grau de centralização de estoques do sistema. O fenômeno do *Risk Pooling* é portanto abordado neste modelo.

Miranda e Garrido [34] desenvolveram em seu trabalho um modelo matemático de programação não-linear inteira mista que permite configurar o desenho de rede de distribuição de menor custo levando em conta decisões de estoque e seus respectivos custos. O modelo, segundo apontam os autores, é uma extensão do modelo capacitado de localização com despesas fixas (CFLP). Portanto, o modelo responde quantas instalações a rede deve possuir (levando em conta as capacidades de cada uma), onde devem ser localizadas, qual o esquema de associação entre as instalações e demandas, e em quais instalações os estoques devem ser centralizados, se for o caso. Como no modelo de Das e Tyagi [15], são consideradas as variabilidades de cada ponto de demanda, o que permite uma análise de agregação de estoque de segurança (*Risk Pooling*).

Por fim, Croxton e Zinn [14] elaboram um modelo que também incorpora decisões de estoque no desenho de uma rede de distribuição. Eles ressaltam que a inclusão efetiva de custos de estoque em modelos de desenho de rede é limitada em função da relação entre número de instalações e estoque ser não-linear. Esse fato acarreta, segundo os autores, dificuldades em se resolver tais problemas de forma ótima. Em vista disso, propõem uma abordagem em que os custos de estoques são modelados por uma função discreta, tendo como base a "regra da raiz quadrada" proposta por Maister (ver seção 3.3.2). Esta abordagem exige que a variabilidade da demanda entre os pontos da rede seja a mesma, o que, segundo os autores, pode ser útil para análise agregada de demanda e estoque, mas

como análise de centralização de estoques para produtos individuais pode levar a erros substanciais.

Os modelos de desenho de rede, para efetivamente conduzir a uma análise logística apropriada, devem incorporar questões de estoque. Uma análise apropriada de centralização de estoques requer a consideração de estoques de ciclo e estoques de segurança, o que leva a uma relação não-linear entre o número de instalações e o montante de estoque. Os ganhos efetivos com essas centralizações de estoque são mensurados justamente pelos ganhos de escala obtidos pela relação não-linear dos custos considerados.

Os modelos de desenho de rede que incorporam decisões de estoque aqui levantados podem ser divididos em dois grupos. Um grupo de modelos apresenta custos de estoques simplificados, seja por não considerar estoques de segurança (JAYARAMAN [26]), seja por assumir premissas que inviabilizam a aplicação no contexto em estudo. Como exemplo dessas premissas, podemos destacar os modelos propostos por Nozick e Turnquist [36], que consideram uma relação linear entre custos de estoque de segurança e número de instalações de estoque. Croxton e Zinn [14] utilizam uma função discreta para modelar os custos, porém adotam a "regra da raiz quadrada", a qual exige que as variabilidades de demanda entre instalações sejam iguais, o que não ocorre no contexto em estudo. O outro grupo de modelos efetivamente incorpora custos de estoque de ciclo e de segurança nas análises, porém apresenta formulações não-lineares (DAS;TYAGI [15]; MIRANDA;GARRIDO [34]).

Com base na explanação anterior, optou-se pelo modelo de Miranda e Garrido [34] como modelo referencial para o desenvolvimento do modelo proposto nesta dissertação. Este modelo é detalhado na seção seguinte.

### **3.3.4 Modelo referencial**

Esta seção apresenta o modelo de Miranda e Garrido [34] que é o modelo referencial para esta dissertação.

Os autores tomam como base em seu trabalho um tipo de rede de distribuição conforme mostra a figura a seguir:

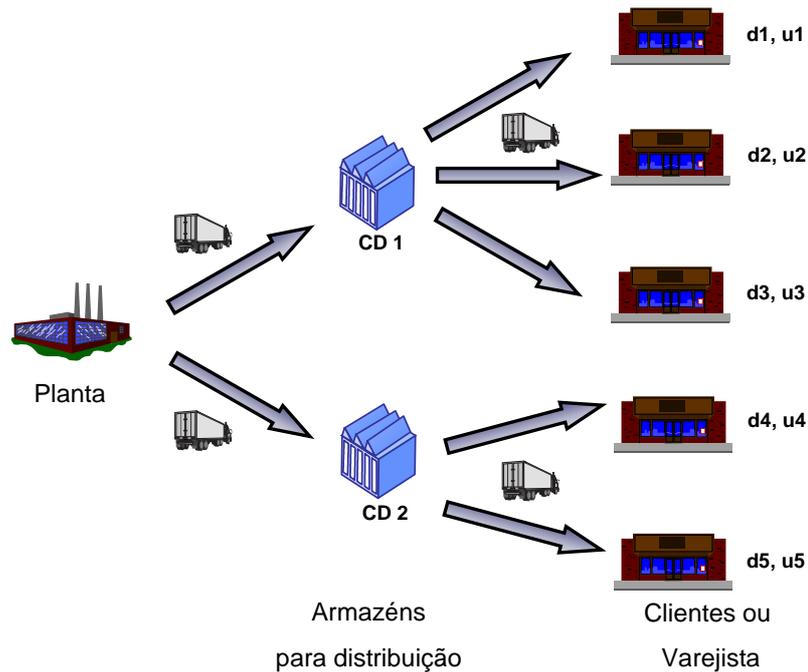


Figura 3.6: Representação da rede de distribuição tratada por Miranda e Garrido

Fonte: Adaptada de Miranda e Garrido [34]

É assumido que o produtor possui uma rede de armazéns própria; isto é, planta (no modelo é considerada única e conhecida) e armazéns são instalações da mesma empresa. Ainda, os armazéns devem atender a um padrão de demanda estocástico dos varejistas, os quais possuem média e variância conhecidas ( $d_j$  e  $u_j$ ). Pela figura 3.6, o armazém 1 tem que atender a demanda dos varejistas 1, 2 e 3, os quais possuem demandas médias  $d_1$ ,  $d_2$  e  $d_3$  respectivamente, assim como variâncias  $u_1$ ,  $u_2$  e  $u_3$ .

Os custos associados à operação dos armazéns dependem fortemente do desenho da rede porque:

- Existe um tipo de custo que é proporcional à demanda média suprida ao armazém (transporte, estoque de ciclo). Portanto, dependendo da configuração dos arcos entre as instalações e do nível de demanda agregada a um armazém, os custos podem ser bem diferentes;
- Outro tipo de custo é proporcional à variabilidade da demanda suprida, em função do estoque de segurança. Sob tempos de ressuprimentos e níveis de serviço constantes, o estoque de segurança é proporcional ao desvio padrão da demanda suprida (ver seção 3.1.2.2). Uma eventual centralização de estoque altera o custo total de

posse do estoque de segurança do sistema, pois o desvio-padrão da soma é menor que a soma dos desvios;

- Existem os custos fixos de operação de cada armazém. Se por exemplo um armazém é fechado, alteram-se os patamares de custo do sistema.

Vale explicar melhor o princípio que norteia o segundo item. Na figura 3.6, o estoque de segurança do armazém 1 é proporcional a  $\sqrt{u_1 + u_2 + u_3}$ , enquanto o estoque de segurança do armazém 2 é proporcional a  $\sqrt{u_4 + u_5}$ . Se o armazém 2 é fechado, o armazém 1 passa a atender toda a demanda da rede, portanto seu estoque de segurança passa a ser proporcional a  $\sqrt{u_1 + u_2 + u_3 + u_4 + u_5}$ , com montante menor do que  $\sqrt{u_1 + u_2 + u_3} + \sqrt{u_4 + u_5}$ . Este é o fenômeno conhecido na literatura por *Risk Pooling*, há um ganho de escala na consolidação de estoque de segurança em função da redução do desvio padrão do sistema como um todo.

O objetivo é desenvolver um modelo que identifique a melhor configuração de instalações e desenho da rede para atendimento de um conjunto de varejistas (clientes) que não pertencem à mesma empresa.

As seguintes premissas foram consideradas na modelagem:

1. O modelo é formulado para cada produto;
2. Cada produto é fabricado em uma planta;
3. A planta é fixa e conhecida;
4. A política de estoque na planta não é considerada;
5. A política de estoque nos armazéns é baseada em ponto de pedido com revisão contínua ( $Q_i, RP_i$ );
6. A demanda nas lojas segue uma distribuição normal;
7. O tempo de ressuprimento da planta para cada armazém é fixo;
8. O nível de serviço (que define a probabilidade de não faltar estoque) é o mesmo para toda a rede;
9. Não há restrição de capacidade para a colocação de ordens, o que leva a formulação do lote econômico;

10. A demanda entre as lojas são independentes (não existe correlação entre as demandas das lojas).

Sejam os seguintes parâmetros e variáveis definidos pelos autores:

- $HC_i$  - Custo de manutenção de estoque no armazém  $i$ ;
- $OC_i$  - Custo de colocação de pedido de ressuprimento no armazém  $i$ ;
- $TC_{ij}$  - Custo de transporte do armazém  $i$  para o cliente  $j$ ;
- $RC_i$  - Custo de transporte da planta ao armazém  $i$ ;
- $F_i$  - Custo fixo de instalação do armazém  $i$ ;
- $LT_i$  - Tempo de ressuprimento de estoque para o armazém  $i$ ;
- $K$  - Nível de serviço que define a probabilidade de não faltar estoque. É único para a rede;
- $TH$  - Horizonte de planejamento sob o qual incorre o custo de instalação de um armazém;
- $D_i$  - Demanda agregada no armazém  $i$ ;
- $U_i$  - Variância agregada no armazém  $i$ ;
- $Z_i$  - Variável que assume o valor 1 se o armazém  $i$  opera e 0 caso contrário;
- $Y_{ij}$  - Variável que assume valor 1 se o armazém  $i$  serve o cliente  $j$  e 0 caso contrário.

O modelo matemático de Miranda e Garrido [34] é formalizado a seguir:

**- Função objetivo:**

$$\begin{aligned}
\text{minimizar } & \sum_{i=1}^N F_i \cdot Z_i + \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M TH \cdot (RC_i + TC_{ij}) \cdot d_j \cdot Y_{ij} + \\
& \sum_{i=1}^N TH \cdot \sqrt{2 \cdot HC_i \cdot OC_i} \cdot \sqrt{D_i} + \\
& \sum_{i=1}^N TH \cdot HC_i \cdot K \cdot \sqrt{LT_i} \cdot \sqrt{U_i}
\end{aligned} \tag{3.48}$$

**- sujeito a:**

$$\sum_{i=1}^N Y_{ij} = 1, \quad \forall j = 1, \dots, M \tag{3.49}$$

$$\sum_{j=1}^M (d_j \cdot Y_{ij}) = D_i, \quad \forall i = 1, \dots, N \tag{3.50}$$

$$\sum_{j=1}^M (d_j \cdot Y_{ij}) \leq Cap_i \cdot Z_i, \quad \forall i = 1, \dots, N \tag{3.51}$$

$$\sum_{j=1}^M (u_j \cdot Y_{ij}) = U_i, \quad \forall i = 1, \dots, N \tag{3.52}$$

$$Z_i, Y_{ij} \in \{0, 1\}, \quad \forall i, j \tag{3.53}$$

A função objetivo 3.48 minimiza o total de custos logísticos da rede. Fazem parte desse custo total: os custos de instalação dos armazéns, transporte da planta aos armazéns e dos armazéns às plantas, os custos manutenção de estoque e ressuprimento (sob a premissa do lote econômico) e os custos de manutenção do estoque de segurança.

As variáveis de decisão do modelo ( $Z_i$  e  $Y_{ij}$ ) respondem respectivamente às seguintes questões:

1. Quantos e quais armazéns operam;
2. Quais armazéns atendem quais lojas.

A primeira resposta define qual a estrutura física da rede. Cada armazém tem uma capacidade conhecida, e a escolha de um armazém para operar é condicionada a esta capacidade, fato garantido pela restrição 3.51 do modelo.

A segunda resposta do modelo define implicitamente a quantidade de demanda que está associada a cada armazém (ver restrição 3.50). Em outras palavras, define o estoque de ciclo que cada armazém terá para atender às demandas a ele associadas. Ainda, é definido qual montante de estoque de segurança deve ser mantido em cada armazém, através da soma da variabilidade das demandas das lojas associadas à instalação (fato garantido pela restrição 3.52).

Observa-se que existe um "acoplamento" entre o estoque de ciclo e o estoque de segurança no armazém (conforme a associação de lojas). A variável  $Y_{ij}$  define que o estoque de ciclo e o estoque de segurança para atender o padrão de demanda da loja  $j$ , estão localizados no armazém  $i$ .

Miranda e Garrido [34] descrevem uma aplicação numérica do modelo em uma empresa de alimentos perecíveis. A característica principal do ambiente onde foi implementado o modelo é a presença de produtos de alto valor agregado, conseqüentemente implicando em altos custos de estoque.

Foi considerada a demanda de um tipo de produto, em uma instância com 20 clientes e 10 armazéns. Foram realizadas simulações de variação de parâmetros, sendo considerados 5 níveis de custo de estocagem, 5 níveis de coeficiente de variação de vendas e 4 níveis de serviço diferentes, gerando 100 casos diferentes.

Os autores fizeram dois tipos de análises comparativas. Primeiro, compararam os resultados do modelo proposto obtidos através de um algoritmo de *branch and bound* com os resultados de um modelo clássico de localização de instalações, sem considerar questões de estoque no desenho da rede (em outras palavras, fazendo  $HC_i = 0$  no modelo). Também foram comparados os resultados do mesmo modelo clássico com os resultados do modelo proposto implementado através de uma heurística de Relaxação Lagrangeana.

Os resultados mostraram que o modelo proposto fornece, na pior das hipóteses, um resultado igual ao do modelo clássico de localização de instalações. Em situações onde a variabilidade da demanda e o custo de estoque do produto se mostraram altos, o ganho

obtido na aplicação do modelo proposto em relação ao modelo tradicional foi maior, fato ainda potencializado para altos níveis de serviço. Os percentuais de ganhos variaram conforme os níveis de parâmetro de cada simulação, chegando a patamares superiores a 10% para altos custos de estoque e variabilidade de demanda. Observou-se ainda que os ganhos obtidos com a heurística em relação ao modelo clássico de localização foram menores quando comparados aos ganhos obtidos pelo algoritmo exato.

# Capítulo 4

## Modelo Proposto

O objetivo deste capítulo é apresentar e discutir o modelo proposto para a abordagem do problema em estudo.

A formalização do modelo proposto é realizada com base na abordagem de modelagem de problemas de pesquisa operacional sugerida por Wagner [47] e Luna [29]. Ambos propõem a abordagem dividida em etapas. Wagner [47] considera que são estágios padrões na aplicação de análises quantitativas e que nem sempre estão plenamente separados no tempo, podendo ser conduzidos simultaneamente. Tal abordagem é composta dos seguintes estágios:

1. Formulação do problema
2. Construção do modelo
3. Execução das análises
4. Implementação dos resultados

No primeiro estágio são feitas diversas considerações sobre o problema, buscando-se primeiramente realizar uma descrição qualitativa do mesmo. Tal descrição é neste trabalho conduzida à luz dos fundamentos de logística empresarial abordados na seção 3.1, onde foi descrito como o triângulo de decisões logísticas afeta a política de atendimento

ao cliente. Após o diagnóstico qualitativo, são especificados os objetivos do modelo, algumas características e premissas a serem consideradas e, por fim, é definido seu escopo. Em seguida, são identificados os diversos elementos a serem considerados na modelagem, como os custos relevantes e outros dados.

Na fase de construção do modelo são definidos quais são os elementos de entrada e de saída na modelagem. Com a definição destes elementos, é realizado de forma sequencial e detalhada o raciocínio de modelagem do problema (de forma semelhante ao trabalho de MIRANDA;GARRIDO [34]). Finalmente o modelo proposto é apresentado, seguido de uma discussão sobre as diferenças entre o modelo referencial e o desenvolvido para a abordagem do problema.

O estágio de execução de análises é abordado no capítulo 5.

## 4.1 Formulação do problema

### 4.1.1 Diagnóstico do ambiente

Uma tarefa importante que auxilia na identificação dos elementos do problema em uma abordagem quantitativa é uma análise qualitativa do ambiente (WAGNER [47]). O diagnóstico do ambiente é descrito com base na vivência do autor da dissertação no contexto estudado.

A descrição da rede de distribuição e identificação da situação problema foram feitas nas seções 2.3 e 2.4. Para uma melhor compreensão do ambiente, é detalhado a seguir o posicionamento logístico (ver seção 3.1.1) da empresa com relação ao atendimento do canal de distribuição do varejo. Procura-se descrever a política de atendimento da rede de distribuição e as estratégias de distribuição/estoque, instalações e transporte utilizadas. Busca-se estabelecer uma relação entre a política de atendimento e as estratégias que a suportam, visando o auxílio na definição dos objetivos do modelo a ser formulado (segundo WANKE [48], a política de atendimento ao cliente é resultado das decisões integradas de estoque, localização e transporte). Outros aspectos e particularidades do contexto também são levantados.

#### 4.1.1.1 Política de atendimento à demanda

A rede de distribuição segue a estratégia de antecipação da demanda, a qual é caracterizada pelo planejamento das operações logísticas baseado nas previsões de vendas. O fluxo de produtos é direcionado do fabricante em direção ao consumidor final. Segundo Wanke [49], essa estratégia de atendimento é apropriada quando o tempo de resposta das operações é longo e não existe visibilidade da demanda. De fato, no setor de siderurgia, os tempos de resposta das operações são bastante longos, sobretudo no que se diz respeito ao processo produtivo. Geralmente são empresas com uso intensivo de capital, o que implica em custos fixos elevados. É perseguida uma estratégia de aumento de escala na produção, o que sugere menos trocas de programas. Um produto pode ter seu tempo de ressuprimento extremamente elevado quando sujeito aos programas fixos de produção ao longo de um período. Portanto, a produção não pode aguardar o pedido de um cliente ou loja para iniciar suas atividades. Deve haver uma certa quantidade de produto disponível em estoque, ao menos na fábrica. Em decorrência disto, a política de produção adotada pela empresa é a produção para estoque.

Em relação ao outro aspecto que define a política de atendimento, a visibilidade da demanda, pode-se afirmar que a empresa consegue obter dados completos da demanda e em tempo real, graças à plataforma de tecnologia de informação utilizada (ver seção 2.3.2). Portanto, conforme ilustra a figura 3.3, a empresa se encontra em um quadrante onde seria recomendada uma política híbrida planejar-reagir, ou seja, podem existir oportunidades para reagir à demanda na distribuição.

#### 4.1.1.2 Política de distribuição e estoque

A política de distribuição está intimamente ligada à forma como se processa a distribuição e onde os estoques estão localizados ao longo da rede.

O plano de distribuição para cada uma das instalações é gerado no módulo de planejamento do suprimento da rede do sistema de *SCM* da empresa (ver seção 2.3.2.1), e é baseado nas previsões de venda de cada produto. O método empregado atualmente por este módulo está fundamentado em técnicas de planejamento das necessidades de

distribuição (*DRP-Distribution Requirements Planning*<sup>1</sup>). Conforme afirmam Bowersox e Closs [8], um sistema de planejamento baseado em técnicas de *DRP* exige previsões de demanda assertivas para que se garanta sua eficácia. Contudo, os níveis de aderência entre previsões e vendas reais variam muito de produto a produto em cada loja. O apêndice A mostra para vários produtos de uma loja da rede de distribuição como os níveis de assertividade das previsões variam item a item (a coluna "Aderência Previsão/Vendas" representa o quociente entre previsão de vendas(t) e vendas(t)). Assim, a aplicação da técnica *DRP* para execução do plano de distribuição para todos os produtos de forma indiscriminada é no mínimo questionável. De forma não sistêmica, alguns produtos identificados com baixos índices de aderência de previsão já estão atualmente sendo tratados de forma diferenciada, à revelia do plano gerado pelo *DRP* (para estes produtos estão sendo feitas revisões contínuas de estoque ao longo do mês ou em intervalos periódicos para se analisar a necessidade de ressuprimento).

