

Universidade Federal do Rio de Janeiro
Instituto COPPEAD de Administração

**Incorporando o Efeito de Consolidação dos Estoques no
Planejamento de Redes Logísticas**

Edson João Montebeller Junior

Rio de Janeiro

2009

Livros Grátis

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

Milhares de livros grátis para download.

Edson João Montebeller Junior

**Incorporando o Efeito de Consolidação dos Estoques no
Planejamento de Redes Logísticas**

Universidade Federal do Rio de Janeiro

Instituto COPPEAD de Administração

Mestrado em Administração de Empresas

Orientador: Peter Wanke, D. Sc.

Rio de Janeiro

2009

Montebeller Junior, Edson João.

Incorporando o efeito de consolidação dos estoques no planejamento de redes logísticas/ Edson João Montebeller Junior – Rio de Janeiro, 2009.

166 f.: il

Dissertação (Mestrado em Administração) – Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ, Instituto COPPEAD de Administração, 2009.

Orientador: Peter Wanke.

1. Localização de Instalações 2. Logística. 3. Administração – Teses. I. Wanke, Peter (Orient.). II. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Instituto COPPEAD de Administração. III. Título.

Incorporando o Efeito de Consolidação dos Estoques no Planejamento de Redes Logísticas

Edson João Montebeller Junior

Dissertação submetida ao corpo docente do Instituto COPPEAD de Pós Graduação e Pesquisa em Administração de Empresas da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre.

Rio de Janeiro, 26 de Junho de 2009

Aprovada por:

Prof. Peter Wanke, D.Sc. – Orientador

Prof. Eduardo Saliby, Ph.D

Prof. Virgílio José Martins Ferreira Filho, D.Sc.

Rio de Janeiro

2009

A todos aqueles que tiveram a coragem de trilhar um caminho diferente. Se no presente são chamados de loucos, no futuro serão lembrados como visionários.

Agradecimentos

Primeiramente, a Deus que não necessita de adjetivos.

Aos meus pais, Edson e Marli, que me ensinaram com palavras e ações a ética e o valor do trabalho.

A minhas irmãs, Gabriela e Juliana, pela boa infância que passamos juntos.

A Ana Luiza, meu amor, pela paciência e apoio incondicional nesses anos de mestrado.

Aos amigos conquistados mundo afora e restante da família, por sempre se lembrarem de mim me apoiando na difícil decisão de cursar um mestrado.

Ao Prof. Dr. Peter Wanke, por sua orientação indispensável à realização deste trabalho.

A todos os amigos feitos no COPPEAD, em especial a João Kuperman, pelo fornecimento de softwares.

Aos professores e funcionários do COPPEAD, que fazem com o que a escola esteja entre as melhores do mundo.

Aos Professores Eduardo Saliby, Ph.D. e Virgílio José Martins Ferreira Filho, D.Sc., membros da banca examinadora, pela atenção e tempo dispensados na apreciação deste humilde trabalho.

Ao Governo Brasileiro, por ter fornecido a mim nos ensino fundamental, médio, superior e na pós-graduação uma educação de qualidade e por ter financiado, através da Capes, parte deste trabalho.

Resumo

Os profissionais de logística devem tomar decisões estratégicas para gerenciar incertezas, serviço ao cliente e custos na rede de distribuição, definindo a política mais apropriada no intuito de obter vantagens competitivas cruciais ao sucesso da empresa. Tal política compreende, além de outros aspectos, o dimensionamento da rede de instalações e a alocação dos estoques na mesma. A presente pesquisa tratou, então, ambos os assuntos, em função da importância estratégica dos mesmos para o gerenciamento da cadeia de suprimentos.

Primeiramente, foi desenvolvido um modelo de localização de instalações e alocação de estoques que permite determinar, através de programação matemática não-linear, a configuração da rede para a qual o custo total é mínimo. Os diferenciais do modelo são o tratamento simultâneo dos estoques de ciclo e segurança através da incorporação do Efeito de Consolidação a um problema de localização de instalações, a consideração das demandas dos mercados com correlações e desvios-padrão diferentes de zero, a consideração dos *lead-times* de ressuprimento dos armazéns com desvios-padrão também diferentes de zero e a adoção da premissa do *cross-filling* (ou transferência regular). Em seguida, foi conduzida uma análise de sensibilidade no intuito de se obterem *insights* gerenciais, onde foram gerados e otimizados diferentes cenários aleatórios, com o posterior tratamento estatístico dos resultados das otimizações.

Foram observadas na análises de sensibilidade as políticas de centralização total e mista. A pesquisa então mostrou que na política de centralização total os *lead-times* de ressuprimento dos armazéns, custo de manutenção de estoques nos armazéns (também interpretado como o valor dos produtos), custo de colocação de pedidos nos armazéns, amplitude do *lead-time* (LTMax/LTMin), média aritmética do desvio-padrão da demanda dos 5 mercados, média aritmética do *lead-time* de ressuprimento dos 5 armazéns, média aritmética do custo de manutenção de estoques dos 5 armazéns e média aritmética do custo de colocação de pedidos dos 5 armazéns apresentaram valores mais altos. Já na política mista, ao contrário, tais parâmetros apresentaram valores mais baixos. Dentre os parâmetros citados, aqueles que têm a maior influência na probabilidade de ocorrência de uma política são, em ordem decrescente de importância, o custo de manutenção de estoques dos produtos, a amplitude do *lead-time* e os próprios *lead-times*, sendo que altos valores dos parâmetros aumentam a probabilidade de ocorrência da política de centralização total. A pesquisa ainda mostrou que, quando a política de centralização total é a mais adequada a uma rede, o armazém aberto deve apresentar valores mais baixos do *lead-time* e do desvio padrão do *lead-time*. Por fim, foi apresentado um método para auxiliar gestores a avaliar se a política de alocação de estoques em prática nas redes que gerenciam é adequada e/ou determinar a política mais adequada em caso de reorganização de tais redes.

Palavras-chave: Localização de instalações, programação não-linear, estoques de ciclo e segurança, Efeito de Consolidação, *cross-filling*, políticas de alocação de estoques.

Abstract

Supply chain managers have to take strategic decisions in order to manage uncertainties, service level and costs in a supply chain, defining the most appropriate policy which will generate competitive advantages essential to the company's success. Such policy involves, among other aspects, the design of the distribution network and the allocation of inventory along the network. Therefore, this study treated both subjects due to their strategic significance for the supply chain management.

First of all, a facility location and inventory allocation model was developed in order to define the network configuration which generates the minimum total network cost through non-linear optimization. The main differentials of the model are the simultaneous treatment of cycle and safety inventory through the incorporation of the Consolidation Effect in a location problem, the adoption of non-zero market demands correlations and standard deviations, the adoption of non-zero replenishment lead-times standard deviations, and the assumption of the cross-filling premise. Then, a sensitivity analysis was conducted with the objective of providing managerial insights. Different random scenarios were generated, optimized, and had their outcomes treated statistically.

Two policies were observed in the sensitivity analysis: full centralization and mixed. The study then showed that the full centralization policy is characterized by high warehouse replenishment lead-times, high holding costs (also interpreted as the price of goods), high processing costs, high amplitude of warehouse lead-times (LTMax/LTMin), high arithmetic mean of standard deviations of the 5 market demands, high arithmetic mean of the 5 warehouse replenishment lead-times, high arithmetic mean of the 5 warehouse holding costs and high arithmetic mean of the 5 warehouse processing costs. On the opposite, the mixed policy is characterized by lower values of the cited parameters. Among these parameters, the holding costs, the amplitude of replenishment lead-times, and the lead-times themselves are the ones which have the strongest impact on the occurrence probability of a given policy, in the way that more the parameters values increase, more the probability that full centralization policy occurs increases. The study also showed when the full centralization policy occurs the warehouse opened presents lower values of replenishment lead-time and standard deviation of lead-time. Finally, a method was presented in order to help managers in determining whether the policy in use within the networks they manage is suitable and/or determine the most suitable policy in case of a reorganization of the networks is necessary.

Keywords: Facilities location, non-linear programming, cycle and safety inventory, Consolidation Effect, *cross-filling*, inventory allocation policies.