Conforme elucidado na seção 3.1.1, a decisão sobre a localização de estoques na rede afeta sobremaneira o posicionamento logístico da empresa e por consequência a política de atendimento ao cliente. Segundo Wanke [48], dependendo da interação e combinação de alguns fatores pode ser viável para uma empresa a centralização de estoques (parcial ou total) em uma rede. Alguns desses fatores são: valor do produto, grau de obsolescência, acesso à informação em tempo real, previsibilidade de demanda e giro de estoque. Enquanto o grau de obsolescência não se aplica em princípio aos produtos siderúrgicos<sup>2</sup>, já foi visto que a informação de demanda é acessível em tempo real para a empresa. Os demais fatores variam bastante para cada produto. No apêndice B, os mesmos produtos apresentados no apêndice A são novamente relacionados com o intuito de ilustrar de que modo fatores como valor do produto, giro de estoque e coeficiente de variação de vendas (quociente da divisão do desvio padrão de vendas e demanda média) variam item a item. Os dados apresentados são reais, preservando-se a identidade dos produtos, como no apêndice A.

De acordo com o explanado na identificação da situação problema, os estoques estão localizados em todas as instalações da rede, ou seja, existe atualmente uma descentralização total dos mesmos.

<sup>1</sup>Detalhes sobre esta técnica podem ser vistas em Bowersox e Closs [8]

<sup>2</sup>Este conceito está associado ao ciclo de vida do produto, que no caso de produtos siderúrgicos é estável no tempo, ao contrário do setor de informática, por exemplo

#### 4.1.1.3 Política de instalações

A estratégia de localização apresenta dois tipos de decisões principais: a localização de instalações e a configuração da rede logística. Conforme definição mercadológica, as instalações são fixas e não passíveis de serem alteradas, pois a presença física das lojas em cada região de demanda é necessária. No que tange ao desenho atual da rede, todas as lojas são abastecidas diretamente por todas as fontes fornecedoras de produtos, não existindo pontos intermediários. Uma possível mudança nessa política seria uma reestruturação da configuração da rede no que se refere a fluxos de atendimento.

#### 4.1.1.4 Política de transporte

O modal de transporte mais utilizado pela empresa para distribuição dos produtos às lojas é o rodoviário. Outros modais de transporte (como o ferroviário e cabotagem), embora mais baratos, são mais lentos e muito mais sujeito às incertezas, impactando os níveis de serviço no que tange ao tempo de entrega, além de exigir análises mais profundas de dimensionamento de estoque de segurança. Além disso, têm participação mínima no processo de distribuição às lojas e não serão considerados neste trabalho.

A empresa não opera com transporte próprio, tendo um cadastro de transportadoras que operam em certas rotas pré-estabelecidas.

#### 4.1.1.5 Outros aspectos relevantes

Além das estratégias que definem o posicionamento logístico da rede de distribuição, outros pontos são importantes na descrição do diagnóstico do ambiente:

- Aspectos de capacidade - tais fatores são relevantes e levados em consideração no planejamento tático logístico, sobretudo porque a análise é multi-produto. São consideradas as restrições de capacidade produtiva, de armazenagem nas lojas e de expedição das fábricas;
- Aspectos fiscais - na rede de distribuição, os aspectos fiscais não são levados em consideração para se determinar os fluxos de produtos para a venda, porque obri-

gatoriamente as vendas para uma região de varejo devem ocorrer da própria loja da região. Nas operações de transferência de estoques entre instalações da empresa, esses aspectos não são considerados na geração do plano de distribuição pelo sistema de *SCM*;

- Aspectos de expedição - todo pedido de venda ou transferência de estoque colocado em uma fábrica tem dois dias para ser expedido. Isto ocorre devido ao tempo de formação de carga, e é especialmente relevante quando estiver sendo tratado o conceito de tempo de ressuprimento;
- Aspectos de nível de serviço - atualmente o nível de serviço em termos de disponibilidade de estoque é garantido por um estoque de segurança nas lojas que é calculado dinamicamente em função da previsão de vendas. Quando as previsões não são assertivas pode ocorrer falta de produtos ou excesso de estoque na loja.

#### 4.1.2 Objetivos do modelo

Com base no diagnóstico levantado, é possível destacar alguns pontos no que se refere às estratégias logísticas utilizadas na rede de distribuição:

- A estratégia de produção deve ser mantida para estoque (baseada nas previsões de venda), pois o tempo de resposta das operações é longo;
- A política de transportes é fixa e uniforme para toda a rede, o modal utilizado é o rodoviário;
- A política de instalações no que diz respeito ao número e localização de lojas também é fixada.

No cenário estudado, uma política logística que é passível de ser alterada, e que tem ligação direta com a política (e custos) de atendimento à demanda, é a política de distribuição e estoque. A alteração dessa política está associada a uma revisão do desenho da rede de distribuição.

Conforme sugere Ballou [6], a diferença entre os produtos deve ser considerada em uma estratégia de alocação de estoques entre as instalações da rede. Apenas para exemplificar,

são considerados a seguir dois produtos da rede de distribuição (ver apêndice B) e suas diferenças em alguns aspectos:

<b>Aspectos do Produto</b>	<b>Produto 17</b>	<b>Produto 3</b>
Valor (R\$/t)	691	3124
Coef Variação Vendas	5%	143%
Giro (4 meses)	5.2	0.1
Aderência Previsão/Vendas	100%	344%

Tabela 4.1: Características de dois produtos da rede de distribuição

O produto 17 tem um valor agregado baixo quando comparado ao produto 3, além de ter uma baixa variabilidade de vendas, alto giro de estoque e excelente assertividade na previsão de vendas, ao contrário do produto 3. Segundo Wanke [48], a análise desses fatores sugere estratégias de alocação de estoques diferentes para cada produto (tendência a centralizar o produto 3 e descentralizar o produto 17). É interessante, portanto, que o modelo decida quantitativamente qual a melhor alocação de estoques na rede de distribuição para um determinado produto, levando em conta alguns fatores como exposto na tabela 4.1.

Wanke [48] afirma que uma empresa deve escolher a política de atendimento à demanda que minimize o custo logístico total de transporte, armazenagem e manutenção de estoques para determinado nível de serviço exigido. Para o problema em estudo, o que fundamentalmente afeta a política de atendimento é a política de distribuição e alocação de estoques, conforme descrito no início dessa seção.

Assim, o modelo deve ter como objetivo definir qual deve ser a localização dos estoques entre as lojas de forma a se obter um desenho de rede de custo logístico mínimo para um dado nível de atendimento.

### 4.1.3 Características do problema

Após a definição dos objetivos do modelo é necessário definir alguns pontos e descrever algumas características do problema a serem contempladas na modelagem:

- Não é feita análise de alocação de produção às fábricas, pois cada produto é produzido somente em uma fábrica;
- O modelo é desenvolvido especificamente para cada produto, ou seja, para cada problema existe apenas uma fábrica fornecedora;
- Não serão consideradas análises de capacidade de fabricação ou estocagem nas lojas (pelo fato do modelo não ser multi-produto e não existir capacidade específica de estocagem por produto);
- A demanda nas lojas possui um comportamento estocástico, com média e variância conhecidas;
- As lojas incorrem em 2 tipos de estoques: os estoques de ciclo (ou regular) e os estoques de segurança (ver seção 3.1.2);
- Cada loja pode servir como centro de distribuição para as demais. Neste caso, fica entendido que há centralização de estoque com postergação da distribuição<sup>3</sup>. A loja que serve como centro de distribuição guarda o estoque para a loja a qual ela serve, seja estoque de ciclo ou de segurança;
- O horizonte de planejamento considerado no modelo é semanal. Os dados referentes ao histórico de vendas são de 1 ano (outubro de 2004 a setembro de 2005, ou seja, 53 semanas).

#### 4.1.4 Premissas do modelo

São consideradas as seguintes premissas para a modelagem:

- As fábricas são fixas e conhecidas;
- É considerado que a fábrica tem estoque para pronto atendimento às lojas, pois as fábricas produzem para estoque com uma margem de segurança em relação à previsão de venda;

---

<sup>3</sup>A postergação de distribuição é comentada na seção 3.1.1.1

- O tempo de ressuprimento de uma fábrica para uma loja é considerado fixo, logo o estoque de segurança deve ser dimensionado levando em conta apenas a variabilidade da demanda nas lojas;
- Não há restrição de capacidade para a colocação de ordens de ressuprimento;
- A política de estoque para qualquer loja é baseada nas premissas de lote econômico com ponto de pedido e revisão contínua (ver seção 3.1.2);
- Não são considerados aspectos fiscais;
- A transferência entre lojas só é possível quando uma loja guarda o estoque da outra. Por exemplo, se a loja 1 guarda o estoque da loja 2 e o estoque da loja 3 está alocado a ela mesmo, a única transferência admitida nesse sistema é da loja 1 para a loja 2;
- Na hipótese da loja 1 guardar o estoque da loja 2, a transferência só ocorre no momento da venda do produto na loja 2 (postergação). O prazo máximo para chegada do material na loja 2 após a colocação de um pedido de transferência na loja 1 é de 4 dias, prazo limite no qual um cliente de uma loja pode esperar pelo material<sup>4</sup>;
- Uma loja só pode ser atendida por um único ponto na rede, ou seja, o estoque de ciclo ou segurança de uma loja só pode estar localizado em uma única instalação;
- Se uma loja guarda seu próprio estoque de segurança, então, obrigatoriamente, ela também deve guardar seu estoque de ciclo. Isto ocorre porque não faz sentido, do ponto de vista gerencial, uma loja ter fisicamente um montante de estoque para lidar com as incertezas de sua demanda e o estoque para lidar com a demanda corrente estar em outra loja;
- As ações da concorrência admitem a prática da postergação na rede nos prazos definidos;
- As demandas das lojas são independentes, não existindo correlação direta entre elas;
- O comportamento da demanda nas lojas segue uma distribuição normal de probabilidade;
- O nível de serviço (que define a probabilidade de não faltar estoque) é o mesmo para toda a rede.

---

<sup>4</sup>Admite-se que o consumidor efetua compras programadas desses produtos. Uma discussão sobre perfis e comportamentos de compra é feita por Kotler [27]

### 4.1.5 Escopo do problema

A rede de distribuição da empresa, conforme apresentada na seção 2.3.1, consiste em uma rede de 25 lojas com mais de 2000 produtos diferentes sendo movimentados. A modelagem é limitada a um subconjunto do universo descrito por questões de praticidade e disponibilidade de dados. A delimitação do escopo é realizada com base na definição do número de lojas a ser considerado no modelo e do número de produtos que determina o número de problemas que serão analisados.

#### 4.1.5.1 Quantidade de lojas a ser tratada

Existem três razões para a redução do escopo do problema em relação ao número de lojas que deve ser tratado no modelo:

1. Disponibilidade de dados - embora existam hoje 25 lojas na rede de distribuição, algumas delas foram implantadas há pouco tempo e não existe histórico de vendas suficiente para garantir uma representatividade de informação. Portanto, as lojas com histórico de vendas menor que 1 ano no momento da coleta de dados foram desconsideradas para fazer parte do escopo do modelo;
2. Limitação geográfica - esta razão é consequência da premissa de que uma loja deva demorar no máximo 4 dias para transferir o estoque para outra loja (ver seção 4.1.4) na ocasião da venda. A loja que guarda o estoque de outra loja tem 2 dias para formação de carga (prazo para consolidar mais produtos e reduzir gastos com transporte) e mais 2 dias de tempo de viagem. A decorrência imediata desse prazo máximo de viagem é que a centralização de estoques só deve ocorrer quando as lojas estiverem a um determinado raio de distância rodoviária uma da outra. Essa distância máxima para consolidação de estoques é de mil quilômetros (1000 Km), pois se admite que um transporte padrão (caminhão) percorre 500 Km em um dia;
3. Complexidade computacional - este aspecto será tratado ao final do capítulo.

Considerando as restrições 1 e 2 descritas acima, são apresentados a seguir alguns possíveis grupamentos de lojas da rede de distribuição para uma eventual centralização de estoques:

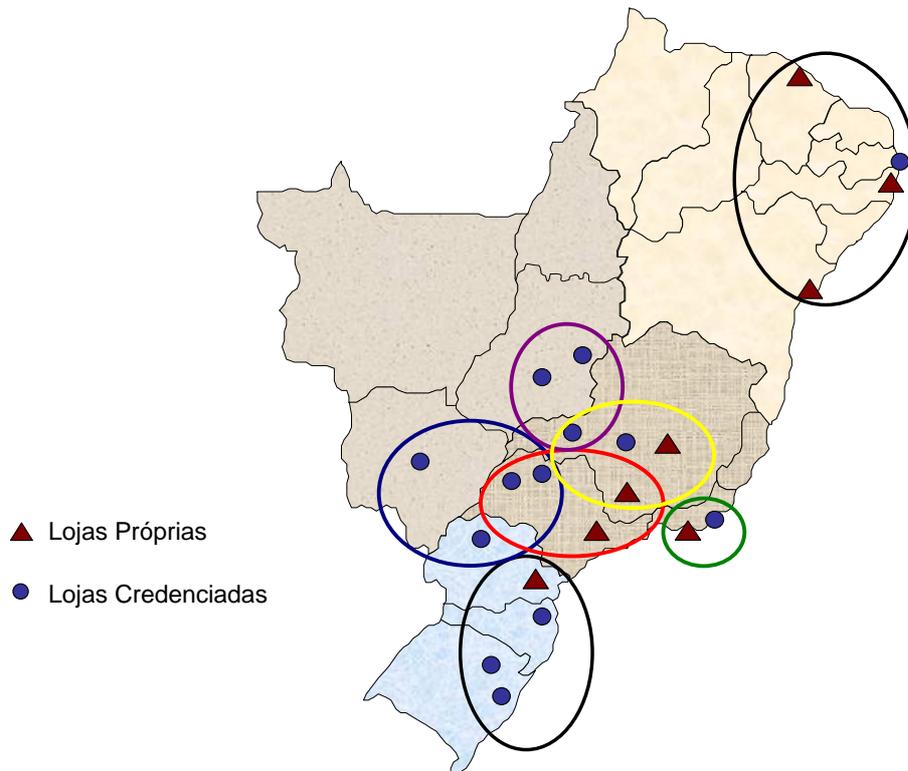


Figura 4.1: Grupamentos de lojas candidatos a escopo do modelo

Nota-se primeiramente na figura 4.1 uma redução do número de lojas em relação à figura 2.4. Restaram 21 lojas, aquelas que possuem histórico representativo. Com base em discussões gerenciais e conhecimentos de rotas operacionais de transporte, chegou-se a 7 possíveis grupamentos para modelagem do problema. O número máximo de lojas em cada um deles é 4. Os grupamentos da região sudeste tem um raio de abrangência menor do que os da região sul e nordeste. Isto se deve ao fato de que na região sudeste a concorrência é maior; logo, a amplitude geográfica de possíveis centralizações de estoque deve ser menor, devido à pressão desse mercado por disponibilidade de produtos mais imediata.

Foi escolhido o grupamento de lojas da região nordeste como escopo do modelo. Seria possível desenvolver um modelo para cada região identificada em uma perspectiva nacional. Entretanto, devido ao tempo disponível para elaboração da dissertação e visando uma maior praticidade na análise dos resultados, a modelagem é restrita a um grupamento. Desse ponto em diante, as lojas dessa região serão identificadas por uma numeração sequencial, ou seja, loja 1, loja 2, loja 3 e loja 4.

#### 4.1.5.2 Quantidade de produtos a ser tratada

Para uma análise mais completa do grau de centralização de estoques, é interessante escolher produtos que sejam comuns às instalações, pois existiria um maior número de possibilidades de alocação de estoques neste caso. Com base nisso, foram levantados os produtos comuns às quatro lojas da região nordeste, chegando-se a um número de 111 produtos. Estes produtos tiveram movimentação de estoque no período de outubro de 2004 a setembro de 2005.

Vale lembrar que o modelo é definido para cada produto, ou seja, para cada produto define-se um problema diferente. Embora possível, a análise e apresentação dos resultados para os 111 produtos nesse trabalho poderia ser exaustiva. Portanto, foi feita uma classificação ABC dos 111 produtos tendo como critério de segmentação de classes a quantidade média semanal vendida nas quatro lojas do escopo. Foi verificado por esta análise que 80% das vendas do escopo são representados por 11 produtos (Produtos Classe A). Outros 29 produtos representam 14% das vendas (Produtos Classe B). Os demais 71 produtos têm participação pequena nas vendas, concentrando somente 6% das mesmas. A figura a seguir ilustra

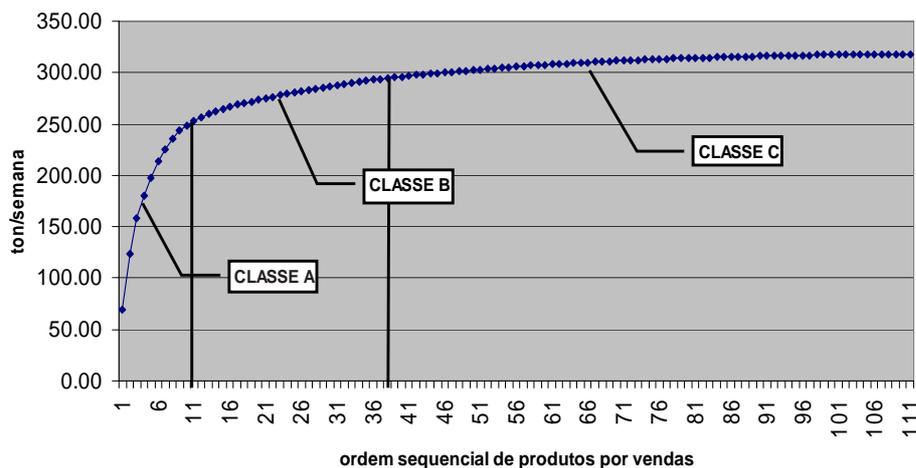


Figura 4.2: Classificação ABC de produtos comuns ao escopo de lojas

Com base na classificação ABC foi definido o escopo de produtos a ser tratado. Foram considerados 25 produtos, dos quais:

- 11 produtos são os pertencentes à Classe A, ou seja, representam 80% do volume de vendas das lojas consideradas;
- 9 produtos foram escolhidos aleatoriamente dentro da Classe B;
- 5 produtos foram escolhidos aleatoriamente dentro da Classe C.

Os produtos podem ser visualizados nos apêndices A e B deste trabalho. Os produtos foram identificados com uma numeração sequencial de 1 a 25, visando-se resguardar a confidencialidade dos dados.

#### 4.1.6 Elementos do problema

Com base no diagnóstico do ambiente e na definição dos objetivos, características e premissas que devem cercar o modelo a ser formulado, é possível identificar quais elementos devem estar presentes na modelagem.

##### 4.1.6.1 Custos logísticos relevantes

O objetivo do modelo é configurar a alocação de estoques e estrutura de atendimento da rede de menor custo logístico. Assim sendo, é necessário explicar os custos importantes envolvidos no problema que devem fazer parte da construção do modelo:

- Custos de transporte - são os custos associados ao transporte de produtos entre instalações da rede. Podem ser de dois tipos: custo de transporte da fábrica à loja e custo de transporte entre lojas. Cada viagem realizada por uma transportadora é remunerada com base em uma tabela de fretes que possui um valor base para cada origem e destino. A esta tarifa básica podem ser acrescidas taxas adicionais, como por exemplo: entregas adicionais, descarga de produtos que requerem mais cuidados, uso de tipo de veículo diferenciado, estadias, etc. Para o modelo serão consideradas as tarifas básicas que representam o grande montante da estrutura de custos de transporte. As tarifas são medidas em reais por tonelada (R\$/t);

- Custos de estocagem - Ocorrem nas lojas da rede. Os custos de estocagem são medidos como o custo financeiro do capital imobilizado na forma de produtos, e é mensurado como o produto de uma taxa de atratividade da empresa (a taxa considerada é 2% a.m. ou 0.46% a.s) pelo valor do estoque na instalação (custo do produto no estoque, ou seja, agregam-se os custos de produção e custos de transporte). Este custo unitário é mensurado em R\$/t.semana. O custo de estocagem é proporcional ao estoque médio para um determinado período;
- Custos de colocação de pedidos - Também chamados de custos de aquisição do estoque. São custos decorrentes de processamento de pedidos e preparação de lotes nas fábricas. Estes custos são fixos para cada produto, independentemente do tamanho do pedido colocado. Para cada problema (produto diferente) existe um custo de colocação de pedido fixo associado. Este custo é mensurado em R\$;
- Custos de guarda do estoque de ciclo - Estes custos ocorrem sempre que existe centralização de estoques de ciclo em uma loja para posterior envio à(s) loja(s) servida(s) pela unidade centralizadora. Estes custos ocorrem devido à necessidade de alocação de espaço extra na loja para os produtos que não se destinarão a ela própria, do manuseio dos materiais nas operações de carregamento e descarregamento, além da administração burocrática dos pedidos de transferência para outras lojas. É como se a unidade centralizadora de estoque cobrasse das demais lojas um preço de serviço prestado. Foi considerado um valor padrão desse custo para as lojas próprias. Para unidades credenciadas, este valor foi estipulado como sendo o dobro, pois tanto pessoal como estrutura não são da empresa, portanto o valor do serviço prestado nestas unidades deve ser mais caro. Este custo é mensurado em R\$/t;
- Custos de guarda do estoque de segurança - Estes custos ocorrem em situação semelhante ao item anterior, porém são relativos à centralização de estoque de segurança em uma loja. O estoque de segurança centralizado tem como objetivo garantir uma disponibilidade de estoque nas lojas assistidas pela loja centralizadora com uma dada probabilidade de faltar produto. Os custos ocorrem devido à necessidade de alocação de espaço extra na loja centralizadora, porém o manuseio de produtos e a administração burocrática desse tipo de estoque são teoricamente menores do que na centralização do estoque de ciclo, em função da menor movimentação do estoque de segurança em relação ao estoque de ciclo. Portanto, os custos de guarda do estoque de segurança são considerados mais baixos. Em princípio, o valor desse custo é estimado como um percentual do valor do custo de guarda do estoque de ciclo.

Para este custo, a relação dos valores entre as lojas próprias e lojas credenciadas é a mesma que na guarda do estoque de ciclo.

Vale ressaltar que os custos de produção, embora importantes para a empresa, não são necessários para a modelagem proposta, pois as fábricas são especialistas, não existindo decisão quanto à alocação de produção. Portanto, esse custo não será considerado na função objetivo. De forma indireta, esses custos são considerados no cálculo do custo de estocagem, pois quanto mais alto for o valor do produto em estoque (quanto mais caro é produzi-lo) mais alto é o custo de posse desse estoque.

#### 4.1.6.2 Outros elementos para a modelagem

Existem outros elementos importantes a serem considerados no modelo. Conforme visto na seção 4.1.2, produtos de diferentes perfis podem levar a diferentes decisões na determinação do grau de centralização de estoques em uma rede. Em vista disso, os seguintes elementos também são considerados na modelagem:

- Demanda média - É a demanda média semanal de um produto em uma loja;
- Variância - A variabilidade associada ao padrão estocástico da demanda de um produto em uma loja;
- Tempo de ressuprimento (*lead time*) - Tempo fixo em semanas que um produto leva para ser suprido em uma loja após a colocação de um pedido na fábrica;
- Estoque de ciclo - Montante de estoque em uma loja necessário para atender à demanda média de um produto;
- Estoque de segurança - Montante de estoque em uma loja necessário para cobrir as incertezas de demanda durante o tempo de ressuprimento com uma probabilidade definida;
- Nível de serviço - Define a probabilidade de não ocorrer falta de estoque em uma loja durante o tempo de ressuprimento de um produto. É considerado igual para todas as lojas no modelo.

É importante observar que esses elementos também estão presentes no modelo referencial de Miranda e Garrido [34].

## 4.2 Construção do Modelo

O modelo matemático deve conseguir responder em quais lojas os estoques devem estar localizados e qual o esquema de atendimento entre as lojas, de forma a estabelecer a rede logística de mínimo custo total sujeito às premissas definidas anteriormente. É preciso agora definir quais são os elementos de entrada e de saída do modelo, e quais as relações matemáticas entre esses elementos visando a construção da função objetivo do modelo.

### 4.2.1 Elementos de entrada e saída

A seguir são definidos os parâmetros e variáveis do modelo. As notações utilizadas são diferentes das adotadas por Miranda e Garrido [34]. Procurou-se adotar as notações em maiúsculas para os parâmetros e em minúsculas para as variáveis.

#### 4.2.1.1 Parâmetros

Os parâmetros são todos os dados de entrada para o modelo. Com base na definição dos elementos do modelo na seção 4.1.6, definem-se os seguintes dados de entrada com suas respectivas notações:

- $H$ : número de fábricas  $h$ ;
- $N$ : número de lojas do escopo do modelo;
- $D_j$  - demanda média semanal específica da loja  $j$ ;
- $U_j$  - variância da demanda específica da loja  $j$ ;
- $CT_i^h$  - custo de transporte da fábrica  $h$  para a loja  $i$ ;

- $CT_{ij}$  - custo de transporte da loja  $i$  para a loja  $j$  ( se  $i = j$ , então  $CT_{ij} = 0$ );
- $CE_i$  - custo de manutenção de estoque na loja  $i$ ;
- $CR_i$  - custo fixo de ressuprimento de estoque na loja  $i$ ;
- $K$  - nível de serviço (define a probabilidade de não faltar estoque);
- $LT_i^h$  - tempo de ressuprimento de uma ordem da fábrica  $h$  para a loja  $i$ ;
- $F_i$  - custo unitário na loja  $i$  quando esta guarda o estoque de ciclo da loja  $j$  (para  $i \neq j$ );
- $G_i$  - custo unitário na loja  $i$  quando esta guarda o estoque de segurança da loja  $j$  (para  $i \neq j$ ).

#### 4.2.1.2 Variáveis

As variáveis definem as respostas do modelo. Devem, portanto, orientar a tomada de decisão gerencial levantada para o problema, ou seja, onde na rede de distribuição devem estar localizados os estoques e qual o esquema de atendimento sugerido. Uma decorrência direta do esquema de atendimento é o fato de que uma loja  $i$  pode ter uma agregação de demandas de lojas  $j$  (definidas como  $D_j$ ), sendo portanto também uma variável. O mesmo raciocínio vale para a variância agregada de uma loja  $i$ . Logo, definem-se as seguintes variáveis para o problema:

- variáveis binárias  $x_{ij}$  que definem se a loja  $i$  guarda o estoque de ciclo da loja  $j$ , isto é:

$$x_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{se a loja } i \text{ guarda o estoque de ciclo da loja } j \\ 0 & \text{se não.} \end{cases}$$

observa-se que, se  $x_{ii} = 1$  então o estoque de ciclo está na própria loja  $i$  e se  $x_{ii} = 0$ , então existe algum  $x_{ki} = 1$  com  $k \neq i$ ;

- variáveis binárias  $y_{ij}$  que definem se a loja  $i$  guarda o estoque de segurança da loja  $j$ , isto é:

$$y_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{se a loja } i \text{ guarda o estoque de segurança da loja } j \\ 0 & \text{se não;} \end{cases}$$

- variáveis  $d_i \geq 0$  que definem a demanda total agregada na loja  $i$ ;
- variáveis  $u_i \geq 0$  que definem a variância total agregada na loja  $i$ .

Vale observar que se a variável  $x_{ij}$  for igual a 1, para  $i \neq j$ , então pode-se dizer que houve uma centralização de estoque de ciclo na loja  $i$ . De forma análoga, se a variável  $y_{ij}$  for igual a 1, para  $i \neq j$ , então pode-se dizer que houve uma centralização de estoque de segurança na loja  $i$ .

#### 4.2.1.3 Síntese dos elementos do modelo

Para melhor compreensão do papel de cada elemento no modelo, é ilustrado abaixo um grafo direcionado com os elementos definidos nas seções anteriores. A representação da

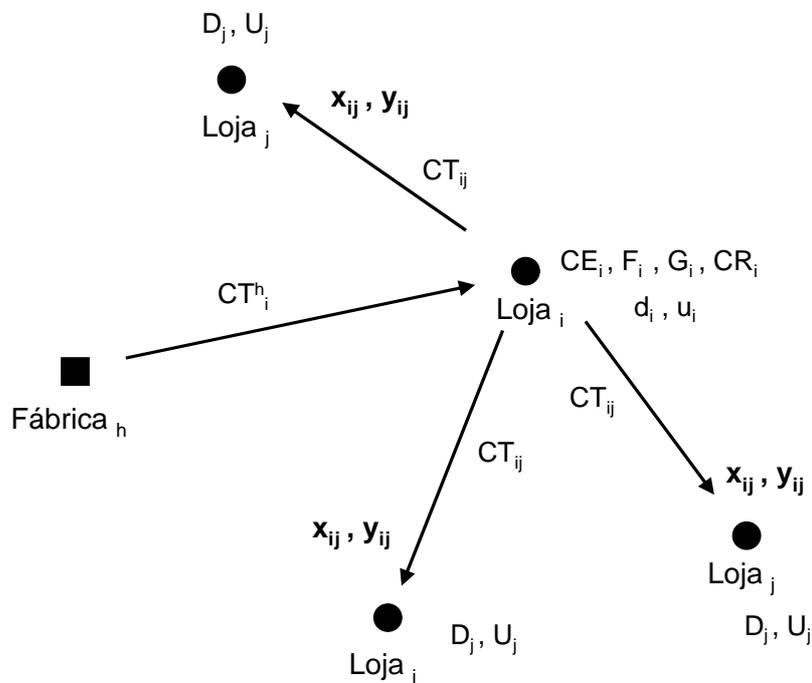


Figura 4.3: Grafo esquemático de uma possível configuração da rede nordeste

A tabela a seguir resume todas as definições de dados de entrada e saída para o modelo, descrevendo a associação do elemento no grafo, a notação definida e a unidade a ser considerada:

Elemento	Tipo	Grafo	Notação	Unidade
Demanda média da loja $j$	Entrada	Nó	$D_j$	t/semana
Variância específica da loja $j$	Entrada	Nó	$U_j$	$t^2/semana^2$
Custo de transporte fábrica-loja $i$	Entrada	Arco	$CT_i^h$	R\$/t
Custo de transporte loja $i$ -loja $j$	Entrada	Arco	$CT_{ij}$	R\$/t
Custo de estocagem	Entrada	Nó	$CE_i$	R\$/t.semana
Custo de Ressuprimento	Entrada	Nó	$CR_i$	R\$
Custo de guarda Estoque Ciclo	Entrada	Nó	$F_i$	R\$/t
Custo de guarda Estoque Seg	Entrada	Nó	$G_i$	R\$/t.semana
Nível de Serviço	Entrada	Nó	K	nº de desvios
Tempo de ressuprimento	Entrada	Arco	$LT_i^h$	semana
Localização Estoque Ciclo	Saída	Arco	$x_{ij}$	binária
Localização Estoque Seg	Saída	Arco	$y_{ij}$	binária
Demanda agregada na loja $i$	Saída	Nó	$d_i$	t/semana
Variância agregada na loja $i$	Saída	Nó	$u_i$	t/semana

Tabela 4.2: Síntese dos parâmetros e variáveis do modelo

#### 4.2.2 Relações matemáticas entre os elementos do modelo

Nesta seção é desenvolvido o raciocínio de modelagem dos elementos definidos anteriormente, visando estabelecer relações matemáticas apropriadas entre os elementos para a construção da função objetivo. Este exercício é similar ao desenvolvido no artigo de Miranda e Garrido [34], resguardada as devidas diferenças de conceitos e notações entre os modelos.

Toma-se por base o esquema da figura 4.3 como ponto de partida para o estabelecimento das relações entre os elementos do modelo. As relações são estabelecidas com base nos conceitos de estoque apresentados na seção 3.1.2.

Uma loja  $i$  qualquer possui demanda igual a  $d_i$  e variância igual a  $u_i$ . É adotada a política de revisão contínua de estoque com ponto de pedido de um lote  $q_i$ . Quando o estoque na loja atinge um nível  $RP_i$ , uma ordem é disparada para a fábrica  $h$  e chega no estoque da loja  $i$   $LT_i^h$  semanas depois. O nível de estoque deve cobrir a demanda durante o tempo de ressuprimento (*lead time*) com uma dada probabilidade ( $\text{Prob} \{D(LT_i^h) \leq RP_i\} = 1 - \alpha$ ), que corresponde ao nível de serviço do sistema, considerado o mesmo para toda a rede e denominado  $K$ . É assumido que a demanda durante o tempo de ressuprimento é normalmente distribuída.

Logo, pode-se determinar o valor de  $RP_i$  como sendo:

$$RP_i = d_i \cdot LT_i^h + K \cdot \sqrt{LT_i^h} \cdot \sqrt{u_i} \quad (4.1)$$

A fi

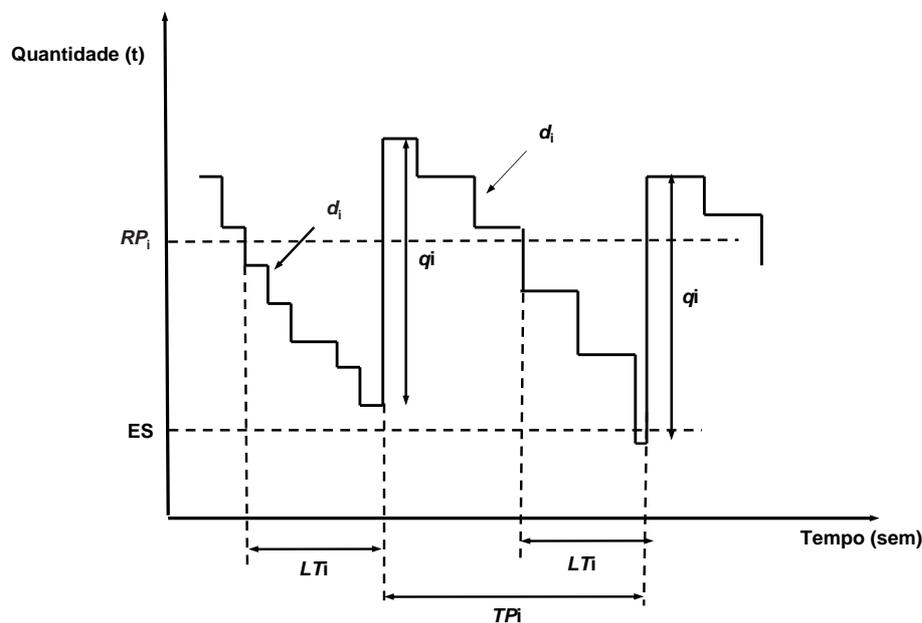


Figura 4.4: Evolução do nível de estoque na loja  $i$

Fonte: Adaptada de Miranda e Garrido [34]

Nota-se que o estoque de segurança na figura 4.4 é representado por ES e seu montante corresponde ao segundo termo da equação 4.1. O custo de estocagem na loja  $i$  entre duas

ordens sucessivas corresponde a:

$$CE_i \cdot q_i/2 + CE_i \cdot K \cdot \sqrt{LT_i^h} \cdot \sqrt{u_i} \quad (4.2)$$

O primeiro termo corresponde ao custo de manutenção do estoque de ciclo e o segundo termo ao custo de manutenção de estoque de segurança. O tempo transcorrido entre duas ordens consecutivas é dado por  $TP_i$  (quociente da divisão de  $q_i$  por  $d_i$ ). Considerando o custo de ressuprimento  $CR_i$  e o custo de transporte entre a fábrica  $h$  e a loja  $i$  igual a  $CT_i^h$ , obtém-se o custo operacional para o período  $TP_i$ :

$$(CE_i \cdot q_i/2 + CE_i \cdot K \cdot \sqrt{LT_i^h} \cdot \sqrt{u_i}) \cdot TP_i + CT_i^h \cdot q_i + CR_i \quad (4.3)$$

Dividindo a equação 4.3 por  $TP_i$  obtém-se:

$$(CE_i \cdot q_i/2 + CE_i \cdot K \cdot \sqrt{LT_i^h} \cdot \sqrt{u_i}) + (CT_i^h + CR_i/q_i) \cdot d_i \quad (4.4)$$

O segundo termo da equação acima diz respeito ao custo de ressuprimento da loja  $i$ . Agrega-se à loja  $i$  o custo de transporte  $CT_{ij}$  entre ela e as lojas  $j$  (para  $i = j$  tem-se que  $CT_{ij} = 0$ ). Ainda, pode-se estabelecer a seguinte relação, levando-se em conta a agregação de demanda na loja  $i$ :

$$\sum_{j=1}^N D_j \cdot x_{ij} = d_i \quad \forall i = 1, \dots, N \quad (4.5)$$

A variável  $x_{ij}$  determina se a loja  $i$  atende a demanda da loja  $j$  (a variável assume valor igual a 1 se a loja  $j$  é atendida pela loja  $i$ , e 0 caso contrário).

A partir do segundo termo da equação 4.4 e das considerações acima, pode-se reescrever o custo de ressuprimento da rede conforme a seguir:

$$\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N (CT_i^h + CT_{ij} + CR_i/q_i) \cdot D_j \cdot x_{ij} \quad (4.6)$$

Adicionando-se à equação acima o custo total de manutenção de estoque, temos a seguinte fórmula que representa o custo total do sistema:

$$\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N (CT_i^h + CT_{ij} + \frac{CR_i}{q_i}) \cdot D_j \cdot x_{ij} + \sum_{i=1}^N (CE_i \cdot q_i/2 + CE_i \cdot K \cdot \sqrt{LT_i^h \cdot \sqrt{u_i}}) \quad (4.7)$$

Fica claro pela equação 4.7 que para cada tamanho de lote  $q_i$  o sistema tem um comportamento de custo diferente. Logo, pode-se otimizar o valor de  $q_i$  para cada loja  $i$ . Derivando a equação 4.7 em relação a  $q_i$  para cada loja  $i$  e igualando a zero tem-se que:

$$\frac{CE_i}{2} - \frac{CR_i}{q_i^2} \cdot \sum_{j=1}^N D_j \cdot x_{ij} = 0$$

Reformulando a equação anterior chega-se no valor ótimo para  $q_i$ :

$$q_i^* = \sqrt{\frac{2 \cdot CR_i \cdot d_i}{CE_i}} \quad \forall i = 1, \dots, N \quad (4.8)$$

O resultado é semelhante ao do modelo de lote econômico (ver seção 3.1.2.1). Entretanto, é válido notar que, diferentemente do modelo estático, o valor de  $q_i^*$  depende da configuração da rede, pois  $d_i$  é variável.