Lista de Ilustrações

Figura 1 - Exemplo de uma rede de distribuição com três elos. Adaptado de Miranda e Garrido (2004).	13
Figura 2 - Comportamento dos custos da rede de distribuição em função do número de armazéns. Adaptado de Figueiredo, Fleury e Wanke (2003).	16
Figura 3 - Representação do lote econômico de compra (<i>LEC</i>) e do ponto de pedido (<i>PP</i>) em um gráfico dente de serra. Adaptado de Wanke (2008).....	21
Figura 4 - Probabilidade de ocorrência da demanda durante o <i>lead-time</i> , aderente à distribuição normal. Adaptado de Wanke (2008).	24
Figura 5 - Efeito da adição de <i>ES</i> a <i>PP</i> na determinação da probabilidade de não faltar produto durante o <i>lead-time</i> . Adaptado de Wanke (2008).	26
Figura 6 - Centralização total de estoques para o caso particular com dois armazéns e dois mercados. Adaptado de Wanke e Saliby (2009).	29
Figura 7 - Sistemas independentes para o caso particular com dois armazéns e dois mercados. Adaptado de Wanke e Saliby (2009).	29
Figura 8 - Transferências regulares, ou <i>cross-filling</i> total, para o caso particular com dois armazéns e dois mercados. Adaptado de Wanke e Saliby (2009).	30
Figura 9 - Rede de distribuição composta por quatro armazéns e cinco mercados, caracterizada pela presença da política mista de alocação de estoques.	31
Figura 10 - Representação esquemática da rede estudada.	82
Figura 11 - Configuração física da rede estudada, mostrando a fábrica, os armazéns e os mercados. Fonte: Google Earth (Acesso em 15/07/2008).	92
Figura 12 - Passos da metodologia.....	97
Figura 13 - Frequência de abertura dos armazéns.	104
Figura 14 - Método para se determinar, em função dos parâmetros de entrada que têm maior influência na probabilidade de ocorrência das políticas, a adequação de uma determinada política de alocação de estoques.	118
Figura 15 - Sub-configuração da política mista mostrando a combinação de <i>cross-filling</i> e sub-centralização.	131
Figura 16- Sub-configuração da política mista mostrando a combinação de sub-centralização e sistema independente.....	132
Figura 17 - Sub-configuração da política mista mostrando a combinação de sistema independente, <i>cross-filling</i> e sub-centralização.....	132
Figura 18- Sub-configuração da política mista mostrando a combinação de <i>cross-filling</i> e sistema independente.	133
Figura 19 - Sub-configuração da política mista mostrando a combinação de sub-centralizações.....	133
Figura 20 - Histograma do custo total da rede.....	164
Figura 21 - Histograma do custo total de ressuprimento dos armazéns.....	164
Figura 22 - Histograma do custo total de distribuição aos mercados.	165
Figura 23 - Histograma do custo total transporte (ressuprimento e distribuição).	165
Figura 24 - Histograma do custo do estoque de ciclo.....	166
Figura 25 - Histograma do custo do estoque de segurança.	166

Lista de Quadros

Quadro 1 - Influência das ações de planejar/reagir e antecipar/postergar na restrição dos modelos de gestão de estoques. Fonte: Wanke (2008).....	20
Quadro 2 - Probabilidade de não faltar produto em estoque em função de valores selecionados de k , supondo a demanda no <i>lead-time</i> aderente à distribuição normal. Adaptado de Wanke (2008).	26
Quadro 3 - Adequação das políticas de alocação de estoques a diferentes características de demanda dos mercados, do <i>lead-time</i> de ressuprimento e dos custos de manutenção de estoques. Adaptado de Wanke e Saliby (2009).	33
Quadro 4 - Resumo dos principais estudos abordados na revisão de literatura.....	77
Quadro 5 - Parâmetros utilizados na análise de sensibilidade. Fonte: Adaptado de Wanke e Saliby (2009) e Wanke (2009).....	91
Quadro 6 - Distâncias aproximadas entre armazéns e mercados. Fonte: Google Maps (Acesso em 15/07/2008).	92
Quadro 7 - Atribuição dos intervalos de custo de transporte aos intervalos de distância entre armazéns e mercados.	93
Quadro 8 - Custo unitário mínimo de transporte entre armazéns e mercados.....	93
Quadro 9 - Custo unitário máximo de transporte entre armazéns e mercados.	93
Quadro 10 - Descrição das categorias que a política de alocação de estoques pode assumir no estudo.....	94
Quadro 11 - W_{ij} ótimos calculados no Cenário 00001. Eles representam os armazéns abertos e as proporções das demandas dos mercados servidas por eles.	99
Quadro 12 - Níveis ótimos dos estoques de segurança para os armazéns abertos no Cenário 00001.....	99
Quadro 13 - W_{ij} ótimos calculados no Cenário 06482. Eles representam os armazéns abertos e as proporções das demandas dos mercados servidas por eles.	100
Quadro 14 - Níveis ótimos dos estoques de segurança para os armazéns abertos no Cenário 06482.....	100
Quadro 15 - Frequência de ocorrência das políticas em função do número de armazéns na rede e situação dos mercados.	100
Quadro 16 - Frequências da abertura dos cinco diferentes armazéns.	103
Quadro 17 - Situação de cada um dos mercados.	104
Quadro 18 - Resumo das estatísticas descritivas dos custos da rede.	105
Quadro 19 - Testes de Kruskal-Wallis e de Mediana.....	105
Quadro 20 - Caracterização das políticas de alocação de estoques observadas em termos dos parâmetros de entrada do modelo de otimização.....	111
Quadro 21 - Regressão logística tendo como categoria de referência a política mista. Obs.: N.A significa Não Aplicável.....	112
Quadro 22 - Variáveis que têm maior influência na ocorrência da política de centralização total. As variáveis são mostradas em ordem decrescente de importância, de acordo com seus valores da Razão de Vantagens, ou EXP(B).	114
Quadro 23 - Sumário da caracterização das políticas de alocação de estoques em termos dos parâmetros de entrada do problema de localização de armazéns e alocação de estoques.	116

Quadro 24 - Comportamento dos custos da rede em função da política de alocação de estoques observada.....	119
Quadro 25 - Descrição dos parâmetros de entrada usadas no modelo de localização e nas análises de sensibilidade como variáveis primárias.....	158
Quadro 26 - Descrição dos parâmetros de saída obtidas pelo modelo de localização e usadas nas análises de sensibilidade como variáveis primárias.....	160
Quadro 27 - Variáveis secundárias usadas no tratamento estatístico dos resultados das análises de sensibilidade. O identificador <i>Entrada</i> na coluna <i>Fonte</i> indica que a variável secundária foi computada a partir de uma relação entre as variáveis de entrada. Ao contrário, o identificador <i>Saída</i> na coluna <i>Fonte</i> indica que a variável secundária foi computada a partir de uma relação entre as variáveis de saída.....	162

Sumário

1	Introdução.....	13
1.1	A Importância da Decisão de Localização de Instalações.....	14
1.2	A Importância da Decisão de Alocação dos Estoques	16
2	Objetivos da Pesquisa.....	18
3	Revisão da Literatura	19
3.1	Modelos de Gestão de Estoques	19
3.2	<i>Risk Pooling</i> e Políticas de Alocação de Estoques.....	27
3.2.1	Adequação das Políticas de Alocação dos Estoques	32
3.3	Modelos de Localização de Instalações.....	34
3.3.1	Modelos Clássicos de Localização de Instalações que Desconsideram os Custos de Manutenção de Estoques.....	36
3.3.2	Modelos de Localização de Instalações que Consideram Custos de Manutenção de Estoques Simplificados	43
3.3.3	Modelos de Localização de Instalações que Consideram Efeitos de Centralização dos Estoques.....	48
4	Modelo Proposto.....	81
5	Metodologia.....	89
5.1	Implementação do Modelo	89
5.2	Análise de Sensibilidade.....	90
5.3	Apresentação e Tratamento Estatístico dos Resultados da Análise de Sensibilidade	94
6	Análise e Discussão dos Resultados.....	97
6.1	Descrição dos Resultados.....	98
6.2	Testes de Kruskal-Wallis e de Mediana.....	105
6.3	Regressão Logística	111
6.4	Implicações Gerenciais.....	116
7	Conclusões	120
7.1	Limitações	123
7.2	Sugestões para Estudos Futuros	125
8	Referências Bibliográficas	126
	ANEXOS	131

Anexo 1 – Sub-Configurações da Política Mista.....	131
Anexo 2 – Código para a Otimização e Simulação Escrito na Linguagem do Software AIMMS 3.8.....	134
Anexo 3 – Variáveis Utilizadas nas Análises de Sensibilidade e nas Análises Estatísticas.....	158
Anexo 4 – Histogramas para os Componentes de Custo da Rede.....	164

1 Introdução

Uma rede de distribuição pode ser composta por diversos tipos de instalações, como fábricas, armazéns, centros de distribuição, terminais de cargas, lojas, centros de serviços e mercados consumidores, entre outros. O exemplo de uma rede de distribuição genérica é mostrado na Figura 1.

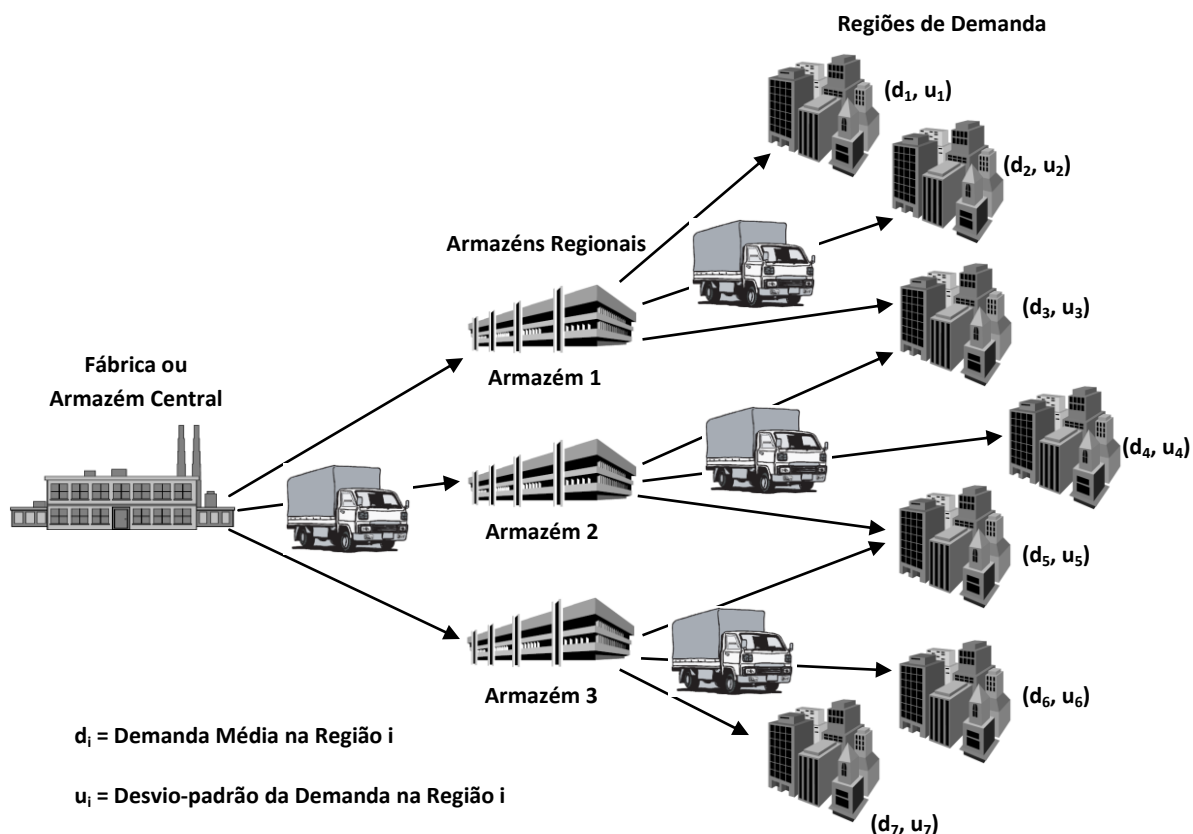


Figura 1 - Exemplo de uma rede de distribuição com três elos. Adaptado de Miranda e Garrido (2004).