Substituindo 4.8 em 4.7 é obtida a seguinte equação de custos:

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N (CT_i^h + CT_{ij}) \cdot D_j \cdot x_{ij} + \sum_{i=1}^N \sqrt{2 \cdot CE_i \cdot CR_i \cdot d_i} \\ + \sum_{i=1}^N CE_i \cdot K \cdot \sqrt{LT_i^h \cdot \sqrt{u_i}} \end{aligned} \quad (4.9)$$

Observa-se que o segundo termo da equação anterior representa o custo do lote econômico (considera o custo de estocagem e de ressurgimento fixo), conforme pode ser visto na seção 3.1.2.1.

Resta apenas considerar os custos referentes à centralização de estoques de ciclo e de segurança. Conforme definido na seção 4.1.6.1, quando o estoque de ciclo da loja  $j$  está localizado na loja  $i$  ou quando o estoque de segurança da loja  $j$  está localizado na loja  $i$ , incorre-se em custos de guarda de estoque na loja  $i$ . Vale observar que isto só ocorre quando  $i \neq j$ , ou seja, quando a loja  $i$  guarda produtos que não são para seu próprio consumo, e sim para outra loja. Os custos de centralização de estoques de ciclo e de segurança na loja  $i$  podem ser descritos como:

$$\sum_{i=1}^N \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^N F_i \cdot (D_j \cdot x_{ij}) + \sum_{i=1}^N \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^N G_i \cdot K \cdot \sqrt{LT_i^h} \cdot \sqrt{U_j \cdot y_{ij}} \quad (4.10)$$

A quantidade de estoque de ciclo na loja  $i$  que não serve a ela mesma é dada pela expressão  $\sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^N D_j \cdot x_{ij}$ . Ou seja, para uma dada loja  $i$ , é somada toda demanda que ela atende, exceto a dela mesma. Essa quantidade incorre em custos de guarda de estoque de ciclo.

Da mesma forma, a quantidade de estoque de segurança na loja  $i$  para fazer frente à variabilidade da demanda de outras lojas é dada pela expressão  $\sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^N K \cdot \sqrt{LT_i^h} \cdot \sqrt{U_j \cdot y_{ij}}$ .

Finalmente, é descrita abaixo a equação de custos totais da rede de distribuição. Somando as equações 4.9 e 4.10 chega-se à relação matemática entre os elementos do problema que define a função objetivo do modelo proposto:

$$\begin{aligned} & \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N (CT_i^h + CT_{ij}) \cdot D_j \cdot x_{ij} + \sum_{i=1}^N \sqrt{2 \cdot CE_i \cdot CR_i \cdot d_i} + \\ & \sum_{i=1}^N CE_i \cdot K \cdot \sqrt{LT_i^h} \cdot \sqrt{u_i} + \sum_{i=1}^N \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^N F_i \cdot (D_j \cdot x_{ij}) + \\ & \sum_{i=1}^N \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^N G_i \cdot K \cdot \sqrt{LT_i^h} \cdot \sqrt{U_j \cdot y_{ij}} \end{aligned} \quad (4.11)$$

Os custos envolvidos em cada parcela da equação 4.11 tem a dimensão temporal semanal, ou seja, a função objetivo mensura os custos em reais por semana (R\$/semana).

Objetivando uma melhor visualização da função objetivo pode-se fazer uma aglomeração de parâmetros, promovendo assim uma melhor separação entre os termos. A seguir são apresentadas as seguintes simplificações:

- $C1_{ij} = (CT_i^h + CT_{ij}) \cdot D_j$
- $C2_i = \sqrt{2 \cdot CE_i \cdot CR_i}$
- $C3_i = CE_i \cdot K \cdot \sqrt{LT_i^h}$
- $C4_i = F_i$
- $C5_i = G_i \cdot K \cdot \sqrt{LT_i^h}$

Reescrevendo a equação 4.11 com os termos definidos acima, tem-se uma visão mais clara da função objetivo:

$$\begin{aligned}
 & \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N C1_{ij} \cdot x_{ij} + \sum_{i=1}^N C2_i \cdot \sqrt{d_i} + \sum_{i=1}^N C3_i \cdot \sqrt{u_i} + \\
 & \sum_{i=1}^N \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^N C4_i \cdot (D_j \cdot x_{ij}) + \sum_{i=1}^N \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^N C5_i \cdot \sqrt{U_j \cdot y_{ij}}
 \end{aligned} \tag{4.12}$$

### 4.2.3 Modelo proposto de programação não-linear inteira mista

Com o estabelecimento da relação matemática entre os parâmetros e variáveis na seção anterior, é apresentado nesta seção o modelo matemático para abordagem ao problema dessa dissertação. Define-se para cada produto produzido na fábrica  $h = 1, \dots, H$  o seguinte problema de programação não-linear inteira mista:

#### - Função objetivo:

minimizar

$$\begin{aligned} & \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N C1_{ij} \cdot x_{ij} + \sum_{i=1}^N C2_i \cdot \sqrt{d_i} + \sum_{i=1}^N C3_i \cdot \sqrt{u_i} + \\ & \sum_{i=1}^N \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^N C4_i \cdot (D_j \cdot x_{ij}) + \sum_{i=1}^N \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^N C5_i \cdot \sqrt{U_j \cdot y_{ij}} \end{aligned} \quad (4.13)$$

#### - sujeito a:

$$\sum_{i=1}^N x_{ij} = 1, \quad \forall j = 1, \dots, N \quad (4.14)$$

$$\sum_{j=1}^N (D_j \cdot x_{ij}) - d_i = 0, \quad \forall i = 1, \dots, N \quad (4.15)$$

$$\sum_{i=1}^N y_{ij} = 1, \quad \forall j = 1, \dots, N \quad (4.16)$$

$$\sum_{j=1}^N (U_j \cdot y_{ij}) - u_i = 0, \quad \forall i = 1, \dots, N \quad (4.17)$$

$$x_{jj} - y_{jj} \geq 0, \quad \forall j = 1, \dots, N \quad (4.18)$$

$$x_{i,j}, y_{ij} \in \{0, 1\}, \quad \forall i, j \quad (4.19)$$

$$d_i, u_i \in \mathfrak{R}^+, \quad \forall i \quad (4.20)$$

Na função objetivo 4.13 tem-se como critério de otimização a minimização do custo total logístico, levando-se em conta os possíveis custos de transporte entre os nós ( $C1_{ij}$ ), os custos de manutenção de estoques e colocação de pedido tendo em conta uma política de lote econômico para os possíveis locais ( $C2_i$ ), os custos de manutenção dos estoques de segurança nos possíveis locais ( $C3_i$ ), e o custo de uma loja guardar o estoque de ciclo e/ou o estoque de segurança de outra loja em uma eventual centralização de estoques ( $C4_i$  e  $C5_i$ ).

A restrição 4.14 garante que a demanda de uma loja  $j$  só é atendida por um local, ou seja, que o estoque de ciclo de uma loja  $j$  esteja em apenas um local. A restrição 4.15 assegura que a demanda agregada de uma loja  $i$  é a soma das demandas das lojas  $j$  que a loja  $i$  atende. A garantia do estoque de segurança de uma loja  $j$  estar em apenas um local é assegurada pela restrição 4.16. A restrição 4.17 garante que a variância agregada de uma loja  $i$  é a soma das variâncias das lojas  $j$  que a loja  $i$  atende. A premissa de que se o estoque de segurança estiver em uma loja  $j$ , então o estoque de ciclo também deva estar na mesma loja é assegurada pela restrição 4.18. As restrições 4.19 e 4.20 estabelecem os domínios das variáveis  $x_{ij}$ ,  $y_{ij}$  e  $d_i$  e  $u_i$  respectivamente.

#### 4.2.4 Discussões sobre o modelo

Este modelo, a exemplo das abordagens de Miranda e Garrido [34] e Das e Tyagi [15], contém elementos não-lineares na função objetivo e variáveis inteiras, o que o classifica como um modelo de programação não-linear inteira mista. De acordo com o explanado na seção 3.2.3, modelos dessa natureza são difíceis de serem tratados, e nem sempre garantem a *otimalidade* global do resultado obtido. De acordo com Pardalos [41], esse tipo de modelo é *NP*-difícil; portanto sua complexidade computacional de resolução aumenta muito em função do tamanho do problema. Por esse motivo, o escopo a ser tratado na abordagem do problema nesta dissertação não deve ser grande. Registra-se a terceira razão para que o problema tratado tenha um escopo reduzido (ver seção 4.1.5.1).

Miranda e Garrido [34] resolvem o problema através de um algoritmo *branch and bound*; porém, devido à complexidade natural da formulação, também desenvolvem uma heurística de Relaxação Lagrangeana para resolverem a aplicação numérica em tempo computacional menor. Os autores apontam que este procedimento é necessário para instâncias de maior porte. A aplicação numérica resolvida no trabalho de Miranda e Garrido contem-

plava 10 armazéns e 20 clientes. Para esta dissertação, a instância definida no escopo do problema trata 4 lojas que podem servir de armazém para as mesmas 4 lojas (o problema aqui definido envolve sempre uma matriz quadrada de tamanho  $N \times N$ , onde  $N$  é o número de lojas considerado), portanto menor que a instância do modelo referencial. O que determina fundamentalmente o tamanho da instância neste trabalho é a restrição geográfica de possibilidade de centralização de estoques, elucidada na seção 4.1.5.1.

Ainda que o modelo apresente uma considerável dificuldade computacional, ele foi baseado em um referencial teórico que se mostrou o mais próximo à realidade do problema proposto dentre os modelos levantados na pesquisa bibliográfica realizada. A consideração dos aspectos de política de estoque (que determinam a não-linearidade do modelo) na dinâmica da configuração da rede é crucial na abordagem do problema proposto.

Os custos referentes à política de estoque apresentam uma forma côncava, o que dificulta a garantia de *otimalidade* global da solução (ver seção 3.2.3). Wagner [47], entretanto, aponta que tais problemas estão ganhando cada vez mais importância gerencial, pois representam situações de economia de escala (os custos variam não proporcionalmente ao nível de atividade correspondente). Segundo o mesmo autor, relações de não proporcionalidade, sejam definidas de forma empírica ou deduzidas estruturalmente por regras administrativas, são os motivos mais comuns para se englobar em um modelo de programação matemática aspectos não-lineares. Em outros modelos clássicos de *network design* (ver seção 3.3.1) não é possível mensurar os ganhos de escala em uma perspectiva de alterações de políticas de estoque (centralização de estoques).

#### 4.2.4.1 Aspectos modelo proposto x modelo referencial

O modelo proposto apresenta algumas diferenças importantes em relação ao modelo referencial.

Primeiramente, o modelo referencial define a estrutura física de uma rede, decidindo sobre abertura de instalações, o que não é o caso do problema proposto. As lojas são por definição fixas.

Foi utilizado o mesmo raciocínio do modelo referencial em relação à possibilidade da agregação de demandas e variabilidades a uma instalação, o que define o grau de centralização

de estoques. A diferença é que Miranda e Garrido [34] consideram uma rede com 2 elos (planta-armazém e armazém-loja). No contexto do problema abordado só existe um elo (planta-lojas). A analogia é válida na medida em que as lojas podem servir de armazéns para outras, criando-se assim um outro elo (loja-lojas). É como se cada loja tivesse um armazém associado que pode ser utilizado para guardar o estoque para o próprio consumo ou para outra loja. No caso de uma loja servir de armazém para outra, incorre-se em custos de guarda de estoque, situação também não contemplada no modelo referencial.

Outra diferença consiste no fato de o modelo referencial considerar capacidade de armazenagem nas instalações. Neste trabalho é considerado que tal abordagem em um modelo que não é multi-produto (caso deste modelo e do referencial) não é relevante.

Vale a pena registrar um último aspecto que diferencia o modelo proposto do referencial. Na abordagem de Miranda e Garrido [34] existe apenas uma variável de decisão com respeito à definição dos fluxos de atendimento, e conseqüentemente da localização dos estoques: a variável  $Y_{ij}$ . Isto significa que os estoques de segurança e de ciclo estão acoplados em uma única decisão de localização. No modelo aqui proposto, existem duas variáveis de decisão,  $x_{ij}$  e  $y_{ij}$ , que determinam respectivamente onde os estoques de ciclo e de segurança estão localizados e os fluxos de atendimento. Esta separação das decisões de localização dos estoques de ciclo e de segurança pode resultar em ganhos consideráveis. Esta comparação é feita na análise de resultados, pois o caso do acoplamento das variáveis é um caso particular do modelo proposto em 4.2.3 quando se adiciona uma restrição do tipo  $x_{ij} = y_{ij}$ . Neste caso, os estoques de ciclo e de segurança estariam localizados na mesma instalação, como no modelo referencial.

# Capítulo 5

## Análises e Resultados

Neste capítulo é seguido o raciocínio proposto por Wagner [47] e Luna [29] no início do capítulo 4 para abordagens quantitativas, sendo apresentados os resultados dos testes e experimentos do modelo proposto. São feitas considerações sobre a implementação e aspectos do *software* escolhido para a modelagem. Em seguida são descritos os testes de cenários realizados através da variação controlada de alguns parâmetros para avaliação do comportamento do modelo. São apresentados os resultados referentes à aplicação do modelo ao escopo delimitado na seção 4.1.5. Por fim, são apresentados e comentados, ao final do capítulo, os resultados de performance computacional para variações do modelo proposto.

### 5.1 Implementação

Conforme salientado na seção 4.2.4, uma característica do modelo proposto que o torna particularmente complexo é o fato de ser um modelo não-linear inteiro misto. Esta particularidade exige um esforço computacional maior para resolução do modelo do que quando comparado a modelos lineares convencionais. Citando Wagner [47, p.432]: "[...] você paga um preço para introduzir não-linearidades num modelo de programação [...] uma inconveniência é achar uma rotina de computador capaz de resolver o modelo não-linear".

Outra fonte de preocupação em relação à resolução do modelo consiste nas condições de

*otimalidade* da solução. Conforme cita Bazaraa [7], as condições de *otimalidade* global (mínimo global) de um problema de programação matemática estão condicionadas às premissas adequadas de convexidade do problema. A função objetivo 4.13 do modelo proposto apresenta componentes de custos côncavos (raiz quadrada), tornando em teoria a obtenção da solução ótima global mais complicada.

Foram avaliados dois pacotes computacionais para implementação do modelo proposto: LINGO<sup>®</sup> e *What's Best!*<sup>®</sup>. Ambos são pacotes de otimização patenteados pela LINDO Systems, Inc<sup>®</sup> e possuem rotinas para abordagem de problemas não-lineares, sendo relativamente conhecidos no meio acadêmico e empresarial.

### 5.1.1 *Software* escolhido

O pacote escolhido para implementação do modelo foi o *What's Best!*<sup>®</sup>. Trata-se de uma biblioteca suplementar de algoritmos de programação matemática que pode ser acoplada a uma planilha de dados. A escolha do *What's Best!*<sup>®</sup> foi baseada em dois aspectos principais:

- Facilidade na implementação do modelo através de planilha de dados;
- Condições de *otimalidade* alcançadas pelo *What's Best!*<sup>®</sup> nas condições disponíveis para os experimentos computacionais.

Primeiramente, a construção do modelo de otimização através de planilha eletrônica se mostrou mais fácil e rápida. Segundo pesquisa realizada por Ballou e Masters [5], o principal critério de escolha para utilização de *softwares* para análise de problemas de *network design* é a facilidade de utilização, ficando à frente de quesitos importantes como preço do *software* e velocidade computacional. A grande vantagem do *What's Best!*<sup>®</sup> nesse ponto consiste em não ser necessário o conhecimento específico de uma linguagem de programação.

O modelo foi implementado em ambos os pacotes para avaliação das respostas. Em relação às condições de *otimalidade*, foi observado que as rotinas convencionais de ambos os pacotes encontram apenas a solução de ótimo local (ver seção 3.2.3) para o modelo

proposto, o que está de acordo com as afirmativas de Pardalos [41] e Minoux [33] de que em geral não se pode garantir a solução mínima global em problemas não convexos. Rotinas mais robustas que poderiam garantir melhores soluções para modelos não-lineares exigem licenças específicas, que não são disponibilizadas gratuitamente pelos fabricantes. Em caráter experimental, foi concedido por um período de tempo definido uma licença do *What's Best!*<sup>®</sup> que possui rotinas que, segundo o fabricante, garantem a *otimalidade* global da solução de problemas não-lineares, inclusive não convexos.

As rotinas de otimização utilizadas para modelos não-lineares não convexos, as quais garantem supostamente o ótimo global dentro de uma tolerância especificada, têm as seguintes características de operação, segundo informações do fabricante do *software* [25]:

- Os algoritmos de procura local convencionais são desenvolvidos para acharem um ótimo local, quando então sua busca é interrompida. Se o modelo é não convexo outros ótimos locais podem existir, os quais podem representar soluções melhores que as encontradas inicialmente;
- A rotina de otimização global não pára após encontrar o primeiro ótimo local, continuando a procura até o ótimo global ser confirmado;
- A rotina converte o problema não-linear não convexo original em vários subproblemas convexos e lineares. Então é aplicada a técnica *branch and bound* para exaustivamente procurar nos subproblemas pela solução ótima global.

Testes realizados em instâncias específicas (para se ter a mesma base comparativa) nos dois pacotes confirmaram soluções melhores encontradas na utilização do *What's Best!*<sup>®</sup> com a rotina de otimização global, disponível na licença específica fornecida pelo fabricante. Na utilização da rotina de otimização global (para todos os testes realizados neste trabalho) foi considerado um nível de tolerância de *otimalidade* de  $10^{-6}$  (valor padrão do pacote).

Nas próximas seções são apresentados os resultados das simulações de cenários do modelo proposto e da aplicação do mesmo ao escopo do problema definido no capítulo 4. Para todos os resultados apresentados foram utilizados dados reais da empresa em estudo. Eles foram obtidos diretamente no sistema *ERP* ou através de sistemas de informação legados.

Os resultados foram obtidos através da utilização do pacote *What's Best!*<sup>®</sup> versão 8.0<sup>1</sup> em um microcomputador com processador PENTIUM IV, 2,4 Ghz e 256 Megabytes de memória RAM.

## 5.2 Análise de cenários

Após a construção do modelo e sua implementação computacional, são apresentados nas seções seguintes os resultados de uma série de simulações de cenários realizadas para o modelo proposto. A intenção é descrever o comportamento do modelo sob diversas condições operacionais, visando responder a questões do tipo *what-if* e analisar os resultados obtidos (LUNA [29]).

São conduzidos dois tipos de avaliação de cenários visando compreender melhor o comportamento do modelo:

1. Influência de cada componente de custo da função objetivo no comportamento das soluções do modelo;
2. Influência da variação de alguns parâmetros nos custos totais e no tempo computacional do modelo. Para esta avaliação de cenários é desenvolvido ainda um comparativo de ganhos entre o modelo proposto, o modelo de Miranda e Garrido (adaptado) e o modelo clássico de desenho de rede sem levar em conta aspectos da política de estoque.