Os profissionais de logística devem tomar decisões estratégicas para gerenciar incertezas, serviço ao cliente e custos na rede de distribuição (Wanke e Zinn, 2004). Nesse contexto, a definição da política mais apropriada para o atendimento aos clientes constitui um dos fatores críticos do sucesso de uma empresa, além de ser uma forma de obter vantagens competitivas. Essa política deve ser tal que os custos logísticos sejam minimizados para um determinado nível de serviço ao cliente.

O posicionamento logístico de uma empresa, por sua vez, se refere ao conjunto de decisões integradas ao longo do tempo, que além de apoiar a execução e operacionalização da política de atendimento ao cliente mais apropriada, pode fornecer subsídios relevantes para a elaboração ou reformulação da mesma (Fleury, Wanke e Figueiredo, 2000).

Para a determinação de seu posicionamento logístico, uma empresa deve, então, tomar decisões relativas ao dimensionamento da rede de instalações e à alocação dos estoques nessa rede (Fleury, Wanke e Figueiredo, 2000). O dimensionamento da rede de instalações envolve a determinação do número de instalações, sua localização e quais são os mercados que elas servirão. Já a alocação dos estoques lida com o grau de centralização dos mesmos na rede, ou seja, a quantidade de produtos que devem ser mantidos em cada instalação, dado que determinados mercados são servidos a partir de determinadas instalações.

As seções 1.1 e 1.2 aprofundam, respectivamente, a importância da localização de instalações e da alocação dos estoques em redes logísticas, alicerçando os principais motivadores deste estudo.

1.1 A Importância da Decisão de Localização de Instalações

A localização de instalações na rede de distribuição é um tema de extrema importância para os profissionais de logística, já que constitui uma das principais questões de planejamento estratégico logístico para muitas empresas (Ballou, 2004). Esse tipo de decisão envolve altos investimentos e tem profundos impactos no custo total da rede de distribuição (Lacerda, 2000), uma vez que tal decisão é o fator que determina as condições para o gerenciamento de transportes e do nível de estoques na rede. Ballou (2001) defende ainda que a reconfiguração das instalações de uma cadeia de suprimentos pode levar a reduções de custo que variam de 5 a 15%, ao mesmo tempo em que o nível de serviço é mantido ou melhorado. Além disso, a relevância do tema é corroborada pela literatura, como se pode verificar a partir dos trabalhos Brandeau e Chiu (1989), Geoffrion e Powers (1995) e Owen e Daskin (1998).

Ballou (2004) ressalta que os problemas de localização de instalações se enquadram em um número limitado de categorias, abrangendo as seguintes possibilidades:

- Determinação dos fatores preponderantes, ou seja, se há um fator mais crítico que todos outros, como o lucro de uma determinada região ou acessibilidade mais fácil para transportes;
- Determinação do número de instalações a serem abertas;
- Determinação das possíveis localidades, ou seja, se há locais predeterminados para a localização ou se o método de cálculo determinará a melhor localidade a partir de uma região em um plano/espço;
- Escolha do grau de agregação dos dados;
- Escolha do horizonte de tempo.

Tipicamente, os problemas de localização apresentam alta complexidade e são intensivos no uso de base de dados. Isso ocorre porque as variáveis dos problemas se influenciam mutuamente, gerando *trade-offs*, e o número de alternativas a serem analisadas é muito grande, mesmo para problemas de pequeno porte (Lacerda, 2000). Estão envolvidos nos problemas vários produtos e mercados consumidores, diversas possibilidades para abertura das instalações, diferentes modais de transporte e diferentes políticas de estoque para cada instalação. De forma geral, tais problemas têm como objetivo a minimização do custo total da rede para um dado intervalo de tempo e são sujeitos à restrição de capacidade das instalações, devendo atender determinada demanda e satisfazer certos níveis de serviço (Lacerda, 2000). O custo total é normalmente composto pelos custos fixos das instalações, custo de transporte e custo de oportunidade de manter estoques. O comportamento esperado desses custos, em função do número de armazéns na rede de distribuição, é mostrado na Figura 2. Os estudos de localização se propõem, então, a responder especificamente perguntas do tipo:

- Quantas instalações localizar?
- Onde localizar as instalações?
- Quais produtos e mercados alocar a uma instalação?
- Qual o nível de estoque, de ciclo e de segurança, deve ser mantido em cada instalação?
- Quais clientes, mercados ou outras instalações servir a partir de uma instalação selecionada?
- Que modalidade de transporte utilizar para suprimento ou distribuição?

Ballou (2004) traz um descritivo dos métodos matemáticos normalmente utilizados na resolução dos problemas de localização, que podem utilizar programação linear inteira-mista, programação não-linear, métodos heurísticos ou simulações numéricas.

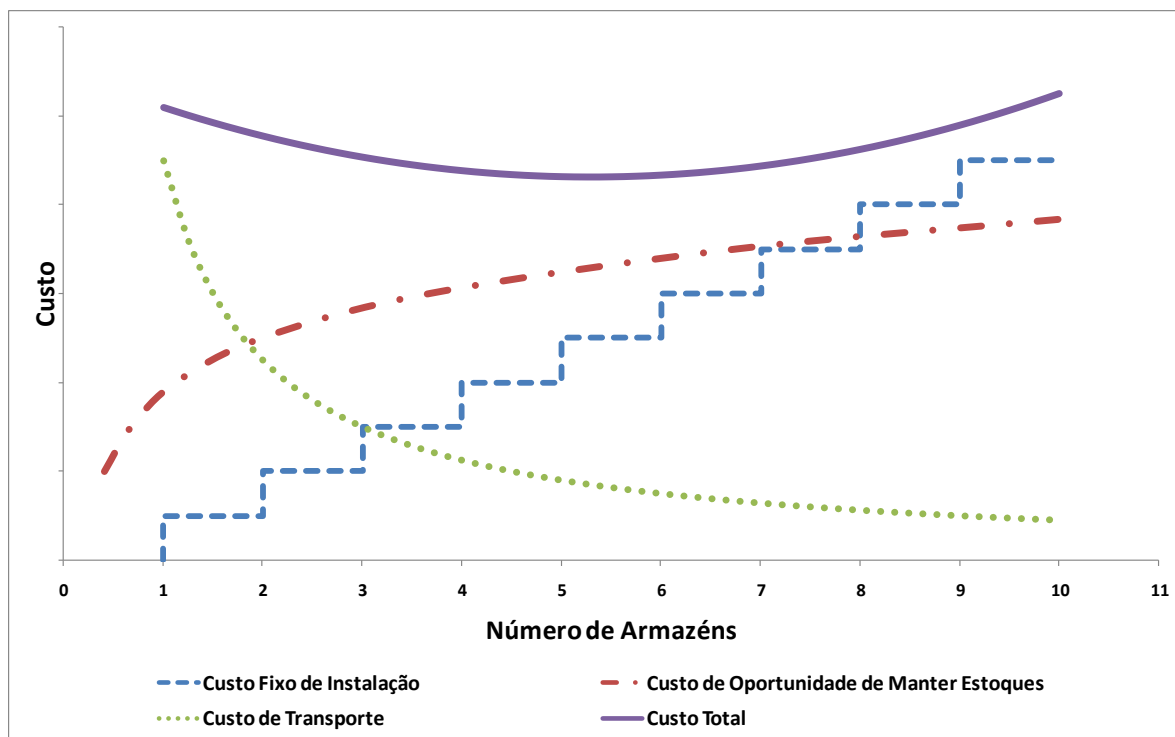


Figura 2 - Comportamento dos custos da rede de distribuição em função do número de armazéns. Adaptado de Figueiredo, Fleury e Wanke (2003).

Apesar de existirem diversos tipos de instalações que podem ser tratados nos problemas de localização, Ballou (2001) ressalta que os armazéns são os mais importantes e que aparecem com maior frequência nas decisões que devem ser tomadas pelos gerentes de logística. Dessa maneira, a presente pesquisa se concentrará nas questões relativas à localização de armazéns.

1.2 A Importância da Decisão de Alocação dos Estoques

A alocação dos estoques lida, como citado anteriormente, com o grau de centralização dos mesmos na rede, traduzido pela quantidade de produtos que devem ser mantidos em cada instalação, dado que um determinado conjunto de mercados é atendido a partir da mesma. Por exemplo, uma rede de distribuição que apresenta um elevado grau de descentralização de estoques é composta naturalmente por um maior número de armazéns e pode ter, no limite, um armazém dedicado a cada mercado consumidor. Ao contrário, uma rede que apresenta um alto grau de centralização de estoques é composta por um menor número de armazéns, tendo

no limite somente um armazém para atender todos os mercados. Dessa maneira, como pode ser visto na Figura 2, espera-se que uma rede com um alto grau de descentralização (mais armazéns) apresente um maior custo total de manutenção de estoques do que uma rede com alto grau de centralização (menos armazéns).

Os estudos seminais de Maister (1976) e Zinn et al. (1989) mostraram, por meio da regra da raiz quadrada, que a centralização pode reduzir o nível de estoques de segurança da rede, reduzindo o custo total de manutenção de estoques. Mahmoud (1992) defende que substanciais economias de escala resultam da consolidação dos estoques de segurança sempre que os mesmos são centralizados. Das e Tyagi (1997) afirmam que a centralização dos estoques gera economias no que diz respeito ao transporte de suprimento, pois há maior consolidação do frete das fábricas para os armazéns.

Assim, pode-se notar que o grau de centralização dos estoques tem uma influência importante no custo total da rede. Entretanto, Wanke (2001) destaca que a maior parte dos modelos matemáticos existentes para a localização de armazéns falha ao não incluir os custos com estoques como um componente de sua função objetivo. Croxton e Zinn (2005) sustentam que a inclusão dos estoques nos modelos de localização de armazéns é tida como necessária na literatura. Das e Tyagi (1997) defendem que as questões de um problema de localização de armazéns somente serão corretamente respondidas se o modelo levar em conta os custos de estoque, tanto de ciclo quanto de segurança. Miranda e Garrido (2004) afirmam que questões como a política de estoques não podem ser negligenciadas nas decisões estratégicas de localização de armazéns.

A presente pesquisa trata, então, do dimensionamento da rede de distribuição e do grau de centralização dos estoques na mesma, em função da importância estratégica dos dois assuntos para o gerenciamento da cadeia de suprimentos. Num primeiro momento foi desenvolvido um modelo de localização de instalações e alocação de estoques que permite determinar a configuração da rede para a qual o custo total é mínimo, considerando simultaneamente os estoques de ciclo e de segurança através da incorporação do Efeito de Consolidação (Evers, 1995) a um problema de localização. Mais precisamente, a abordagem utilizada na pesquisa para a gestão dos estoques assume que os mesmos são determinados a partir dos modelos do Lote Econômico de Compra (*LEC*) e Ponto de Pedido (*PP*). São levadas em conta como variáveis de entrada, além de outros componentes, as demandas dos mercados com correlações e desvios-padrão diferentes de zero e os *lead-times* de ressuprimento dos armazéns com

desvios-padrão também diferentes de zero. Diferentemente de outros trabalhos, não é assumida no modelo proposto a premissa de que cada mercado é servido por um único armazém. Ao contrário, é permitido que um mercado seja servido por mais de um armazém, prática conhecida como *cross-filling* ou transferência regular.

Num segundo momento foi conduzida uma análise de sensibilidade, onde foram gerados diferentes cenários aleatórios para demandas, *lead-times*, custos de ressuprimento, custos de distribuição, custos de colocação de pedidos e custos de manutenção de estoques. Na seqüência, cada um desses cenários foi otimizado. Os objetivos principais da análise de sensibilidade foram a identificação de diferentes grupos de resposta (ou de políticas de localização dos armazéns e alocação de estoques), a caracterização dos mesmos em termos dos parâmetros de entrada do problema e dos componentes de custo da rede, além da determinação dos parâmetros de entrada mais importantes para a determinação dessas políticas.

A pesquisa está organizada em 7 seções. Na seção 1 é feita uma introdução ao tema abordado. A seção 2, por sua vez, traz os objetivos da pesquisa. Já na seção 3 é apresentada a revisão da literatura. Em seguida, na seção 4 é apresentado o modelo de localização de instalações e alocação de estoques formulado na pesquisa. A metodologia utilizada na pesquisa é discutida na seção 5. Já a seção 6 apresenta os resultados obtidos nas análises de sensibilidade. Finalmente, as conclusões da pesquisa são mostradas na seção 7.

2 Objetivos da Pesquisa

O objetivo geral da pesquisa é desenvolver um possível modelo de localização de armazéns, tomando como ponto de partida a formulação de Evers (1995) para o Efeito de Consolidação dos Estoques.

Espera-se com esse modelo contribuir não apenas para o entendimento de como a incorporação dos estoques de ciclo e de segurança afeta a decisão de localizar um ou mais armazéns, mas também lançar luz sobre importantes questões relacionadas às políticas de alocação dos estoques. A idéia básica é permitir um melhor entendimento gerencial sobre quais políticas são mais adequadas a um determinado conjunto de características do produto, da operação e da demanda. Para tanto, uma análise de sensibilidade por meio da geração de

parâmetros de entrada aleatórios e a subsequente otimização dos diferentes cenários constituem a abordagem essencial para se atingirem os objetivos específicos dessa pesquisa, traduzidos em oito questões fundamentais:

- a. Quantos armazéns devem ser abertos na rede?
- b. Quais são as suas localizações?
- c. Quais mercados, e em qual proporção, devem ser alocados a um determinado armazém?
- d. Quais são os níveis ótimos de estoque de ciclo e de segurança em cada armazém?
- e. Quais são as frequências de ocorrência de cada uma das políticas de alocação de estoques?
- f. Como são caracterizadas as políticas de alocações de estoques em termos dos parâmetros utilizados na análise de sensibilidade?
- g. Qual é o impacto de cada uma das políticas no custo total da rede e nos seus principais componentes?
- h. Quais são as variáveis de entrada que possuem maior importância na ocorrência dessas políticas?

3 Revisão da Literatura

A presente seção aborda a revisão de literatura pertinente ao problema estudado. Ela está dividida em 3 subseções. São apresentados, primeiramente, modelos de gestão de estoque. Em seguida, são discutidas técnicas de *risk pooling*, juntamente com a relação entre essas e políticas de alocação de estoques. Por fim, é trazida uma evolução cronológica dos modelos de localização de instalações, abordando também como os mesmos tratam a questão dos estoques na rede de distribuição. A seção 3 tem, assim, o objetivo de propiciar ao leitor o embasamento teórico da pesquisa desenvolvida nesta dissertação.

3.1 Modelos de Gestão de Estoques

De acordo com Wanke (2008), os modelos de gestão de estoques são delimitados pelas ações de reagir ou planejar a demanda e de antecipar ou postergar a movimentação da quantidade de produtos numa rede de distribuição.

A reação à demanda é caracterizada pela produção de uma quantidade de produtos em função da informação da demanda (real) que se possui. O planejamento da demanda, por sua vez, é caracterizado pela produção de uma quantidade de produtos a partir de previsões de venda. Vale ressaltar que o termo *puxar* é frequentemente utilizado para descrever políticas de gestão de estoques nos quais se reage à demanda. Já o termo *empurrar* é utilizado para descrever políticas onde se planeja com base na previsão de vendas (Wanke, 2008).

A antecipação é caracterizada pela movimentação de quantidades desvinculadas das necessidades reais e iguais ou desvinculadas das necessidades estimadas. Já a postergação é caracterizada pela movimentação de quantidades iguais às necessidades reais e só é possível pela reação à demanda (Wanke, 2008). O Quadro 1 ilustra como as ações de planejar/reagir e antecipar/postergar restringem os modelos de gestão de estoques.

Quadro 1 - Influência das ações de planejar/reagir e antecipar/postergar na restrição dos modelos de gestão de estoques. Fonte: Wanke (2008).

	Antecipar	Postergar
Reagir (puxar)	Produção e Distribuição: Lote Econômico de Compra (<i>LEC</i>) e Ponto de Pedido (<i>PP</i>) ou Nível de reposição (<i>NR</i>) e Intervalo de Revisão (<i>IR</i>).	Produção: <i>Just in Time (JIT)</i> ; Distribuição: Centralização dos estoques.
Planejar (empurrar)	Produção: <i>Materials Requirements Planning (MRP)</i> ; Distribuição: <i>Distribution Requirements Planning (DRP)</i> .	Não existe.

Dentre os modelos mostrados no Quadro 1, um dos primeiros a ser desenvolvido foi o *LEC*. Segundo Ballou (2005), ele foi concebido em 1913 por Ford Harris (Harris, 1913), quando este trabalhava na *Westinghouse*, em sua tentativa de otimizar os níveis de estoque no caso em que a demanda é contínua e perpétua. Posteriormente, o *LEC* se tornou parte integrante do modelo de ponto de pedido (*PP*), sendo que as demandas e os *lead-times* de ressurgimento passaram a ser probabilísticos.

Apesar de suas limitações, os modelos que consideram o *LEC* são as bases de vários *softwares* para gestão de estoques (Lee e Nahmias, 1993). Em essência, o *LEC* é o mais simples e fundamental dos modelos de gestão de estoques, mas descreve os importantes *trade-offs* entre os custos de manutenção dos estoques e os custos de colocação de pedidos (Nahmias, 2001).

No modelo *LEC* e *PP*, o nível dos estoques ao longo do tempo é representado por um gráfico “dente-de-serra”, como mostrado na Figura 3.