Para as avaliações de cenário descritas acima são considerados os dados referentes ao produto 17 do escopo do problema. A variação de parâmetros deve ser suficientemente abrangente a ponto de representar todos os possíveis valores de parâmetros dos outros produtos do escopo, de forma que qualquer produto poderia a princípio ser tomado como base para as simulações.

Os dados base utilizados nas simulações de cenários nas seções seguintes estão ilustrados no apêndice C. Vale lembrar que os dados de tempo de ressuprimento e custo de transporte

---

<sup>1</sup>Um exemplo de relatório gerado pelo *What's Best!*<sup>®</sup> pode ser visto no anexo A

da fábrica às lojas dizem respeito à fábrica  $h$  específica que produz o produto 17. Foi considerado também um nível de serviço padrão de 90% que implica em um valor de  $K$  de 1,282 (obtido da tabela normal padronizada).

### 5.2.1 Comportamento do modelo em função dos componentes da função objetivo

A função objetivo do modelo proposto é definida na seção 4.2.2 e apresenta os seguintes componentes de custo:

- (1)  $\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N (CT_i^h + CT_{ij}) \cdot D_j \cdot x_{ij}$  – Custo de transporte total
- (2)  $\sum_{i=1}^N \sqrt{2 \cdot CE_i \cdot CR_i \cdot d_i}$  – Custo do estoque de ciclo total
- (3)  $\sum_{i=1}^N CE_i \cdot K \cdot \sqrt{LT_i^h} \cdot \sqrt{u_i}$  – Custo do estoque de segurança total
- (4)  $\sum_{i=1}^N \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^N F_i \cdot (D_j \cdot x_{ij})$  – Custo de guarda do estoque de ciclo total
- (5)  $\sum_{i=1}^N \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^N G_i \cdot K \cdot \sqrt{LT_i^h} \cdot \sqrt{U_j \cdot y_{ij}}$  – Custo de guarda do estoque de segurança

Uma questão que se apresenta é: como os resultados são sensíveis a cada componente de custo acima?

Das e Tyagi [15] desenvolveram em seu trabalho uma análise segmentada do impacto dos diferentes fatores de custo da função objetivo no grau de centralização de estoque. Nesta seção é desenvolvida análise semelhante. Para isto, são considerados cenários onde se variam os componentes de custo (1), (2), (3), (4) e (5) ilustrados acima na formulação da função objetivo. A mensuração dos custos nas simulações é semanal.

Visando uma ilustração mais sintetizada dos resultados do modelo para cada simulação, convencionou-se a seguinte notação para identificar o grau de centralização de estoque (e

esquema de atendimento entre as lojas):

O par ordenado (i,j) identifica que o estoque da loja j está localizado na loja i

Exemplo: uma solução do tipo (1,1);(2,2);(2,3);(4,4) para as variáveis  $x_{ij}$  representa a decisão do modelo em descentralizar o estoque de ciclo na loja 1 e loja 4 (os estoques estão nas próprias lojas) e centralizar os estoques de ciclo das lojas 2 e loja 3 na loja 2, ou seja, a loja 2 atende a demanda da loja 3.

### Cenário 1 - Custos de estoque de ciclo e guarda pelo estoque de ciclo

São considerados neste cenário apenas os componentes de custos (2) e (4) na função objetivo do modelo. Ou seja, pretende-se analisar como se comporta a solução do modelo apenas tendo em vista os custos de colocação de ordem, manutenção do estoque de ciclo (considerando uma política de lote econômico) e guarda do estoque de ciclo em eventuais centralizações de estoque. A tabela abaixo resume os resultados obtidos, com a variação controlada do parâmetro  $F_i$ , ou seja, cada coluna da tabela representa a solução do modelo para o parâmetro  $F_i$  multiplicado por 0,5; 1 (solução padrão); 1,5 e 3.

$F_i$ x Fator	0.5	1	1.5	3
Custo (2) (R\$/sem)	557	557	978	1135
Custo (4) (R\$/sem)	231	461	142	-
Custo total (R\$/sem)	788	1018	1120	1135
Localização Estoque Ciclo ( $x_{ij}$ )	(1,1) ; (1,2) (1,3) ; (1,4)	(1,1) ; (1,2) (1,3) ; (1,4)	(1,1) ; (2,2) (3,3) ; (1,4)	(1,1) ; (2,2) (3,3) ; (4,4)

Tabela 5.1: Respostas para simulações do cenário 1

O custo total do sistema cresce com o aumento de  $F_i$ . A tendência de solução padrão nesse cenário é centralizar os estoques de ciclo, visando obtenção de ganhos de escala. Nota-se que à medida que o valor do parâmetro  $F_i$  aumenta, o sistema tende a penalizar mais a centralização de estoques, havendo uma centralização de estoque apenas parcial (loja 1 centraliza os estoques das lojas 1 e loja 4) para  $F_i$  x 1.5 e descentralizando totalmente os estoques para  $F_i$  x 3.

### Cenário 2 - Custos de estoque de segurança e guarda pelo estoque de segurança

São considerados neste cenário apenas os componentes de custos (3) e (5). O objetivo é analisar como se comportam as soluções, apenas considerando os custos de estoque de segurança e as penalidades por eventuais centralizações desse estoque. A tabela a seguir resume os resultados obtidos, com a variação controlada do parâmetro  $G_i$  como função do parâmetro  $F_i$  (lembrando que a relação padrão entre esses parâmetros é 0.5).

Relação $G_i / F_i$	0.1	0.25	0.5	1
Custo (3) (R\$/sem)	60	60	138	138
Custo (5) (R\$/sem)	16	40	-	-
Custo total (R\$/sem)	76	100	138	138
Localização Estoque Seg ( $y_{ij}$ )	(1,1) ; (1,2) (1,3) ; (1,4)	(1,1) ; (1,2) (1,3) ; (1,4)	(1,1) ; (2,2) (3,3) ; (4,4)	(1,1) ; (2,2) (3,3) ; (4,4)

Tabela 5.2: Respostas para simulações do cenário 2

Esta solução depende fundamentalmente do valor do parâmetro  $G_i$ , que penaliza a centralização de estoques de segurança. O sistema, tendo em vista valores baixos de  $G_i$ , tende a centralizar os estoques de segurança, em função de ganhos de escala proporcionados pelo fenômeno do *Risk Pooling*. Para valores mais altos de  $G_i$ , o modelo passa a analisar as compensações entre o custo de centralizar o estoque de segurança e o ganho de escala obtido pelo fenômeno citado. Observa-se que a partir do valor padrão de  $G_i$  o sistema apresenta o mesmo custo total para qualquer valor mais alto do parâmetro, pois o sistema não decide pela centralização nesses casos, não incorrendo na parcela (5) de custos.

### Cenário 3 - Custos de estoques e guarda pelos estoques

São considerados neste cenário os componentes de custos (2), (3), (4) e (5), ou seja, os custos de estoques de ciclo e de segurança, juntamente com eventuais custos pela guarda de ambos os estoques. A tabela a seguir resume os resultados obtidos, com a variação controlada do valor do produto, que tem reflexo direto no parâmetro  $CE_i$ . Os fatores de variação considerados são 0.5, 0.75, 1(padão) e 3.

<b>Valor produto (R\$/t) x Fator</b>	<b>0.5</b>	<b>0.75</b>	<b>1</b>	<b>3</b>
Custo (2) (R\$/sem)	643	766	557	1539
Custo (3) (R\$/sem)	87	48	60	154
Custo (4) (R\$/sem)	0	95	461	461
Custo (5) (R\$/sem)	0	79	79	79
Custo total (R\$/sem)	730	988	1157	2233
Localização Estoque Ciclo ( $x_{ij}$ )	(1,1) ; (2,2) (3,3) ; (4,4)	(1,1) ; (2,2) (3,3) ; (1,4)	(1,1) ; (1,2) (1,3) ; (1,4)	(1,1) ; (1,2) (1,3) ; (1,4)
Localização Estoque Seg ( $y_{ij}$ )	(1,1) ; (2,2) (3,3) ; (4,4)	(1,1) ; (1,2) (1,3) ; (1,4)	(1,1) ; (1,2) (1,3) ; (1,4)	(1,1) ; (1,2) (1,3) ; (1,4)

Tabela 5.3: Respostas para simulações do cenário 3

Na avaliação deste cenário, fica claro que na ausência de custos de transporte, a tendência do modelo é centralizar os estoques para produtos de alto valor agregado. A solução vai desde uma configuração totalmente descentralizada de estoques (fator 0.5) para uma configuração de centralização completa (fatores 1 e 3). Esta tendência de solução está de acordo com os resultados encontrados por Miranda e Garrido [34]. Os custos totais do sistema crescem juntamente com a variação crescente do valor do produto. As mudanças de patamares de custos dos componentes (4) e (5) indicam mudanças no grau de centralização de estoques entre as lojas, quanto mais estoque centralizado em uma loja, maiores os custos de guarda do mesmo.

Vale notar uma particularidade interessante. Este cenário representa a integração dos cenários 1 e 2. A solução padrão para o cenário 1 foi centralizar os estoques de ciclo e a do cenário 2 foi descentralizar os estoques de segurança. Para o cenário 3, o padrão de solução (fator igual a 1) foi centralizar ambos os estoques. A explicação para esta ocorrência reside na existência da restrição 4.18 definida na seção 4.2.3. Ela traduz a premissa de que se o estoque de segurança está localizado na própria loja, então o estoque de ciclo também deve estar. As configurações de solução padrão dos cenários 1 e 2 são, portanto, conflitantes quando consideradas de forma integrada no mesmo cenário; logo, o modelo deu maior ênfase à solução de centralização nesse caso, pois é a que apresenta menor custo total.

### Cenário 4 - Custos de transporte

É considerado neste cenário apenas o componente de custo (1), variando-se os valores de custos unitários de transporte ( $CT_i^h$  e  $CT_{ij}$ ) do modelo . A tabela a seguir resume os resultados obtidos, com a variação controlada dos custos unitários, considerando fatores de multiplicação desses custos iguais a 0.5, 0.75, 1(padrão) e 1.5.

Custos transp. (R\$/t) x Fator	0.5	0.75	1	1.5
Custo (1) (R\$/sem)	6678	10017	13356	20034
Localização Estoque Ciclo ( $x_{ij}$ )	(1,1) ; (2,2) (3,3) ; (4,4)			

Tabela 5.4: Respostas para simulações do cenário 4

Quando são considerados no modelo apenas custos de transportes, a decisão é sempre descentralizar os estoques para qualquer nível de tarifas de transporte, ou seja, não é forçado nenhum atendimento da demanda de uma loja por outra loja. Isto ocorre porque dada a estrutura de custos de transporte da rede (ver apêndice C), não existe vantagem em se atender uma loja a partir de outra (apenas sob a ótica de custos de transporte). Uma situação inversa poderia ser observada caso houvesse alguma tarifa muito baixa de suprimento da fábrica para uma determinada loja (utilizando-se ferrovia, por exemplo). Neste caso, poderia haver uma centralização de estoques provocada por custos de transporte.

### Cenário 5 - Custos de transporte e custos de estoque de ciclo

Neste cenário são considerados os componentes de custo (1) e (2) na função objetivo do modelo . A tabela a seguir resume os resultados obtidos, com a variação controlada dos custos unitários de transporte, considerando fatores de multiplicação desses custos iguais a 0.25, 0.50, 0.75 e 1(padrão).

Custo de transp. (R\$/t) x Fator	0.25	0.5	0.75	1
Custo (1) (R\$/sem)	3598	6921	10168	13356
Custo (2) (R\$/sem)	509	727	914	1135
Custo total (R\$/sem)	4108	7648	11082	14491
Localização Estoque Ciclo ( $x_{ij}$ )	(1,1) ; (1,2) (1,3) ; (1,4)	(1,1) ; (1,2) (3,3) ; (1,4)	(1,1) ; (1,2) (3,3) ; (4,4)	(1,1) ; (2,2) (3,3) ; (4,4)

Tabela 5.5: Respostas para simulações do cenário 5

Neste cenário é verificada uma importante compensação entre os custos de transporte e os custos de estoque de ciclo. Como visto no cenário anterior, a presença única dos custos de transporte no modelo tende a apontar uma configuração descentralizada de estoques de ciclo nas lojas. Entretanto foi verificado no cenário 1 que, mesmo levando-se em conta penalidades por centralização de estoques, a presença do custo de estoque de ciclo força o sistema a uma configuração mais centralizada de estoque, visando obtenção de ganhos de escala ocasionados pelo componente de custo (2).

Para custos unitários de transporte menores, os custos do componente (1) pesam menos no custo total do sistema e o modelo tende a sugerir centralizações de estoque. Esse caso pode ser observado para o fator igual a 0.25, onde o modelo sugeriu uma centralização total de estoques na loja 1. À medida que esse fator aumenta, os custos de transporte passam a pesar mais no custo total, sugerindo uma descentralização parcial dos estoques da rede, como no caso do fator igual a 0.5, onde o modelo sugeriu uma centralização de estoques na loja 1 do estoque da própria loja, da loja 2 e da loja 4. Para a solução padrão, o sistema sugeriu a descentralização dos estoques de ciclo.

### Cenário 6 - Todos os custos

Neste cenário são considerados todos os componentes de custo na função objetivo. A idéia é observar como se comportam as soluções do modelo, levando em conta a variação de dois fatores importantes: o nível de demanda do produto considerado nas lojas e o valor agregado do produto. As tabelas a seguir resumem os resultados obtidos, com as variações controladas dos parâmetros supracitados.

<b>Demanda <math>D_j</math> x Fator</b>	<b>0.05</b>	<b>0.1</b>	<b>0.2</b>	<b>0.5</b>	<b>1</b>
Custo (1) (R\$/sem)	720	1384	2711	6678	13356
Custo (2) (R\$/sem)	125	245	422	803	1135
Custo (3) (R\$/sem)	3	6	12	69	138
Custo (4) (R\$/sem)	23	28	36	0	0
Custo (5) (R\$/sem)	4	8	16	0	0
Custo total (R\$/sem)	874	1671	3198	7550	14629
Localização Estoque Ciclo ( $x_{ij}$ )	(1,1);(1,2) (1,3);(1,4)	(1,1);(1,2) (3,3);(1,4)	(1,1);(1,2) (3,3);(4,4)	(1,1);(2,2) (3,3);(4,4)	(1,1);(2,2) (3,3);(4,4)
Localização Estoque Seg ( $y_{ij}$ )	(1,1);(1,2) (1,3);(1,4)	(1,1);(1,2) (1,3);(1,4)	(1,1);(1,2) (1,3);(1,4)	(1,1);(2,2) (3,3);(4,4)	(1,1);(2,2) (3,3);(4,4)

Tabela 5.6: Respostas para simulações do cenário 6 - variando nível de demanda

<b>Valor produto (R\$/t) x Fator</b>	<b>1</b>	<b>1.5</b>	<b>3</b>	<b>5</b>
Custo (1) (R\$/sem)	13356	13356	13843	14392
Custo (2) (R\$/sem)	1135	1622	2121	2518
Custo (3) (R\$/sem)	138	83	154	248
Custo (4) (R\$/sem)	0	0	277	461
Custo (5) (R\$/sem)	0	79	79	79
Custo total (R\$/sem)	14629	15141	16474	17698
Localização Estoque Ciclo ( $x_{ij}$ )	(1,1);(2,2) (3,3);(4,4)	(1,1);(2,2) (3,3);(4,4)	(1,1);(1,2) (3,3);(1,4)	(1,1);(1,2) (1,3);(1,4)
Localização Estoque Seg ( $y_{ij}$ )	(1,1);(2,2) (3,3);(4,4)	(1,1);(1,2) (1,3);(1,4)	(1,1);(1,2) (1,3);(1,4)	(1,1);(1,2) (1,3);(1,4)

Tabela 5.7: Respostas para simulações do cenário 6 - variando valor do produto

Na tabela 5.6, variou-se o parâmetro  $D_j$  de cada loja mantendo-se o mesmo coeficiente de variação de vendas, ou seja, houve um ajuste no valor de  $U_j$  para manter o mesmo quociente desvio padrão / demanda média.

Conforme o nível de demanda diminui, o sistema tende a centralizar os estoques na rede. Uma explicação para isto reside no fato do componente (1) ter menor peso no custo total quando o nível de demanda diminui. Por outro lado, quanto maior o nível de demanda

do produto, mais propenso à descentralização de estoques ele está.

Vale observar que a decisão de localização dos estoques de segurança (variáveis  $y_{ij}$ ) não é afetada diretamente pela demanda (ver componentes (3) e (5)). Porém, conforme visto no cenário 3, a restrição 4.18 obriga a centralização dos estoques de segurança de acordo com a decisão de centralização dos estoques de ciclo.

Em relação à tabela 5.7, fica clara a influência do valor agregado do produto na decisão da configuração de atendimento e alocação de estoques na rede. Para a situação padrão o sistema escolhe a descentralização dos estoques, como já visto. À medida que o valor do produto é aumentado, os custos de estoque de ciclo e estoque de segurança também aumentam, fazendo com que os ganhos de escala propiciados pela centralização de estoques passem a ser mais representativos. Observa-se que os custos de transporte tendem a ser maiores na medida em que o modelo opta por uma solução com configuração mais centralizada de estoques, fato que é mais que compensado pelos ganhos de escala nas centralizações de estoque de ciclo e segurança.

### **5.2.2 Comportamento do modelo com a variação combinada de parâmetros**

Foi visto na seção anterior como cada componente de custo da função objetivo influencia o comportamento das configurações de soluções propostas pelo modelo. Para cada cenário apresentado foram feitas simulações com componentes de custos específicos e variações apropriadas de um parâmetro por vez.

Nesta seção é apresentada uma análise dos valores da função objetivo (envolvendo todos os custos) obtidos na solução de cada simulação. Para estas simulações são feitas variações combinadas de parâmetros, conforme análise realizada por Miranda e Garrido [34] para avaliação de cenários e teste da influência dos parâmetros. Seguindo a linha de raciocínio dos mesmos autores, também é desenvolvida uma análise comparativa entre os resultados do modelo proposto, os resultados de custos quando utilizada a política vigente da empresa (descentralização de estoques) e os resultados provenientes de uma modelagem contemplando um acoplamento entre as decisões de estoque de ciclo e estoque de segurança, como na modelagem proposta por Miranda e Garrido [34]. O objetivo é estabelecer

em quais circunstâncias os resultados propostos pela modelagem desta dissertação podem ser potencialmente melhores do que as outras políticas.

Miranda e Garrido [34] consideraram em seu trabalho a variação combinada dos seguintes parâmetros: custos de estocagem e coeficiente de variação de vendas para 4 níveis de serviço distintos, 50%, 75%, 90% e 97.5%. O objetivo dos autores era verificar o comportamento do sistema para produtos com diferentes perfis (variabilidade e valor agregado diferentes).

Neste trabalho são considerados dois tipos de níveis de serviço: 90%, considerado um nível de serviço padrão e 99.9%, considerado um nível de serviço superior, onde praticamente não é admitida ruptura de estoque nas lojas. Em relação aos parâmetros das simulações, são considerados o coeficiente de variação de vendas (visando identificar o comportamento do modelo frente à variabilidade da demanda), o valor do produto (visando identificar o comportamento do modelo para diferentes custos de se manter estoques) e o custo unitário de guarda do estoque de segurança, uma vez que este parâmetro teve seu valor padrão arbitrado e influencia nas decisões de centralização de estoque de segurança (ver seção anterior).