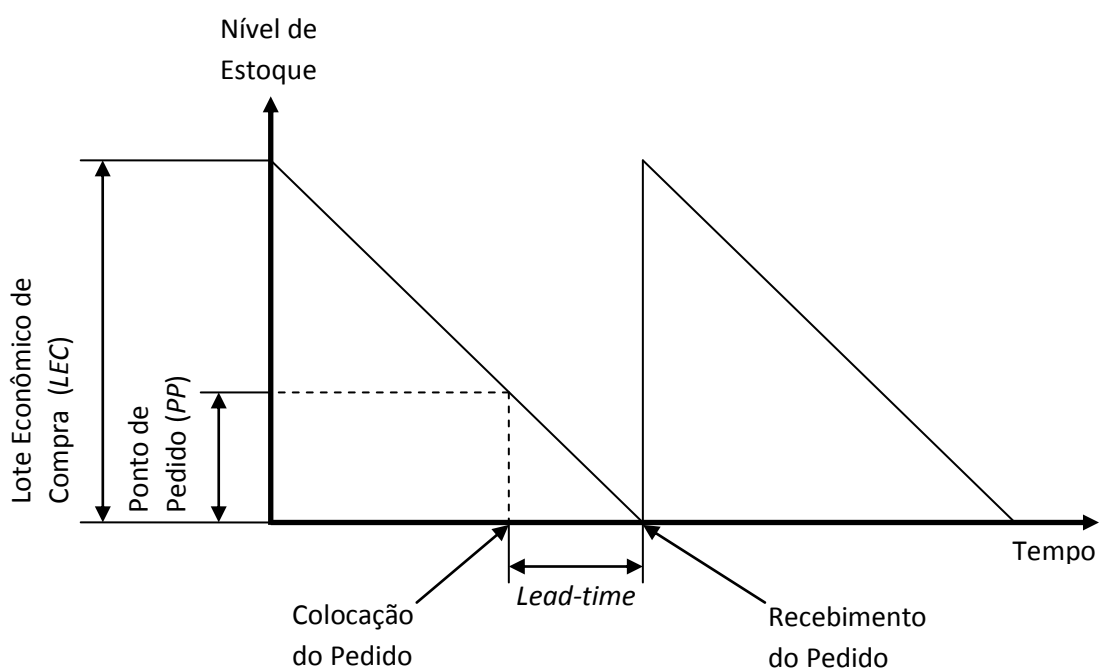


Figura 3 - Representação do lote econômico de compra (*LEC*) e do ponto de pedido (*PP*) em um gráfico dente de serra. Adaptado de Wanke (2008).

O *LEC* caracterizaria os estoques de ciclo, ou seja, aqueles que são utilizados para se atender a demanda propriamente dita, sem levar em conta as variações que a mesma pode apresentar durante o *lead-time*. Na sua determinação, é utilizado o conceito de minimização dos custos totais. Quando se considera a demanda constante, o custo total engloba os custos de colocação dos pedidos (de compra ou distribuição) e os custos de manutenção de estoques. Dessa maneira, a equação do custo total é tal que:

$$CT = EM \times C + NP \times A, \quad (2.1)$$

onde:

CT é o custo total dos estoques,

EM é o estoque de ciclo médio mantido no armazém no período estudado,

C é o custo unitário de manutenção dos estoques,

NP é o número de pedidos de ressurgimento feitos no período estudado,

A é o custo unitário do pedido de ressurgimento.

Analisando-se a Figura 3, nota-se que o número de pedidos de ressurgimento no intervalo de tempo estudado pode ser dado por:

$$NP = \frac{D}{Q}, \quad (2.2)$$

onde:

D é a demanda no período estudado,

Q é o tamanho do lote de compra.

Uma forma simples de se calcular o estoque médio é dada por:

$$EM = \frac{Q}{2}, \quad (2.3)$$

Substituindo-se as equações (2.2) e (2.3) na equação (2.1) tem-se que:

$$CT = \frac{Q}{2} \times C + \frac{D}{Q} \times A, \quad (2.4)$$

O *LEC* é o lote que minimiza *CT*. Para se encontrar o *LEC*, deriva-se *CT* em relação a *Q* e iguale-se a fórmula obtida a zero. Dessa maneira, o *LEC* é dado por:

$$LEC = \sqrt{\frac{2 \times D \times A}{C}}, \quad (2.5)$$

Substituindo-se a equação (2.5) na equação (2.4) se obtém a equação do custo total mínimo para o *LEC*, dada por:

$$CT = \sqrt{2 \times D \times C \times A}. \quad (2.6)$$

O ponto de pedido (*PP*), por sua vez, é o momento no qual se deve pedir um ressuprimento. Num mundo sem incertezas, a taxa de consumo média dos produtos é totalmente previsível e é dada por *D*. Assim, sabe-se com precisão o momento no qual o nível de estoques chegará a zero, que caracteriza o momento do reabastecimento (Wanke, 2008). Na prática, determinar esse momento implica agendar o recebimento de um novo *LEC*. Para isso, considera-se o *lead-time* (*LT*) desde a colocação do pedido até o reabastecimento. *PP* é tão somente o momento de pedir traduzido em termos do nível de estoques (em unidades). Matematicamente, a maneira de calcular *PP* é dada pela equação (2.7):

$$PP = D \times LT, \quad (2.7)$$

Onde:

LT é o *lead-time* de ressuprimento.

Entretanto, as incertezas da demanda dos consumidores e do suprimento de produtos por parte de fornecedores, fábricas ou outros canais, requerem que seja mantido um estoque adicional para os produtos armazenados (Tallon, 1993), de modo a se obter uma proteção quanto à probabilidade de um *stock-out* (falta de produto). Essa proteção é atingida pela manutenção do estoque de segurança (*ES*), que significa, na prática, aumentar *PP* de modo a antecipar a colocação do pedido para evitar a falta de estoques no futuro (Wanke, 2008). Com a adição do *ES*, o novo ponto de pedido *PP'* passa a ser definido matematicamente como mostra a equação (2.8):

$$PP' = D \times LT + ES. \quad (2.8)$$

De acordo com Wanke (2008), o ponto de partida para o cálculo dos estoques de segurança é a determinação da probabilidade de não faltar produto, ou seja, a probabilidade de não ocorrência de um *stock-out*. Baseando-se nessa probabilidade, é possível calcular *ES* e

adicioná-lo a PP . A determinação de ES deve considerar, dessa maneira, a variabilidade (desvio-padrão) da demanda durante o *lead-time* e a distribuição de probabilidade da demanda durante o *lead-time*.

Bowersox e Closs (2001) defendem que, para serem calculados a probabilidade de não faltar produto e os estoques de segurança, é necessário determinar a distribuição de freqüências da demanda durante o *lead-time* e, em seguida, verificar a aderência desta a uma distribuição de probabilidades. Wanke (2008) afirma que a demanda durante o *lead-time* é freqüentemente considerada aderente à distribuição normal. Essa distribuição é descrita por Bowersox e Closs (2001) como a mais simples dentre as utilizadas para fins de controle de estoques.

Ao se considerar, então, a demanda durante o *lead-time* aderente à distribuição normal, pode-se determinar facilmente a probabilidade de não faltar produto. Ela é a densidade acumulada (área abaixo da curva) da distribuição normal até o limite estabelecido por PP' , como mostra a Figura 4.

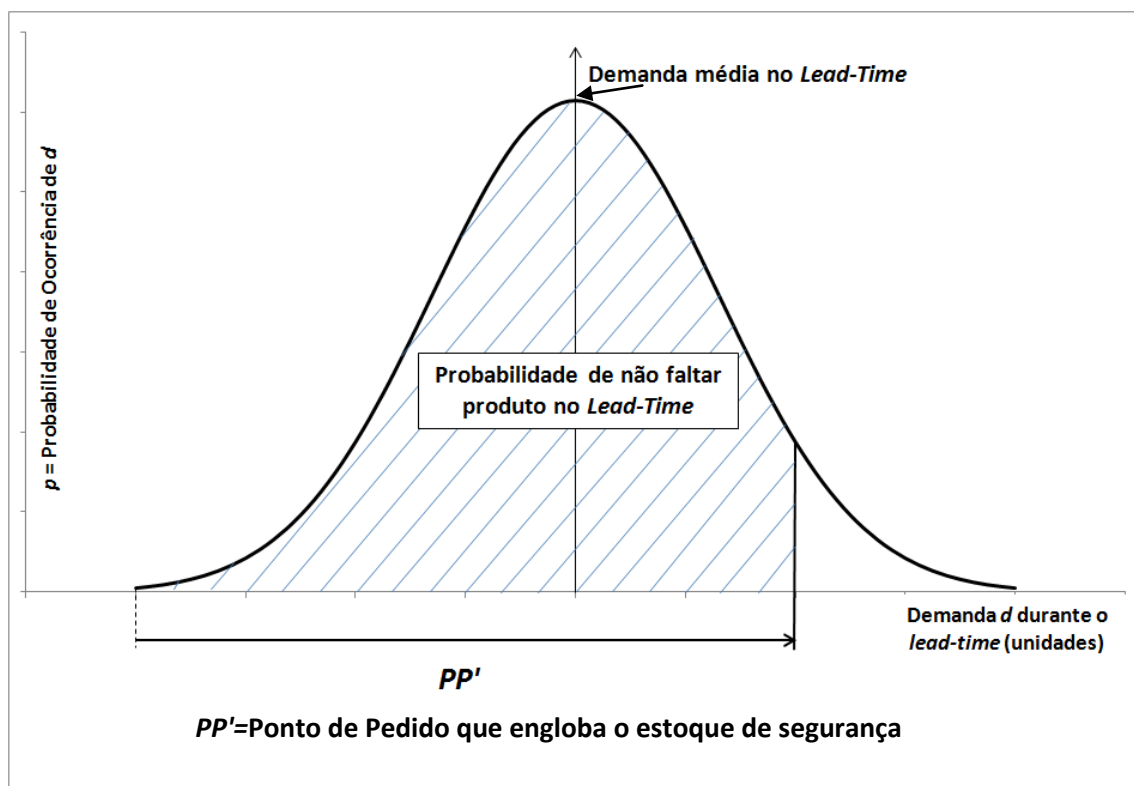


Figura 4 - Probabilidade de ocorrência da demanda durante o *lead-time*, aderente à distribuição normal. Adaptado de Wanke (2008).

Adotar a premissa de que a demanda durante o *lead-time* é aderente à distribuição normal e assumir que D e LT são duas variáveis aleatórias independentes torna factível a determinação da média e do desvio-padrão da demanda durante o *lead-time* (Wanke, 2008). A média é o próprio ponto de pedido PP . Já o desvio-padrão da demanda durante o *lead-time* (σ_a) é dado, de acordo com Bowersox e Closs (2001), pela equação (2.9):

$$\sigma_a = \sqrt{LT \times \sigma_D^2 + D^2 \times \sigma_{LT}^2}, \quad (2.9)$$

onde:

LT é o *lead-time* de ressuprimento,

D é a demanda no período estudado,

σ_D é o desvio-padrão da demanda no período estudado,

σ_{LT} é o desvio-padrão do *lead-time* de ressuprimento.

Uma vez que o ponto de pedido PP é a média da demanda no *lead-time*, ao se somar ES a PP para se calcular o novo ponto de pedido PP' , adiciona-se determinada quantidade k de desvios-padrão da demanda durante o *lead-time* a PP . O estoque de segurança ES pode ser definido, segundo Tallon (1993), de acordo com a equação (2.10):

$$ES = k \times \sigma_a, \quad (2.10)$$

onde:

k = fator de segurança que reflete o nível de proteção em relação aos *stock-outs*, ou seja, o nível de serviço,

σ_a = desvio-padrão da demanda durante o *lead-time*.

Estatisticamente, quanto se mantém um estoque durante o *lead-time* igual a PP , há uma probabilidade de 50% de não acontecer um *stock-out*, uma vez que PP é a própria média da demanda durante o *lead-time* e que a distribuição de probabilidades de tal variável é considerada aderente à distribuição normal. Ao se aumentar o estoque durante o *lead-time*, somando-se $k \times \sigma_a$ a PP , aumenta-se a probabilidade de não haver um *stock-out* (Wanke, 2008). Isso é ilustrado graficamente na Figura 5.

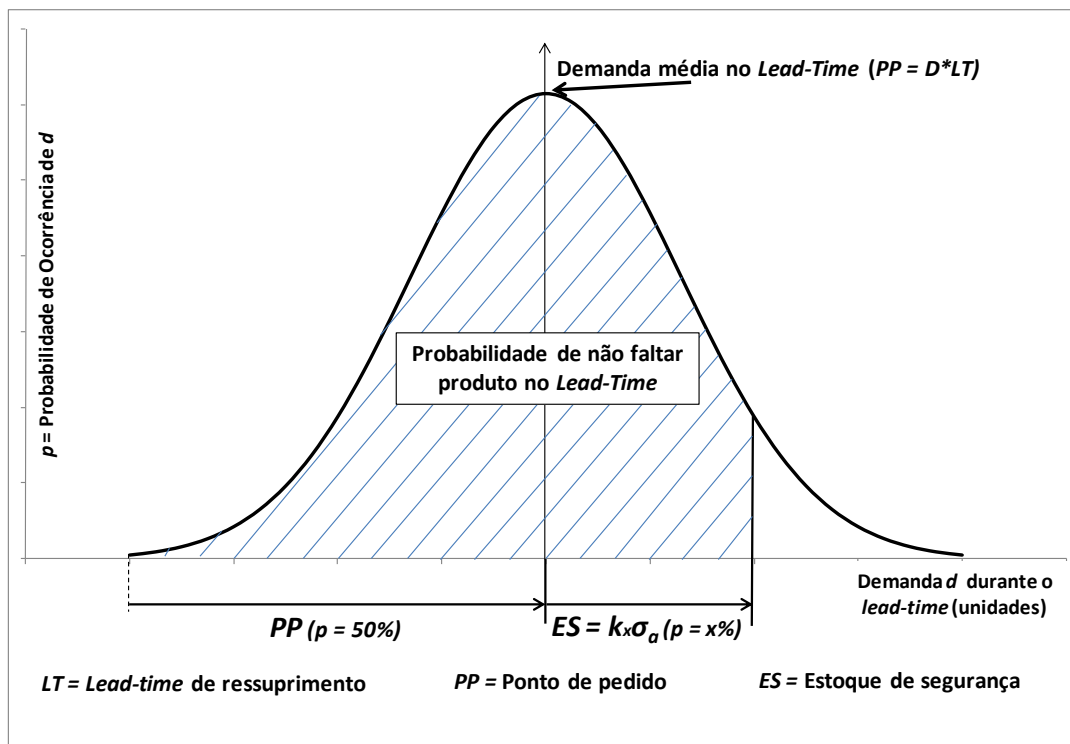


Figura 5 - Efeito da adição de ES a PP na determinação da probabilidade de não faltar produto durante o *lead-time*. Adaptado de Wanke (2008).

O ponto de interesse, no que diz respeito ao nível de serviço que se deseja prestar aos clientes, é a probabilidade de não faltar produto durante o *lead-time*, garantida pela adição de uma determinada quantidade k de desvios-padrão da demanda durante o *lead-time* a PP . Uma vez que a demanda durante o *lead-time* é considerada aderente à distribuição normal, é possível se determinar a relação entre os valores de k e a probabilidade de não faltar produto (Wanke, 2008), como mostra o Quadro 2.

Quadro 2 - Probabilidade de não faltar produto em estoque em função de valores selecionados de k , supondo a demanda no *lead-time* aderente à distribuição normal. Adaptado de Wanke (2008).

Probabilidade de não faltar produto	K
50%	0,00
60%	0,25
70%	0,53
80%	0,84
85%	1,04
90%	1,28
95%	1,65
98%	2,06

Probabilidade de não faltar produto	<i>K</i>
99%	2,33
99,99%	3,62

3.2 *Risk Pooling* e Políticas de Alocação de Estoques

Na visão de Jorge (2008), dentre as diversas decisões diretamente ligadas à alocação dos estoques, somente aquelas pertencentes ao conjunto das estratégias de *risk pooling* podem ser consideradas realmente impactantes no planejamento de redes de distribuição. Ainda segundo o autor, a bibliografia sobre *risk pooling* pode ser dividida em quatro grupos de assuntos mais específicos: a centralização dos estoques, a análise de múltiplas fontes de fornecimento, a transferência de estoques entre centros de distribuição e a padronização de componentes ou peças para produção ou reposição. Essa última não será abordada, já que não está dentro do escopo do presente estudo.

A centralização dos estoques (também conhecida como consolidação dos estoques, *inventory pooling*, *demand pooling*, *portfolio effect*, *consolidation effect* e *virtual inventory management*) tem sido estudada na literatura há bastante tempo, de acordo com Ballou e Burnetas (2003). A finalidade desta técnica de *risk pooling* é a mitigação do risco decorrente das flutuações de demanda de consumidores separados geográfica ou mercadologicamente, em se compartilhando uma unidade de distribuição na rede. Fisicamente, a centralização dos estoques consiste na consolidação dos mesmos em um número limitado de localidades (freqüentemente um única instalação), a partir das quais as todas as demandas são atendidas. A centralização dos estoques de segurança será melhor abordada na seção 3.3.3.1, através da apresentação dos trabalhos de Maister (1976); Zinn, Levy e Bowersox (1989); Mahmoud (1992); Evers e Beier (1993); Tallon (1993); Evers e Beier (1998); e Tyagi e Das (1998). Já a centralização de ambos os estoques de ciclo e segurança será explorada na seção 3.3.3.2, pela apresentação dos trabalhos de Evers (1995) e Wanke (2009).

A análise de múltiplas fontes de fornecimento (*order splitting*) tem por objetivo mitigar os riscos relacionados às variações aleatórias no *lead-time* de ressuprimento (Jorge, 2008). De acordo com Evers (1999), *order splitting* ocorre quando uma instalação que mantém estoques opera independentemente das outras ao gerenciar seu ressuprimento, dividindo, para isso, seus pedidos de ressuprimento (não necessariamente de maneira uniforme) entre múltiplos

fornecedores. Segundo Thomas e Tyworth (2006), a literatura sobre *order splitting* tratou majoritariamente cenários de elo único empregando sistemas de revisão contínua que lidavam com um único produto. Entretanto, na visão dos autores, uma importante parcela da teoria criada se desenvolveu à margem da realidade e se distanciou dela, gerando lacunas e, algumas vezes, até mesmo inconsistências. A principal crítica de Thomas e Tyworth (2006) é a ausência de um tratamento adequado para as economias de escala existentes em transportes. Os autores destacam que o custo de transporte tem sido abordado de maneira agregada como parte do custo de colocação de pedidos, existindo poucos trabalhos que são exceção a essa regra. A técnica de *order splitting*, no entanto, está fora do escopo do presente trabalho e não será doravante abordada.

A transferência de estoques de um centro de distribuição para uma região de mercado atendida por outro centro de distribuição, prática conhecida como transferências regulares, *transshipments* ou *cross-filling*, é a terceira e última técnica de *risk pooling* abordada nesta seção. De acordo com Ballou e Burnetas (2003), muitos estudos têm sido realizados sobre os efeitos do *cross-filling* nos níveis agregados de estoques de segurança. Entretanto, ainda segundo os autores, é também importante que sejam determinados os efeitos do *cross-filling* quando são considerados simultaneamente os estoques de ciclo e segurança nos problemas de localização de instalações e alocação de estoques.