Para a realização das simulações, são estabelecidos os seguintes pontos:

- %  $G_i/F_i$  - proporção entre as variáveis  $G_i$  e  $F_i$ . O valor padrão é 0.5;
- xVP - fator de multiplicação do valor do produto. O valor padrão é 1. Para cada valor de xVP, o valor do parâmetro  $CE_i$  é alterado;
- xCV - fator de multiplicação para o coeficiente de variação de vendas CV. O valor padrão é 1. Para cada valor de xCV, o valor do parâmetro  $U_j$  é alterado;
- $S_1$  - custo (R\$/semana) da solução quando aplicado os valores dos parâmetros considerados para a política vigente da empresa, ou seja, descentralização total dos estoques;
- $S_2$  - custo (R\$/semana) da solução sugerida pelo modelo proposto quando existe o acoplamento das variáveis de estoques, semelhante à modelagem de Miranda e Garrido. Para este cenário, inclui-se no modelo proposto uma restrição do tipo:  $x_{ij} = y_{ij}$ , para qualquer valor de  $(i, j)$ ;

- S3 - custo (R\$/semana) da solução sugerida pelo modelo proposto.

As tabelas a seguir ilustram os resultados das simulações realizadas para as diferentes combinações de variação de parâmetros. Foram considerados 3 proporções diferentes entre os parâmetros  $G_i/F_i$ , 3 fatores de multiplicação para o valor do produto e 2 fatores de multiplicação para o coeficiente de variação de vendas, totalizando 18 variações diferentes de parâmetros para cada nível de serviço. Vale lembrar que as simulações realizadas são referentes ao problema do produto 17 (dados disponíveis no apêndice C).

% $G_i / F_i$	xVP	xCV	S1	S2	S3	Ganho (S3/S2)	Ganho (S3/S1)
0.1	1	1	14629	14629	14567	0.4%	0.4%
0.1	3	1	16771	16475	16411	0.4%	2.1%
0.1	5	1	18907	17635	17635	0.0%	6.7%
0.25	1	1	14629	14629	14591	0.3%	0.3%
0.25	3	1	16771	16494	16435	0.4%	2.0%
0.25	5	1	18907	17659	17659	0.0%	6.6%
0.5	1	1	14629	14629	14629	0.0%	0.0%
0.5	3	1	16771	16525	16474	0.3%	1.8%
0.5	5	1	18907	17698	17698	0.0%	6.4%
0.1	1	5	15180	15180	14870	2.0%	2.0%
0.1	3	5	18127	17240	17089	0.9%	5.7%
0.1	5	5	21067	18688	18688	0.0%	11.3%
0.25	1	5	15180	15180	14989	1.3%	1.3%
0.25	3	5	18127	17359	17208	0.9%	5.1%
0.25	5	5	21067	18807	18807	0.0%	10.7%
0.5	1	5	15180	15180	15180	0.0%	0.0%
0.5	3	5	18127	17557	17406	0.9%	4.0%
0.5	5	5	21067	19005	19005	0.0%	9.8%

Tabela 5.8: Custos para as simulações de cenário com nível de serviço 90%

% Gi / Fi	xVP	xCV	S1	S2	S3	Ganho (S3/S2)	Ganho (S3/S1)
0.1	1	1	14823	14823	14674	1.0%	1.0%
0.1	3	1	17249	16801	16650	0.9%	3.5%
0.1	5	1	19669	18007	18007	0.0%	8.5%
0.25	1	1	14823	14823	14731	0.6%	0.6%
0.25	3	1	17249	16850	16707	0.8%	3.1%
0.25	5	1	19669	18064	18064	0.0%	8.2%
0.5	1	1	14823	14823	14823	0.0%	0.0%
0.5	3	1	17249	16926	16803	0.7%	2.6%
0.5	5	1	19669	18159	18159	0.0%	7.7%
0.1	1	5	16152	16106	15405	4.3%	4.6%
0.1	3	5	20518	18437	18286	0.8%	10.9%
0.1	5	5	24878	20547	20547	0.0%	17.4%
0.25	1	5	16152	16152	15692	2.8%	2.8%
0.25	3	5	20518	18723	18572	0.8%	9.5%
0.25	5	5	24878	20833	20833	0.0%	16.3%
0.5	1	5	16152	16152	16152	0.0%	0.0%
0.5	3	5	20518	19200	19050	0.8%	7.2%
0.5	5	5	24878	21311	21311	0.0%	14.3%

Tabela 5.9: Custos para as simulações de cenário com nível de serviço 99.9%

Observa-se que em ambas as tabelas, os valores apurados em S3 são sempre menores ou iguais aos valores apurados em S1, o que comprova que o modelo proposto sugere melhores soluções em determinadas situações do que a política vigente de descentralização total dos estoques. Especificamente quando o ambiente é sujeito a alta variabilidade de demanda, alto valor agregado de produtos e baixo custo de centralização de estoque de segurança, a aplicação do modelo proposto na configuração da rede pode trazer ganhos consideráveis em relação à política de descentralizar os estoques. Altos níveis de serviço potencializam ainda mais os ganhos, conforme mostra o comparativo entre as tabelas 5.8 e 5.9.

No cenário ilustrado na tabela 5.9 onde os parâmetros %Gi/Fi, xVP e xCV valem respectivamente 0.1, 5 e 5, nota-se uma diferença entre o custo da descentralização total dos estoques (S1) e o custo da configuração proposta pelo modelo em S3 de R\$ 4331. Em um ano, apenas para um material, a empresa poderia estar perdendo R\$ 229561 se

deixasse de adotar a solução sugerida pelo modelo proposto, neste exemplo. Este valor pode ser encarado como sendo a penalidade em se adotar uma política de descentralização de estoques em um cenário onde as condições apontam para outra política logística.

As figuras a seguir ilustram graficamente em quais condições os ganhos em se aplicar o modelo proposto frente à política vigente de descentralização de estoques são mais expressivos:

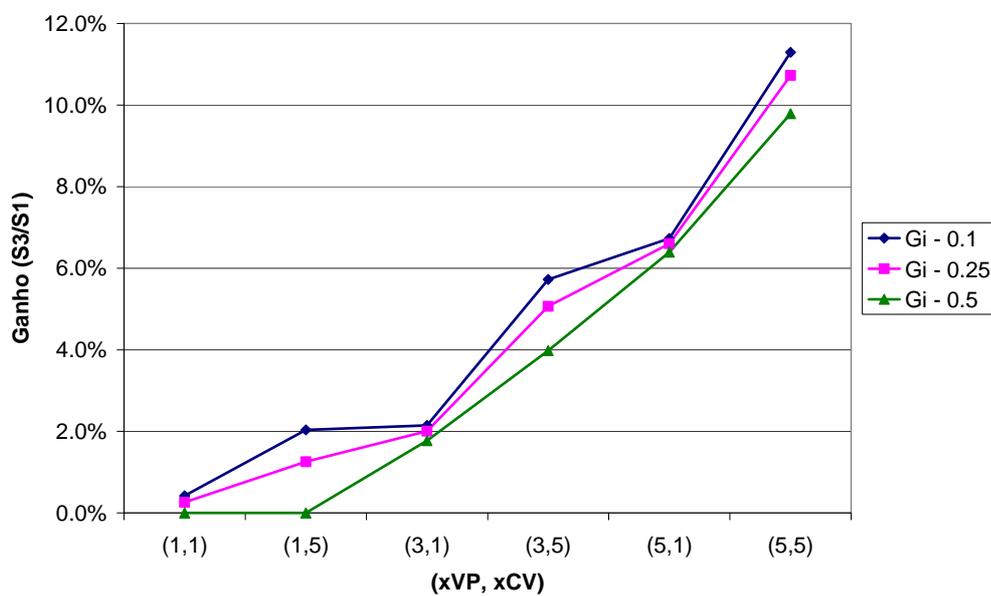


Figura 5.1: Ganhos na aplicação do modelo proposto em relação à política vigente como função das diversas combinações entre os parâmetros - Nível de serviço 90%

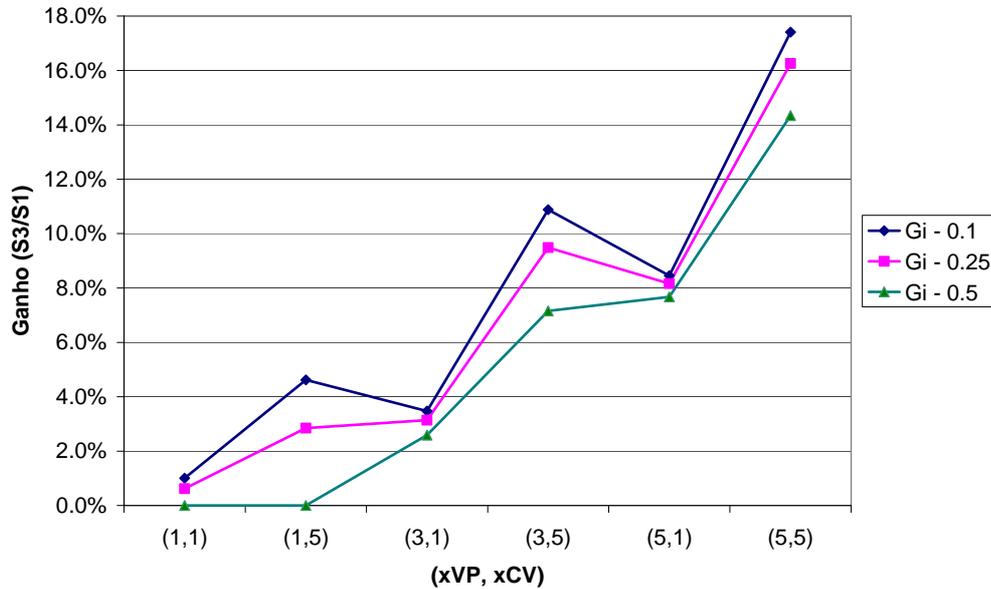


Figura 5.2: Ganhos na aplicação do modelo proposto em relação à política vigente como função das diversas combinações entre os parâmetros - Nível de serviço 99.9%

Primeiramente observa-se que o comportamento das curvas de ganhos são similares nas duas figuras. Entretanto, para o nível de serviço de 99.9% os ganhos são maiores, conforme já comentado.

Para situações específicas, a utilização do modelo proposto não acrescenta ganho em relação à prática vigente (nesses casos o modelo proposto sugere a descentralização total dos estoques). Isto ocorre quando o custo de centralizar os estoques de segurança são maiores ( $\% \text{Gi}/\text{Fi} = 0.5$ ) e os produtos têm baixo valor agregado ( $xVP = 1$ ). Em contrapartida, quando se observa a combinação de parâmetros  $\% \text{Gi}/\text{Fi} = 0.1$  ou  $0.25$ , e  $(xVP, xCV) = (5,5)$ , os ganhos são consideráveis, pois neste caso a centralização de estoques acarreta grandes economias.

Vale comentar também sobre os ganhos do modelo proposto no que tange ao desacoplamento das decisões de localização entre os estoque de ciclo e de segurança. Os valores de S2 mostram os custos das soluções do modelo proposto quando existe o acoplamento dos estoques, ou seja, quando eles estão necessariamente juntos na mesma loja. Observa-se, tal como no comparativo entre S3 e S1, que os valores apurados em S3 são sempre menores ou iguais aos valores apurados em S2. Isto não é nenhuma surpresa, pois na verdade os cenários de S2 são casos especiais de S3, quando  $x_{ij} = y_{ij}$ .

Situações onde o desacoplamento pode ser vantajoso em relação ao acoplamento das variáveis ocorrem quando, principalmente, o custo de centralizar o estoque de segurança for baixo e a variabilidade da demanda for alta. Estes dois aspectos são fortes potencializadores do fenômeno do *Risk Pooling*. Dependendo do valor do produto, a melhor decisão pode ser agregar o estoque de segurança em uma outra loja e deixar o estoque de ciclo na própria loja, portanto descentralizado. Este fato ocorre, por exemplo, para um cenário da tabela 5.9, onde os parâmetros ( $G_i/F_i$ ;  $xVP$ ;  $xCV$ ) assumem os valores (0.1; 1; 5). Neste caso, o modelo proposto com desacoplamento de variáveis sugere uma solução que apresenta ganho de 4,3% em relação à solução do modelo acoplado.

### 5.3 Resultados obtidos

Tendo sido analisados vários cenários diferentes e discutidos os respectivos comportamentos das soluções, torna-se mais fácil compreender os resultados gerados pelo modelo na aplicação do escopo do problema definido no capítulo 4.

Para uma melhor interpretação das tabelas, definem-se os seguintes termos:

- C1 - custo logístico anual esperado (R\$) para a política vigente da empresa (política de descentralização dos estoques);
- C2 - custo logístico anual esperado (R\$) para a política sugerida pelo modelo;
- Ganho - % de ganho esperado no caso da empresa adotar a política sugerida pelo modelo em detrimento à prática vigente;
- t(s) - tempo medido em segundos para a execução do modelo proposto no algoritmo de otimização global do *What's Best!*<sup>®</sup>;
- It - número de iterações que o algoritmo de otimização global do *What's Best!*<sup>®</sup> realizou para atingir a solução;
- % CT - participação do custo de transporte no custo total do solução proposta;
- Classe - classe à qual pertence o produto considerado, segundo classificação ABC realizada na seção 4.1.5.2;
- $\sum D_j$  - soma das demandas médias das lojas do escopo para um produto.

### 5.3.1 Análise de custos e soluções

A tabela a seguir resume os resultados obtidos. São ilustrados os custos e configurações propostas pelo modelo para os 25 problemas (para cada produto é gerado uma solução diferente).

Produto	C1	C2	Ganho	Estoque Ciclo	Estoque Segurança
Produto 1	9311	6611	29.0%	(1,1);(1,2);(1,3);(1,4)	(1,1);(1,2);(1,3);(1,4)
Produto 2	8670	6582	24.1%	(1,1);(1,2);(1,3);(1,4)	(1,1);(1,2);(1,3);(1,4)
Produto 3	8756	5038	42.5%	(1,1);(1,2);(1,3);(1,4)	(1,1);(1,2);(1,3);(1,4)
Produto 4	71849	70586	1.8%	(1,1);(1,2);(1,3);(4,4)	(1,1);(1,2);(1,3);(1,4)
Produto 5	27679	24753	10.6%	(2,1);(2,2);(2,3);(2,4)	(2,1);(2,2);(2,3);(2,4)
Produto 6	28116	21433	23.8%	(1,1);(1,2);(1,3);(1,4)	(1,1);(1,2);(1,3);(1,4)
Produto 7	336508	336508	0.0%	(1,1);(2,2);(3,3);(4,4)	(1,1);(2,2);(3,3);(4,4)
Produto 8	517593	517593	0.0%	(1,1);(2,2);(3,3);(4,4)	(1,1);(2,2);(3,3);(4,4)
Produto 9	144962	144962	0.0%	(1,1);(2,2);(3,3);(4,4)	(1,1);(2,2);(3,3);(4,4)
Produto 10	227985	226603	0.6%	(1,1);(2,2);(3,3);(1,4)	(1,1);(1,2);(1,3);(1,4)
Produto 11	875193	874923	0.0%	(1,1);(2,2);(3,3);(4,4)	(1,1);(1,2);(1,3);(1,4)
Produto 12	204448	204201	0.1%	(1,1);(2,2);(3,3);(4,4)	(1,1);(1,2);(1,3);(1,4)
Produto 13	52672	46592	11.5%	(1,1);(1,2);(1,3);(1,4)	(1,1);(1,2);(1,3);(1,4)
Produto 14	190967	190967	0.0%	(1,1);(2,2);(3,3);(4,4)	(1,1);(2,2);(3,3);(4,4)
Produto 15	25336	19709	22.2%	(1,1);(1,2);(1,3);(1,4)	(1,1);(1,2);(1,3);(1,4)
Produto 16	185111	177728	4.0%	(1,1);(1,2);(1,3);(4,4)	(1,1);(1,2);(1,3);(1,4)
Produto 17	775337	775337	0.0%	(1,1);(2,2);(3,3);(4,4)	(1,1);(2,2);(3,3);(4,4)
Produto 18	38413	34130	11.2%	(1,1);(1,2);(1,3);(1,4)	(1,1);(1,2);(1,3);(1,4)
Produto 19	90092	84693	6.0%	(1,1);(2,2);(2,3);(2,4)	(2,1);(2,2);(2,3);(2,4)
Produto 20	65512	58967	10.0%	(1,1);(1,2);(1,3);(1,4)	(1,1);(1,2);(1,3);(1,4)
Produto 21	15988	11868	25.8%	(1,1);(1,2);(1,3);(1,4)	(1,1);(1,2);(1,3);(1,4)
Produto 22	21107	17790	15.7%	(2,1);(2,2);(2,3);(2,4)	(2,1);(2,2);(2,3);(2,4)
Produto 23	46149	36891	20.1%	(1,1);(1,2);(1,3);(1,4)	(1,1);(1,2);(1,3);(1,4)
Produto 24	19063	15191	20.3%	(1,1);(1,2);(1,3);(1,4)	(1,1);(1,2);(1,3);(1,4)
Produto 25	8010	5479	31.6%	(1,1);(1,2);(1,3);(1,4)	(1,1);(1,2);(1,3);(1,4)

Tabela 5.10: Resultados do modelo para o escopo do problema - Custos e configuração da rede por produto

Como exemplo de interpretação da tabela anterior tem-se que o produto 19 apresenta um custo esperado anual de R\$ 90092 com a política de descentralização total dos estoques; isto é, adotando-se uma configuração do tipo (1,1);(2,2);(3,3);(4,4) para o estoque de ciclo e de segurança. Para este produto, o modelo sugeriu como configuração de menor custo a alocação dos estoques de ciclo na loja 2, com exceção da loja 1, que guarda seu próprio estoque [(1,1);(2,2);(2,3);(2,4)]. Para o estoque de segurança, foi sugerida a centralização total dos estoques na loja 2 [(2,1);(2,2);(2,3);(2,4)]. O custo anual esperado na adoção dessa política é de R\$ 84693. A economia esperada na adoção desta política é de R\$ 5399/ano, ou seja, uma redução de 6% somente para este produto.

A redução total esperada na implementação dos resultados do modelo ao escopo dos 25 produtos selecionados, totaliza R\$ 79693/ano. Para os produtos que o modelo apontou como melhor política a descentralização total dos estoques, não se observa ganho, uma vez que esta já é a política vigente. Os ganhos em percentuais são potencialmente maiores quanto mais favorável o produto for à centralização total dos estoques.