A ausência total de *risk pooling* também pode ser utilizada para tratar as questões relacionadas a estoques na rede de distribuição. Essa situação se caracteriza pela dedicação exclusiva de um armazém a um único mercado (Wanke e Saliby, 2009). Quando isso ocorre, os sistemas são ditos independentes.

Em decorrência das técnicas mostradas para se promover o *risk pooling*, ou da ausência delas, podem-se definir diferentes políticas de alocação de estoques, ou de agrupamento das demandas nos armazéns de uma rede de distribuição. Wanke e Saliby (2009) destacam três principais políticas. A primeira é a centralização total dos estoques em um único armazém. Essa política é ilustrada esquematicamente na Figura 6 para uma situação particular com dois armazéns e dois mercados. Nela, as demandas de todos os mercados consumidores são alocadas a um único armazém.

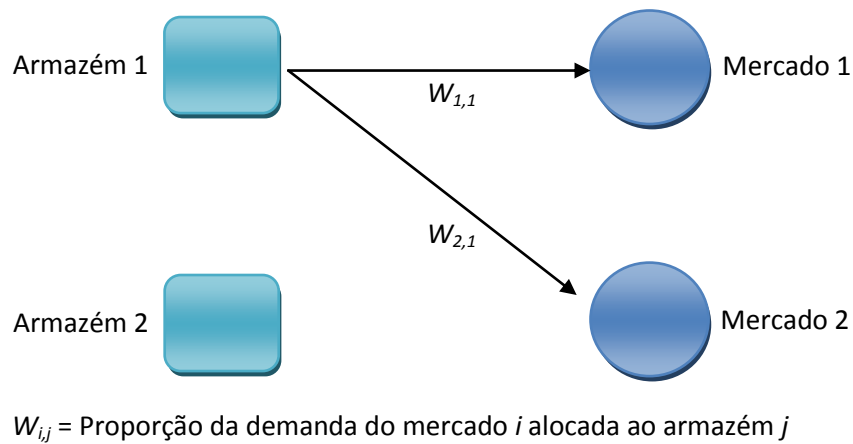


Figura 6 - Centralização total de estoques para o caso particular com dois armazéns e dois mercados. Adaptado de Wanke e Saliby (2009).

A segunda política destacada por Wanke e Saliby (2009) é a dos sistemas independentes, caracterizada pela dedicação total dos armazéns aos mercados e ausência total de *risk pooling*. Em outras palavras, cada mercado é atendido exclusivamente por um único armazém. A política de sistemas independentes é ilustrada na Figura 7 para o caso particular com dois armazéns e dois mercados.

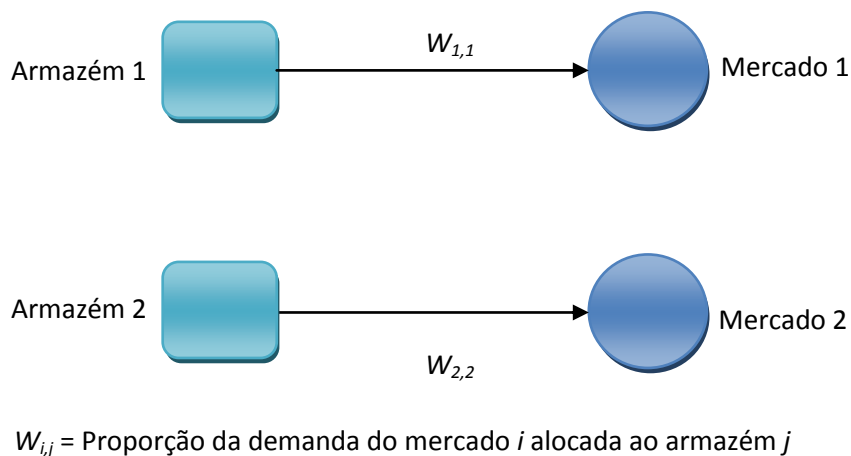
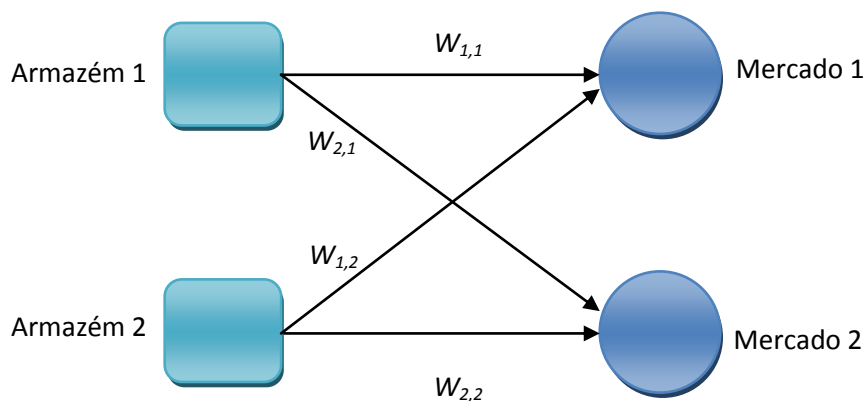


Figura 7 - Sistemas independentes para o caso particular com dois armazéns e dois mercados. Adaptado de Wanke e Saliby (2009).

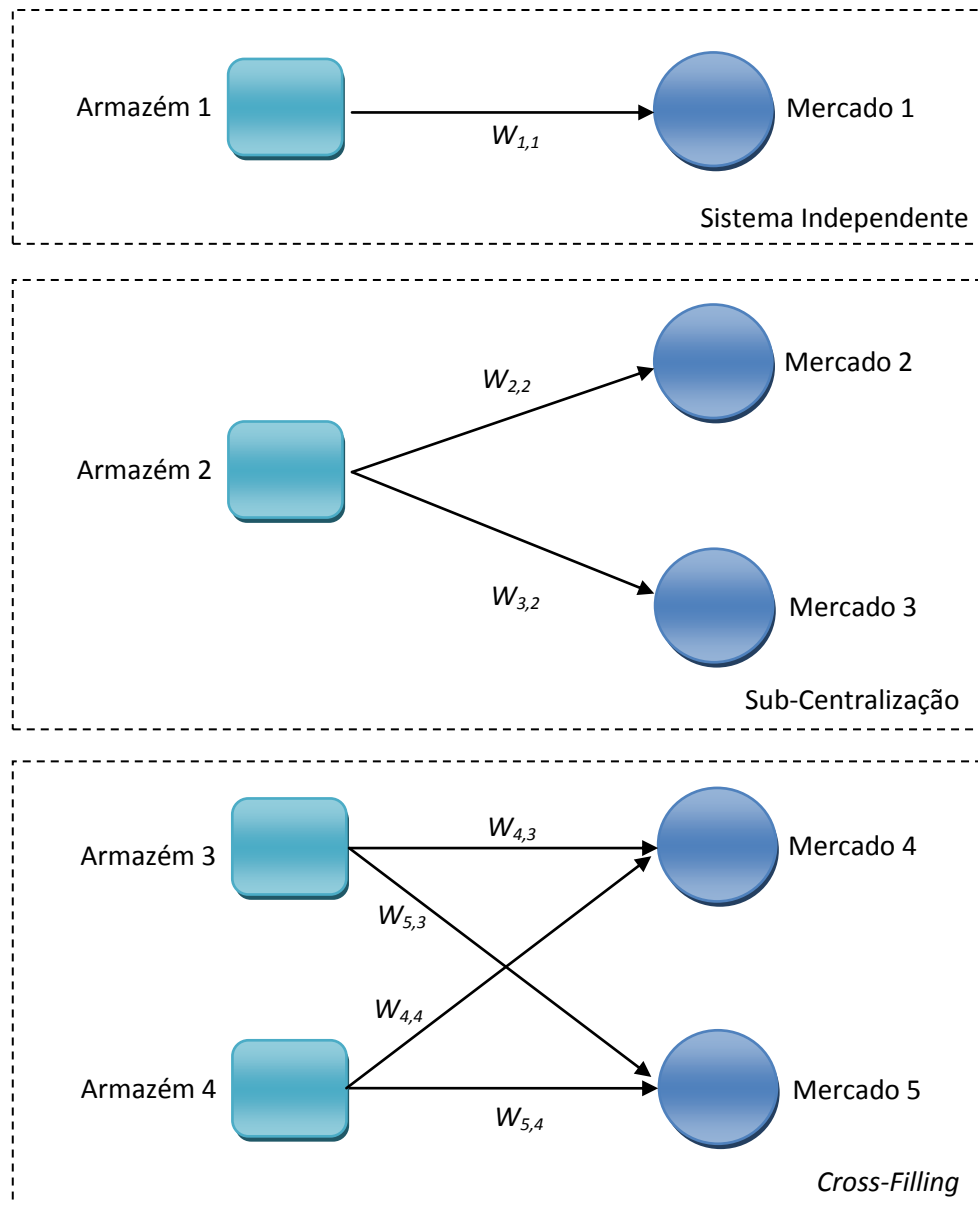
A terceira política é de transferências regulares ou *cross-filling* total (Ballou e Burnetas, 2003). Nessa política todos os mercados são servidos por todos os armazéns presentes na rede. Ela é ilustrada na Figura 8 para o caso particular com dois armazéns e dois mercados.



W_{ij} = Proporção da demanda do mercado i alocada ao armazém j

Figura 8 - Transferências regulares, ou *cross-filling* total, para o caso particular com dois armazéns e dois mercados. Adaptado de Wanke e Saliby (2009).