A tabela a seguir ilustra as configurações propostas para cada produto, ordenadas de forma decrescente de acordo com o nível de demanda do produto no escopo do problema. Este foi o critério utilizado na classificação ABC comentada no capítulo 4. Os produtos estão na tabela separados em suas respectivas classes através de linha dupla. Alguns aspectos computacionais das soluções encontradas também são retratados:

Produto	Estoque Ciclo	Estoque Segurança	t(s)	It	$\sum D_j$	% CT
Produto 11	(1,1);(2,2);(3,3);(4,4)	(1,1);(1,2);(1,3);(1,4)	10	2903	3652	92%
Produto 17	(1,1);(2,2);(3,3);(4,4)	(1,1);(2,2);(3,3);(4,4)	7	1799	2874	91%
Produto 8	(1,1);(2,2);(3,3);(4,4)	(1,1);(2,2);(3,3);(4,4)	10	3022	1871	88%
Produto 7	(1,1);(2,2);(3,3);(4,4)	(1,1);(2,2);(3,3);(4,4)	18	7982	1126	87%
Produto 10	(1,1);(2,2);(3,3);(1,4)	(1,1);(1,2);(1,3);(1,4)	40	17757	973	77%
Produto 12	(1,1);(2,2);(3,3);(4,4)	(1,1);(1,2);(1,3);(1,4)	53	26348	827	75%
Produto 16	(1,1);(1,2);(1,3);(4,4)	(1,1);(1,2);(1,3);(1,4)	46	20590	593	78%
Produto 14	(1,1);(2,2);(3,3);(4,4)	(1,1);(2,2);(3,3);(4,4)	44	24804	593	84%
Produto 9	(1,1);(2,2);(3,3);(4,4)	(1,1);(2,2);(3,3);(4,4)	61	35020	436	81%
Produto 19	(1,1);(2,2);(2,3);(2,4)	(2,1);(2,2);(2,3);(2,4)	61	34444	247	69%
Produto 4	(1,1);(1,2);(1,3);(4,4)	(1,1);(1,2);(1,3);(1,4)	69	40005	201	79%
Produto 20	(1,1);(1,2);(1,3);(1,4)	(1,1);(1,2);(1,3);(1,4)	108	55419	195	71%
Produto 13	(1,1);(1,2);(1,3);(1,4)	(1,1);(1,2);(1,3);(1,4)	102	49752	154	70%
Produto 18	(1,1);(1,2);(1,3);(1,4)	(1,1);(1,2);(1,3);(1,4)	119	63995	88	65%
Produto 5	(2,1);(2,2);(2,3);(2,4)	(2,1);(2,2);(2,3);(2,4)	75	38965	80	68%
Produto 23	(1,1);(1,2);(1,3);(1,4)	(1,1);(1,2);(1,3);(1,4)	125	61870	67	57%
Produto 22	(2,1);(2,2);(2,3);(2,4)	(2,1);(2,2);(2,3);(2,4)	120	57373	53	61%
Produto 6	(1,1);(1,2);(1,3);(1,4)	(1,1);(1,2);(1,3);(1,4)	112	58307	52	53%
Produto 24	(1,1);(1,2);(1,3);(1,4)	(1,1);(1,2);(1,3);(1,4)	65	38526	51	58%
Produto 15	(1,1);(1,2);(1,3);(1,4)	(1,1);(1,2);(1,3);(1,4)	218	123793	47	53%
Produto 21	(1,1);(1,2);(1,3);(1,4)	(1,1);(1,2);(1,3);(1,4)	90	60814	32	49%
Produto 1	(1,1);(1,2);(1,3);(1,4)	(1,1);(1,2);(1,3);(1,4)	172	95624	15	45%
Produto 2	(1,1);(1,2);(1,3);(1,4)	(1,1);(1,2);(1,3);(1,4)	218	394744	14	47%
Produto 25	(1,1);(1,2);(1,3);(1,4)	(1,1);(1,2);(1,3);(1,4)	191	111376	11	36%
Produto 3	(1,1);(1,2);(1,3);(1,4)	(1,1);(1,2);(1,3);(1,4)	437	464857	4	14%

Tabela 5.11: Resultados do modelo para o escopo do problema - Configurações das soluções e aspectos computacionais

Na tabela anterior estão dispostas as configurações sugeridas pelo modelo e aspectos computacionais de cada rodada. Completam a tabela as informações de demanda do escopo e a participação dos custos de transporte na solução de cada rodada. A tabela foi ordenada pela coluna  $\sum D_j$ .

Nota-se que, à medida que o nível de demanda do produto no escopo diminui, o modelo tende a apontar para uma configuração mais centralizada de estoques. Este comportamento já havia sido descrito na seção 5.2.1: quanto maior o nível de demanda, maior a participação dos custos de transporte no custo total, e mais propensa a configuração da rede para descentralizar os estoques (vale observar que isto depende da estrutura de custos de transporte dos arcos da rede considerada). De fato, fica evidente pela tabela 5.11 a influência do peso do nível de demanda e custo de transporte na configuração da solução proposta. Outros fatores também contribuem para diferentes participações do custo do transporte no total de custos, como o valor agregado do produto.

A tabela a seguir sintetiza as informações da tabela 5.11. Ela ilustra o número de ocorrências de cada estratégia diferente de localização de estoque de ciclo e de segurança sugerida pelo modelo para cada classe de produtos. Nota-se que a coluna total representa o número de produtos de cada classe.

<b>Estoque</b>	<b>Classe</b>	<b>DT</b>	<b>CP</b>	<b>CT</b>	<b>Total</b>
Ciclo	A	7	4	0	11
	B	0	0	9	9
	C	0	0	5	5
Segurança	A	5	0	6	11
	B	0	0	9	9
	C	0	0	5	5

Tabela 5.12: Resumo das estratégias de localização de estoques sugeridas pelo modelo para o escopo proposto

As siglas DT, CP e CT representam:

- DT - Descentralização total dos estoques nas lojas;
- CP - Centralização parcial dos estoques;
- CT - Centralização total dos estoques em uma loja.

Verifica-se que a estratégia de descentralizar os estoques nas lojas só ocorreu para produtos da Classe A, ou seja, os produtos de maior movimentação. A centralização parcial

de estoques também só ocorreu para alguns produtos da Classe A, sendo uma solução intermediária que pondera os ganhos de escala de uma centralização com outros fatores favoráveis à descentralização (transporte, custos de centralização).

Para os produtos das classes B e C, o modelo sugere a centralização total dos estoques na loja que oferecer o menor custo logístico para essa política. Observa-se que na maioria dos casos essa centralização ocorreu na loja 1, em virtude, principalmente, da estrutura de custos de transporte da rede e da distribuição da demanda entre as lojas. Para os produtos 5 e 22, entretanto, a instalação centralizadora é a loja 2, em função da demanda nesta loja ser muito superior às demais.

Os diferentes resultados sugeridos pelo modelo para os 25 produtos do escopo confirmam as idéias de Ballou [6] e Wanke [48] sobre segmentar as estratégias de localização de estoques para diferentes produtos em uma rede de distribuição.

A figura abaixo ilustra as estratégias de localização de estoque de ciclo sugeridas pelo modelo para os 25 produtos do escopo do problema. O gráfico relaciona o valor agregado do produto e giro de estoque com a decisão de centralização de estoques. São utilizadas as mesmas siglas da tabela 5.12 para diferenciar as estratégias de localização de estoques sugeridas:

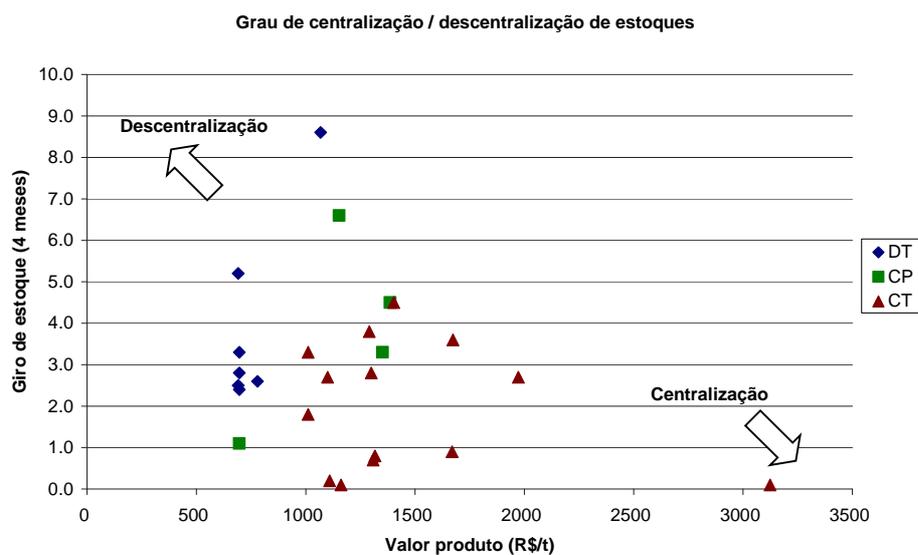


Figura 5.3: Estratégias de localização de estoques de ciclo em função do valor do produto e do giro do estoque

Conforme ilustrado, para os produtos de maior valor agregado e menor giro de estoque, o modelo tende a sugerir uma política de estoque mais centralizada. Por outro lado, para produtos de menor valor agregado e maior giro de estoque, o modelo sugere em geral uma política mais descentralizada de estoques. Alguns casos de centralização parcial de estoques são sugeridos em faixas intermediárias. Os resultados estão de acordo com os sugeridos por Wanke [48].

Vale por último ressaltar que a estratégia considerada no modelo proposto de separar as decisões de localização de estoques pode ser interessante. Como exemplo pode ser observado na tabela 5.11 que os produtos 11, 10, 12, 16, 19 e 4 têm como solução diferentes estratégias para alocação de seus estoques de ciclo e de segurança. Esta consideração pode ser especificamente adequada quando o produto tem, por exemplo, demanda regular e de grande movimentação na rede, de forma que seus estoques, para atender a demanda média, podem estar nas próprias lojas e os estoques de segurança podem estar convenientemente centralizados em um local, de forma a se ter um nível de estoque de segurança total menor na rede considerada.

### 5.3.2 Aspectos computacionais

Nota-se pela tabela 5.11 que diferentes condições de variação de parâmetros para o mesmo tamanho do problema (número de lojas) podem levar a tempos de resolução e número de iterações bem diferentes. Em geral, o algoritmo do programa utilizado tende a demorar mais a encontrar a solução quando o custo de transporte tem menor participação no custo total do problema. Foi observado empiricamente que pequenas variações de dados podem alterar significativamente o número de iterações para se chegar à solução do problema. Isto significa que os tempos de processamento e número de iterações podem também ser sensíveis a outros parâmetros, como valor do produto.

Melkote e Daskin [32] e Nozick [35] avaliaram em seus trabalhos a performance computacional através de testes com variações do tamanho do problema e parâmetros.

A tabela a seguir apresenta mais informações referentes aos aspectos de performance computacional com a variação de parâmetros. Foram considerados os mesmos dados referentes à tabela 5.9, onde foram realizadas simulações de cenários através da variação dos parâmetros  $G_i/F_i$ , xVP e xCV para um nível de serviço de 99.9%. Vale ressaltar

que as análises de tempo de processamento e iterações não têm a pretensão de serem conclusivas, mas apenas de descreverem o comportamento apresentado pelo sistema.

Simulação	% Gi / Fi	xVP	xCV	S3	t(s)	It
1	0.1	1	1	14674	13	2419
2	0.1	3	1	16650	44	17921
3	0.1	5	1	18007	48	19421
4	0.25	1	1	14731	10	2564
5	0.25	3	1	16707	39	16257
6	0.25	5	1	18064	43	17377
7	0.5	1	1	14823	8	1952
8	0.5	3	1	16803	34	12924
9	0.5	5	1	18159	40	16237
10	0.1	1	5	15405	11	3433
11	0.1	3	5	18286	14	5673
12	0.1	5	5	20547	15	7124
13	0.25	1	5	15692	8	2953
14	0.25	3	5	18572	12	5175
15	0.25	5	5	20833	14	6364
16	0.5	1	5	16152	6	2315
17	0.5	3	5	19050	11	4253
18	0.5	5	5	21311	12	5455

Tabela 5.13: Aspectos computacionais do modelo em função da variação de alguns parâmetros

A coluna S3 representa o custo da solução semanal em reais encontrada em cada simulação. Verifica-se que o tempo de processamento mantém uma certa correspondência com o número de iterações, entretanto esta relação não tem correlação perfeita. Basta observar o caso das simulações 7 e 13. Elas tem o mesmo tempo de processamento (8 segundos), porém o número de iterações é diferente.

As figuras a seguir ilustram o comportamento do tempo de processamento e do número de iterações como função dos parâmetros da tabela anterior.

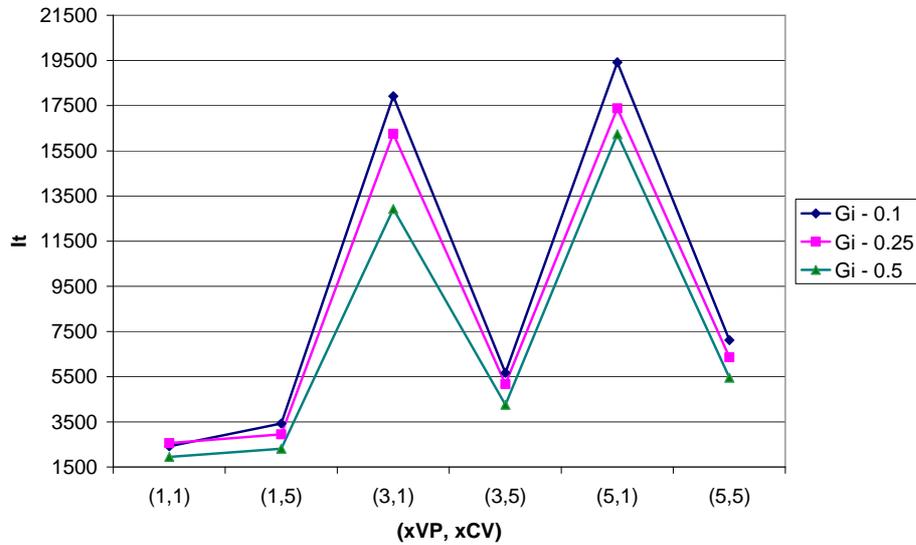


Figura 5.4: Número de iterações do algoritmo para chegar à solução como função da variação de parâmetros

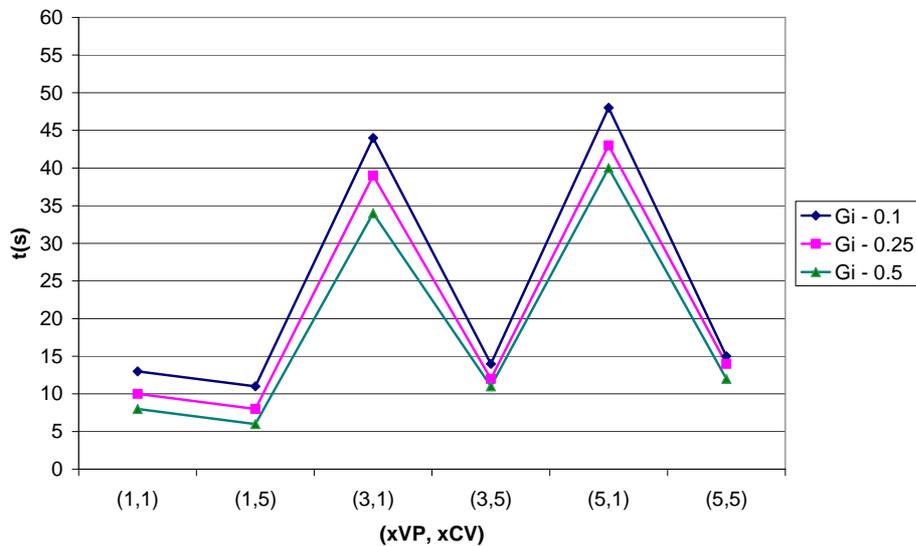


Figura 5.5: Tempo de processamento do algoritmo (segundos) para chegar à solução como função da variação de parâmetros

### 5.3.2.1 Limitações computacionais do modelo

O modelo proposto foi testado em um cenário restringido pelo problema gerencial levantado neste trabalho. Entretanto, é importante que se faça um julgamento sobre sua aplicabilidade em demais situações (outras empresas podem ter problemas semelhantes,

com maior número de nós), ou mesmo no contexto estudado livre de restrições. Conforme abordado na seção 4.1.5.1, o escopo de lojas (nós da rede de distribuição) tratado pelo modelo é determinado pelas restrições de raio geográfico de possíveis centralizações de estoque.

Já foi comentado no final do capítulo 4 aspectos de complexidade computacional do modelo proposto. Normalmente, problemas de programação não-linear inteira mista representam um grande desafio para resolução computacional devido a serem problemas NP-completos (GAREY;JOHNSON [22]; TIAN;MA;ZHANG [46]).

A influência de alguns parâmetros já foi apresentada e comentada. A tabela a seguir mostra os resultados de uma variação de cenário alterando-se a quantidade de lojas e os níveis de demanda.

Quantidade de lojas	Fator x $\sum D_j$	t(s)	It
2	0.5	1	33
	1	1	190
	2	1	40
3	0.5	3	1936
	1	4	4506
	2	2	1367
4	0.5	168	124297
	1	113	58307
	2	94	49370
5	0.5	6126	4457532
	1	6168	3864291
	2	6129	3755400

Tabela 5.14: Performance computacional variando o tamanho de lojas e nível de demanda

Este teste foi realizado tomando-se um problema específico como referência (um produto do cenário do escopo). Para cada simulação, foram medidos os tempos de processamento em segundos e o número de iterações necessários para o modelo chegar na solução. Foram alterados os níveis de demandas nas lojas (multiplicando as demandas das lojas pelos fatores 0.5, 1 e 2) e o tamanho do problema, alterando-se o número de lojas.

Nota-se que para 2 lojas, o problema é resolvido de imediato, com poucas iterações. Para 3 lojas, o tempo e o número de iterações aumenta, mas ainda se apresentam em patamares baixos. Para 4 lojas, que é o tamanho do escopo tratado neste trabalho, os problemas são resolvidos em torno de 2 minutos. Para 5 lojas, o tempo de processamento já é alto, chegando próximo de 2 horas. Quando foi testado um problema com 6 lojas, não foi obtida a solução ótima global em tempo computacional razoável, sendo interrompida a otimização quando esta atingiu 17 horas de processamento. Vale ressaltar que as soluções encontradas no momento da parada do algoritmo poderiam ser melhores que a vigente.

Toda a análise computacional de performance foi feita utilizando-se o otimizador de soluções globais do *What's Best!*<sup>®</sup> (ver seção 5.1.1). Vale aqui observar que quando não utilizada essa rotina de otimização global, o *What's Best!*<sup>®</sup> encontra uma solução ótima local em um processamento de poucos segundos. Entretanto, como o problema é combinatório, essa solução não apresenta em princípio interesse, pois existem outras soluções melhores em outras vizinhanças não consideradas pela rotina (não são considerados todos os ótimos locais).

Sem entrar no mérito de qualidade do algoritmo do *software* utilizado, os resultados pretendem apenas mostrar a tendência de aumento expressivo do tempo de processamento quando se aumenta o tamanho do problema com pequenos incrementos de número de nós, o que está de acordo com a literatura de problemas NP-completos. Outras variáveis também influenciam a performance do modelo, e os resultados mostram que esta influência não é tão grande quanto ao número de nós considerados na rede, mas também merecem atenção na implementação e interpretação de resultados.

# Capítulo 6

## Conclusões

Foi proposta nesta dissertação uma abordagem quantitativa visando o apoio à tomada de decisões logísticas em uma rede de distribuição estabelecida. A descrição do contexto de estudo revelou a adoção de uma política única de distribuição e localização de estoques em uma rede de lojas. Adota-se a política de descentralizar os estoques de todos os produtos em todas as lojas.

A pesquisa bibliográfica identificou que os modelos de desenho de redes de distribuição consideram, na maioria das vezes, custos de transporte e custos de instalação; porém os custos de estoque são geralmente simplificados, seja por aproximações lineares ou premissas que não representam a realidade. Em vista disso, o modelo referencial adotado neste trabalho foi o de Miranda e Garrido [34], que embora demande um esforço computacional maior para resolução, se apresenta mais próximo à realidade do problema.

Com base no referencial identificado, foi proposto um modelo matemático de programação não-linear inteira mista visando determinar quais os melhores fluxos de distribuição e qual a melhor localização dos estoques para cada produto na rede de distribuição estabelecida. A função objetivo do modelo visa minimizar o total dos custos logísticos relevantes levantados para o problema, como custos de transporte, custos de estoque de ciclo, custos de estoque de segurança e os custos de guarda dos estoques. A consideração de questões de estoque, transporte e localização no modelo proposto está em acordo com os fundamentos de logística empresarial, que considera o conjunto dessas três decisões integradas fundamental para um bom planejamento de redes logísticas.

A abordagem quantitativa proposta está coerente com as políticas e estratégias levantadas na logística empresarial, como o fluxo empurrado das operações de produção através de uma política de produção para estoque nas fábricas, o fluxo puxado nas operações de distribuição e a política de postergação de distribuição quando o estoque é centralizado em uma loja.

O modelo proposto foi implementado no *What's Best!*<sup>®</sup>, um pacote computacional que permite a resolução de problemas não-lineares. Foi utilizada uma rotina que supostamente garante soluções ótimas globais dentro de uma tolerância especificada.

Duas abordagens para apuração dos resultados foram propostas: simulação de cenários e aplicação do modelo ao escopo delimitado do problema.

Foram realizados dois tipos de simulações de cenários. Inicialmente, foram testados como os diversos componentes da função objetivo influenciam os resultados obtidos. Basicamente, constatou-se que existe uma forte compensação de custos entre transporte e estoque. O modelo tende a centralizar os estoques na ausência (ou em uma menor participação) dos custos de transporte, em função dos ganhos de escala resultantes do fenômeno do *Risk Pooling*. Por outro lado, na ausência ou baixa participação dos custos de estoque, o modelo tende a descentralizar os estoques. Este resultado está em concordância com os resultados encontrados em análise semelhante desenvolvida por Das e Tyagi [15]. Existe ainda na função objetivo proposta, os custos de guarda de estoques de ciclo e de segurança, que também favorecem a descentralização de estoques. Os valores desses custos devem ser bem calibrados para retratar a realidade do cenário, uma vez que as configurações de soluções são sensíveis a eles.

No segundo tipo de simulação, foram feitas várias alterações combinadas de parâmetros de forma a se compreender a influência dos mesmos nos resultados do modelo. Também foi realizada uma comparação dos resultados de custos obtidos com o modelo proposto, com um modelo alternativo acoplando-se as variáveis de decisão de localização de estoques (conforme modelo de MIRANDA;GARRIDO [34]) e com a política vigente de descentralização de estoques. Primeiramente, observou-se que a variação de parâmetros influencia bastante os custos apurados no modelo proposto. Este sempre apresenta no mínimo o mesmo custo da política vigente, uma vez que a descentralização de estoques é apenas um caso particular das várias soluções possíveis do modelo. Para situações de produtos de alto valor agregado, alta variabilidade de demanda, baixo custo de centralização de

estoques e alto nível de serviço exigido, o ganho é potencializado em relação à prática vigente, pois são exatamente as condições mais favoráveis à centralização de estoques. Miranda e Garrido [34] chegaram à mesma conclusão em seu trabalho.

O modelo foi aplicado aos 25 produtos do escopo delimitado do problema. Ficou evidenciado que produtos com diferentes características como valor agregado, giro de estoque e nível de demanda tiveram diferentes soluções propostas pelo modelo. A adoção da solução sugerida pelo modelo proposto acarreta um ganho anual próximo de R\$ 80000, isto somente para os 25 produtos abordados no problema. Uma extensão da abordagem proposta para os demais produtos da rede pode gerar economias muito maiores, especialmente para os produtos de classe C (mais propensos à centralização de estoques). Mais uma vez, os resultados apresentados estão de acordo com a literatura, uma vez que perfis de produtos diferentes sugerem estratégias de localização de estoques diferentes em uma rede de distribuição, conforme apontam Wanke [48] e Ballou [6].

Por fim, foram realizados testes computacionais para verificar os limites e comportamentos do modelo proposto. Verificou-se que pequenas variações de parâmetros podem afetar o tempo e o esforço computacional de resolução. Para instâncias maiores do que 5 nós, o problema não foi resolvido em tempo computacional razoável pela rotina de otimização global do *software* utilizado. Quando foram utilizadas rotinas não-lineares convencionais (busca de ótimos locais) o modelo foi resolvido em tempos muito baixos (poucos segundos), porém as soluções encontradas não foram satisfatórias.

O modelo, portanto, respondeu adequadamente às condições do escopo do problema dessa dissertação, porém faz-se necessária a busca por novos métodos de resolução para aplicações maiores. Miranda e Garrido [34], por exemplo, propõem uma Relaxação Lagrangeana, que embora não encontre ótimos globais pode apresentar boas soluções em tempos computacionais razoáveis.

## 6.1 Sugestões para trabalhos futuros

O modelo matemático proposto nesta dissertação pode apresentar variações interessantes. A exemplo da modelagem desenvolvida por Nozick e Turnquist [37], pode-se incluir no modelo restrições de cobertura, de modo a se evitar centralizações de estoque acima de um

determinado raio geográfico. Nesse trabalho, tal questão foi contornada pela delimitação prévia de um escopo de lojas pertencentes a uma região.

A consideração de vários modais de transporte é um importante aspecto no desenho de redes logísticas. A decisão de qual política de transporte adotar em determinado cenário influi nas decisões de estoque. Jayaraman [26] considera em seu modelo vários modais de transporte, entretanto não considera estoques de segurança, deixando de explorar uma análise de compensação de custos importante. Seria interessante considerar no modelo proposto diferentes modalidades de transporte.

Outros aspectos que podem ser importantes na definição do desenho de uma rede logística são as questões fiscais. Os diferentes impostos poderiam ser retratados nos custos de transporte entre instalações da rede.

Uma recomendação importante para a realização de trabalhos futuros com a utilização da modelagem aqui proposta é a implementação de técnicas computacionais (como métodos heurísticos) para resolução de instâncias de dimensões mais elevadas, de forma a se obter boas soluções em tempos de processamento razoáveis.

# Referências Bibliográficas

- [1] D. Ambrosino e M. G. Scutellà. Distribution network design: New problems and related models. *European Journal of Operational Research*, 165:610–624, 2005.
- [2] R. N. Anthony e V. Govindarajan. *Management Control Systems*. McGraw-Hill/Irwin, Boston, 9ª edição, 1998.
- [3] L. A. Araújo. *Manual de siderurgia*. Arte e Ciência, volume 1, São Paulo, 1997.
- [4] S. Axsäter. Using the deterministic EOQ formula in stochastic inventory control. *Management Science*, 42:830–834, 1996.
- [5] R. Ballou e J. Masters. Commercial software for locating warehouses and other facilities. *Journal of Business Logistics*, 14:71–107, 1993.
- [6] R. H. Ballou. *Gerenciamento da cadeia de suprimentos: planejamento, organização e logística empresarial*. Bookman, Porto Alegre, 2001.
- [7] M. Bazaraa. *Nonlinear Programming Theory and Algorithms*. John Wiley and Sons, 1979.
- [8] D. J. Bowersox e D. J. Closs. *Logística Empresarial: o processo de integração da cadeia de suprimento*. Atlas, São Paulo, 2001.
- [9] S. P. Bradley, A. C. Hax, e T. L. Magnanti. *Applied Mathematical Programming*. Addison Wesley, 1977.
- [10] M. L. Brandeau e S. S. Chiu. An overview of representative problems in location research. *Management Science*, 35:645–674, 1989.
- [11] C. R. V. de Carvalho. *Une Proposition d’Intégration de la Planification et l’Ordonancement de Production: Application de la Méthode de Benders*. Tese de doutorado, Université Blaise Pascal, Clermont-Ferrand, França, 1998.

- [12] M. Christopher. *Logística e Gerenciamento da Cadeia de Suprimentos: Estratégias para a Redução de Custos e Melhoria dos Serviços*. Pioneira, São Paulo, 2001.
- [13] B. J. Coleman. Determining the correct service level target. *Production and Inventory Management Journal*, 41:19–23, 2000.
- [14] K. L. Croxton e W. Zinn. Inventory considerations in network design. *Journal of Business Logistics*, 26:149–168, 2005.
- [15] C. Das e R. Tyagi. Role of inventory and transportation costs in determining the optimal degree of centralization. *Transportation Research Part E*, 33:171–179, 1997.
- [16] Instituto Brasileiro de Siderurgia. *Anuário Estatístico*. IBS, Rio de Janeiro, 2005.
- [17] Instituto Brasileiro de Siderurgia. *Problemas modernos*. Disponível em: <[http://www.ibs.org.br/siderurgia\\_historia\\_mundo5.asp](http://www.ibs.org.br/siderurgia_historia_mundo5.asp)>, acesso em: 07 fev. 2006.
- [18] Instituto Brasileiro de Siderurgia. *Processo siderúrgico*. Disponível em: <[http://www.ibs.org.br/siderurgia\\_processo\\_siderurgico.asp#](http://www.ibs.org.br/siderurgia_processo_siderurgico.asp#)>, acesso em: 07 fev. 2006.
- [19] Instituto Brasileiro de Siderurgia. *A Siderurgia no Brasil*. Disponível em: <[http://www.ibs.org.br/siderurgia\\_historia\\_brasil7.asp](http://www.ibs.org.br/siderurgia_historia_brasil7.asp)>, acesso em: 07 fev. 2006.
- [20] G. D. Eppen. Effects of centralization on expected costs in a multi-location newsboy problem. *Management Science*, 25:498–501, 1979.
- [21] P. T. Evers e F. J. Beier. The portfolio effect and multiple consolidation points: A critical assessment of the square root law. *Journal of Business Logistics*, 14:109–125, 1993.
- [22] M. R. Garey e D. S. Johnson. *Computers and Intractability: a Guide to the Theory of NP-Completeness*. W.H. Freeman and Company, San Francisco, 1979.
- [23] A. M. Geoffrion e G. W. Graves. Multicommodity distribution system design by benders decomposition. *Management Science*, 20:822–844, 1974.
- [24] M. C. Goldberg e H. P. L. Luna. *Otimização Combinatória e Programação Linear - Modelos e Algoritmos*. Campus, 2000.
- [25] Lindo Systems Inc. *What's Best! 8.0*. Disponível em: <<http://www.lindo.com/wbf.html>>, acesso em: 14 dez. 2005.

- [26] V. Jayaraman. Transportation, facility location and inventory issues in distribution network design. *International Journal of Operations & Production Management*, 18:471–494, 1998.
- [27] P. Kotler. *Administração de Marketing: a edição do novo milênio*. Prentice Hall, São Paulo, 2000.
- [28] M. P. Lima. Custos logísticos na economia brasileira. *Revista Tecnológica*, 122:64–69, 2006.
- [29] H. P. Luna. Sistemas de apoio à decisão. *Manufatura Integrada por Computador*, p.83–100, 1995.
- [30] M. M. Mahmoud. Optimal inventory consolidation schemes: A portfolio effect analysis. *Journal of Business Logistics*, 13:193–214, 1992.
- [31] E. Martins. *Contabilidade de Custos*. Atlas, São Paulo, 4ª edição, 1990.
- [32] S. Melkote e M. Daskin. Capacitated facility location/network design problems. *European Journal of Operational Research*, 129:481–495, 2001.
- [33] M. Minoux. *Mathematical Programming Theory and Algorithms*. John Wiley and Sons, 1986.
- [34] P. A. Miranda e R. A. Garrido. Incorporating inventory control decisions into a strategic distribution network design model with stochastic demand. *Transportation Research Part E*, 40:183–207, 2004.
- [35] L. K. Nozick. The fixed charge facility location problem with coverage restrictions. *Transportation Research Part E*, 37:281–296, 2001.
- [36] L. K. Nozick e M. A. Turnquist. Integrating inventory impacts into a fixed-charge model for locating distribution centers. *Transportation Research Part E*, 34:173–186, 1998.
- [37] L. K. Nozick e M. A. Turnquist. Inventory, transportation, service quality and the location of distribution centers. *European Journal of Operational Research*, 129:362–371, 2001.
- [38] C. Oliveira. *Planejamento da Distribuição de Produtos Siderúrgicos Utilizando Modelos de Localização*. Dissertação (mestrado em engenharia de produção), Universidade Federal de Minas Gerais, 2003.

- [39] S. H. Owen e M. S. Daskin. Strategic facility location: A review. *European Journal of Operational Research*, 111(1):423–447, 1998.
- [40] J. D. Pagh e M. C. Cooper. Supply chain postponement and speculations strategies: How to choose the right strategy. *Journal of Business Logistics*, 19:13–33, 1998.
- [41] P. M. Pardalos. Complexity Issues in Nonconvex Network Flow Problems. In: *Complexity in Numerical Optimization*. World Scientific, 1993. p.163–179.
- [42] P. M. Pardalos, H. E. Romeijn, e H. Tuy. Recent developments and trends in global optimization. *Journal of Computational and Applied Mathematics*, 124:209–228, 2000.
- [43] L. H. Pedrosa. *Localização de centros de distribuição de uma empresa siderúrgica utilizando tecnologia de informação ERP SAP<sup>®</sup> APO/Network Design<sup>®</sup>*. Dissertação (mestrado em engenharia de produção), Universidade Federal de Minas Gerais, 2003.
- [44] R. A. Santos. *Análise do Processo de Implantação de Sistemas de Gerenciamento de Cadeias de Suprimento em Empresas Brasileiras*. Dissertação (mestrado em engenharia de produção), Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2004.
- [45] A. Tanwari e J. Betts. Impact of forecasting on demand planning. *Production and Inventory Management Journal*, 40:31–35, 1999.
- [46] P. Tian, J. Ma, e D. Zhang. Non-linear integer programming by darwin and boltzmann mixed strategy. *European Journal of Operational Research*, 105:224–235, 1998.
- [47] H. M. Wagner. *Pesquisa Operacional*. Prentice-Hall do Brasil, 2<sup>a</sup> edição, 1986.
- [48] P. Wanke. Posicionamento logístico e a definição da política de atendimento aos clientes. *Revista Tecnológica*, 55:32–39, 2000.
- [49] P. Wanke. *Gestão de estoques na cadeia de suprimento: decisões e modelos quantitativos*. Atlas, São Paulo, 2003.
- [50] W. Zinn, M. Levy, e D. J. Bowersox. Measuring the effect of inventory centralization/decentralization on aggregate safety stock: "the square root law" revisited. *Journal of Business Logistics*, 10:1–14, 1989.

# Apêndices

## APÊNDICE A - Dados comparativos de previsão de vendas e vendas reais dos produtos da loja 2

Produto	Previsão de vendas (t)	Vendas reais (t)	Aderência da previsão
Produto 1	2.00	0.32	633%
Produto 2	2.43	0.41	586%
Produto 3	5.50	1.60	344%
Produto 4	49.31	21.23	232%
Produto 5	37.27	17.91	208%
Produto 6	14.88	7.97	187%
Produto 7	137.62	92.58	149%
Produto 8	132.95	95.26	140%
Produto 9	63.98	46.68	137%
Produto 10	53.51	39.13	137%
Produto 11	201.61	149.14	135%
Produto 12	48.85	37.72	130%
Produto 13	11.89	9.90	120%
Produto 14	63.98	53.68	119%
Produto 15	6.87	6.02	114%
Produto 16	21.61	21.18	102%
Produto 17	255.93	254.79	100%
Produto 18	5.27	5.31	99%
Produto 19	71.82	74.71	96%
Produto 20	24.47	25.56	96%
Produto 21	2.00	2.10	95%
Produto 22	8.70	11.18	78%
Produto 23	7.16	9.92	72%
Produto 24	3.69	6.19	60%
Produto 25	0.45	0.86	53%

Tabela 1: Aderência da previsão de vendas dos produtos do escopo na loja 2

## APÊNDICE B - Dados quantitativos dos produtos do escopo

Produto	Valor (R\$/t)	Coef Variação Vendas	Giro (4 meses)
Produto 1	1162	70%	0.1
Produto 2	1109	59%	0.2
Produto 3	3124	143%	0.1
Produto 4	696	52%	1.1
Produto 5	1011	22%	1.8
Produto 6	1669	53%	0.9
Produto 7	691	15%	2.5
Produto 8	779	17%	2.6
Produto 9	696	46%	2.4
Produto 10	1153	104%	6.6
Produto 11	696	14%	3.3
Produto 12	1068	116%	8.6
Produto 13	1300	19%	2.8
Produto 14	696	13%	2.8
Produto 15	1673	18%	3.6
Produto 16	1386	32%	4.5
Produto 17	691	5%	5.2
Produto 18	1291	83%	3.8
Produto 19	1351	71%	3.3
Produto 20	1403	17%	4.5
Produto 21	1317	98%	0.8
Produto 22	1100	56%	2.7
Produto 23	1972	98%	2.7
Produto 24	1011	51%	3.3
Produto 25	1308	143%	0.7

Tabela 2: Características dos produtos do escopo

## APÊNDICE C - Dados padrões do produto 17 e custos de transporte entre lojas

Parâmetros	Loja 1	Loja 2	Loja 3	Loja 4
$D_j$	18.75	14.03	14.17	7.28
$U_j$	30.45	24.00	25.02	19.05
CV	29%	35%	35%	60%
$CE_i$	4.09	4.47	4.43	4.55
$CR_i$	699.29	699.29	699.29	699.29
$LT_i^h$	1.33	1.56	1.61	1.71
$CT_i^h$	192.91	274.58	265.24	292.52
$F_i$	13.00	13.00	26.00	13.00
$G_i$	6.50	6.50	13.00	6.50

Tabela 3: Dados padrões do produto 17 para simulação de cenários

$CT_{ij}$	Loja 1	Loja 2	Loja 3	Loja 4
Loja 1	0	96.00	111.10	138.89
Loja 2	100.00	0	47.25	100.00
Loja 3	111.10	47.25	0	61.14
Loja 4	92.40	71.23	62.30	0

Tabela 4: Custos de Transporte entre as lojas

# Anexos

## ANEXO A - Relatório de solução do *What's Best!*®

What'sBest!® 8.0 (Nov 08, 2005) - Status Report -

DATE GENERATED: fev 27, 2006

MODEL INFORMATION:

CLASSIFICATION DATA	Current	Capacity Limits
Numerics	990	
Variables	110	
Adjustables	32	8000
Constraints	12	4000
Integers/Binaries	0/32	800
Globals	20	20
Coefficients	255	
Minimum coefficient value:	1	
Minimum coefficient in formula:	Modelo!F7	
Maximum coefficient value:	7219.1074641419	
Maximum coefficient in formula:	Modelo!B71	
MODEL TYPE:	Mixed Integer / Nonlinear	
SOLUTION STATUS:	GLOBALLY OPTIMAL	
OPTIMALITY CONDITION:	SATISFIED	
OBJECTIVE VALUE:	18572.359899062	
DIRECTION:	Minimize	
SOLVER TYPE:	Global	
TRIES:	6492	
INFEASIBILITY:	0	
BEST OBJECTIVE BOUND:	18572.359899062	
STEPS:	0	
ACTIVE:	0	
SOLUTION TIME:	0 Hours 0 Minutes 15 Seconds	

Figura 1: Exemplo de relatório de solução gerado pelo *What's Best!*®