Há ainda uma quarta política, que compreende a ocorrência de duas, ou de todas, as políticas citadas anteriormente em partes da rede. Ela é doravante chamada de política mista e está ilustrada na Figura 9 para o caso particular de uma rede maior, composta por quatro armazéns e cinco mercados. Percebe-se que em redes maiores várias políticas de alocação podem ocorrer simultaneamente, caracterizando uma situação mista. Uma melhor descrição das sub-configurações que a política mista pode assumir é mostrada no anexo 1.



W_{ij} = Proporção da demanda do mercado i alocada ao armazém j

Figura 9 - Rede de distribuição composta por quatro armazéns e cinco mercados, caracterizada pela presença da política mista de alocação de estoques.

Na seção a seguir, a adequabilidade das diferentes políticas de alocação dos estoques às diversas características do produto, da operação e das demandas é discutida. A partir da seção 3.3 é mostrado que muitas vezes essas políticas podem tanto assumir o papel de premissas básicas dos modelos de localização quanto constituírem resultados subjacentes à otimização da rede de distribuição.

3.2.1 Adequação das Políticas de Alocação dos Estoques

Vários modelos de controle de estoque do tipo puxado, sendo o *LEC* e o *PP* os exemplos clássicos, consideram a premissa de que cada mercado da rede é servido por um único armazém. Esse único armazém é denominado armazém de alocação primária (Ballou e Burnetas, 2003). Diversos modelos de localização de armazéns também assumem a mesma premissa (veja-se, por exemplo, Das e Tyagi, 1997; Miranda e Garrido, 2004; Silva, 2006).

Contudo, na prática, quando a quantidade de produtos presente em um armazém de alocação primária não é suficiente para atender a um mercado (e nesse momento ocorre um *stock-out*), é comum que as empresas transfiram mercadorias de outro armazém (de alocação secundária), no intuito de garantir que os consumidores serão servidos. Essa prática caracteriza o *cross-filling*, segundo Ballou e Burnetas (2003).

Os próprios autores trataram o tema, analisando os efeitos do *cross-filling* em uma rede com dois armazéns e dois mercados, sugerindo ao final do trabalho os tipos de produtos mais adequados a essa política e uma metodologia para identificá-los. Ballou e Burnetas (2003) concluíram que ao se adotar a política do *cross-filling* há a oportunidade de se diminuir a quantidade total de estoque na rede, mas a utilização de tal política depende dos seus efeitos antagônicos nos estoques de ciclo e de segurança. Se por um lado, o *cross-filling* faz com que os estoques de ciclo aumentem, por outro ele faz com que os estoques de segurança diminuam, quando comparados ao caso onde todas as demandas estão centralizadas em um único armazém, tendo impacto direto no custo total da rede.

Wanke e Saliby (2009) também abordaram a questão do *cross-filling* no problema de alocação de estoques em uma rede composta por dois armazéns e dois mercados. Nesse estudo, os autores relacionaram as políticas apresentadas na seção anterior com diferentes características da demanda dos mercados, do *lead-time* de ressuprimento dos armazéns e dos custos de manutenção de estoques. Além disso, os autores realizaram análises de sensibilidade através de geração de valores aleatórios para esses parâmetros, com o intuito de determinar em quais casos uma política era mais adequada no que diz respeito aos custos totais da rede e ao nível de serviço. As conclusões de Wanke e Saliby (2009) são mostradas no Quadro 3.

Quadro 3 - Adequação das políticas de alocação de estoques a diferentes características de demanda dos mercados, do *lead-time* de ressuprimento e dos custos de manutenção de estoques. Adaptado de Wanke e Saliby (2009).

Decisão principal	Os estoques devem ser agrupados?		
	Sim		Não
Se sim, como os estoques devem ser agrupados?	Centralização total	Transferências regulares (<i>cross-filling</i>)	Sistemas independentes
Adequação em termos de características de produto, demanda e operação para um custo mínimo total	Altos custos de manutenção de estoques; Correlações negativas entre as demandas; <i>Lead-time</i> médios altos e homogêneos; Desvios-padrão das demandas altos e homogêneos; Níveis homogêneos de variabilidade do <i>lead-time</i> .	Baixos custos de manutenção de estoques; Correlações moderadamente positivas entre as demandas; Possibilidade de balanceamento entre altos/ baixos <i>lead-times</i> e desvios-padrão da demanda nas diferentes instalações centralizadas; Níveis heterogêneos de variabilidade do <i>lead-time</i> .	Médios custos de manutenção de estoques; Correlações altamente positivas entre as demandas; Baixos <i>lead-time</i> médios; Baixos desvios-padrão das demandas; Níveis homogêneos de variabilidade do <i>lead-time</i>
Tipo de agrupamento	Demanda	<i>Lead-time</i> e demanda	Nenhum
Benefícios adicionais	Há benefícios na centralização na instalação que possui a menor variabilidade do <i>lead-time</i>	Nenhum	Há benefícios do fato que efeitos cruzados indesejáveis ou inesperados em termos de picos de demanda e atrasos
Regra fundamental de alocação de demanda	Tyagi e Das (1998)	Ballou e Burnetas (2003)	
Classificação esperada considerando níveis ótimos de estoque para cada regra de alocação de demanda	Custos de distribuição	$DC_{IC} > DC_{IS}$ $DC_T > DC_{IS}$ $DC_T > DC_{IC}$ se $W_p < D_1 / (D_1 + D_2)$	
	Custos de estoques	$IC_{IS} > IC_{IC}$ $IC_T > IC_{IC}$ $IC_T > IC_{IS}$ se as demandas são altamente e positivamente correlacionadas, se os <i>lead-time</i> médios e desvios-padrão da demanda são ambos baixos e a coeficiente entre os desvios-padrão do <i>lead-time</i> nas diferentes instalações é alta	
	Níveis de serviço	$FR_T > FR_{IS}$ $FR_{IS} > FR_{IC}$	

Legenda:

W_p é proporção da demanda de um mercado atendida por um armazém;

D_i é a demanda dos mercados;

DC_{IC} é o custo de distribuição na política de centralização total;

DC_{IS} é o custo de distribuição na política de sistema independente;

DC_T é o custo de distribuição na política de transferências regulares;

IC_{IC} é o custo de estoques na política de centralização total;

IC_{IS} é o custo de estoques na política de sistema independente;

IC_T é o custo de estoques na política de transferências regulares;

FR_{IC} é o nível de serviço em termos de fill-rate na política de centralização total;

FR_{IS} é o nível de serviço em termos de fill-rate na política de sistema independente;

FR_T é o nível de serviço em termos de fill-rate na política de transferências regulares.

3.3 Modelos de Localização de Instalações

Os problemas de localização de instalações em uma cadeia de suprimentos envolvem decisões estratégicas que por sua vez influenciam decisões táticas e operacionais. Por exemplo, a localização das instalações afeta a seleção dos modais de transporte e a definição dos modelos de gestão de estoque. Todas essas decisões afetam o custo total da cadeia e a qualidade do serviço prestado aos clientes (Ambrosino e Scutellà, 2004).

Eles foram definidos por Brandeau e Chiu (1984) como *“um problema de alocação espacial de recursos”*. Por sua vez, Ballou (2001) os definiu como *“um problema que consiste em equilibrar custos conflitantes (produção/compras, armazéns, estoques e transportes) com objetivos de serviço ao cliente e a associada contribuição aos lucros da operação”*. Já Ambrosino e Scutellà (2004) os definiram como *“um problema que consiste na determinação da melhor maneira de se transferirem bens para os pontos de demanda, escolhendo-se a estrutura da rede (os elos da rede, os diferentes tipos de instalações operando nos diferentes elos, o número dessas instalações e sua localização) ao mesmo tempo em que os custos totais da rede são minimizados.”*

Fazendo uma análise cronológica da literatura sobre os modelos desenvolvidos para a resolução dos problemas de localização de instalações e a evolução desse campo de estudos, nota-se que primeiros trabalhos foram realizados entre o final do século 19 e início do século 20 por Thünen e Weber (Brandeau e Chiu, 1984; Ballou, 2004). Entretanto, os modelos de localização de instalações somente passaram a ser um tema tratado de maneira crescente pela literatura a partir da década de 60 (Owen e Daskin, 1998).

Essa evolução é mostrada em diversos trabalhos, como no de Brandeau e Chiu (1984). Os autores realizaram um estudo que mostrava mais de 50 tipos de problemas relacionados à localização de instalações. Brandeau e Chiu (1984) desenvolveram em seguida uma taxonomia para classificá-los em função do seu objetivo, de suas variáveis de decisão e dos parâmetros do sistema. Após isso, descreveram as três principais técnicas de solução dos problemas classificados em seu artigo: otimização, heurísticas e técnicas para avaliação das heurísticas.

Uma visão mais estratégica do assunto foi dada por Geoffrion e Powers (1995). Os autores analisaram a evolução do *design* estratégico de redes de distribuição. Foram listados seis grandes processos evolutivos que tiveram impacto no assunto. O primeiro deles foi a evolução da logística como uma função corporativa, já que as empresas passaram a prestar mais atenção nas questões relativas aos seus sub-sistemas de transporte e armazenagem, entre outros, enxergando possibilidades de melhorias. O segundo foi a evolução dos computadores e das tecnologias de informação, com o desenvolvimento das aplicações com interfaces gráficas mais amigáveis aos usuários; a diminuição do preço dos *desktops* e dos equipamentos de comunicação paralelamente à melhoria do seu desempenho; o surgimento do *Electronic Data Interchange (EDI)*; o aprimoramento da captura eletrônica de dados; e o desenvolvimento de programas para os *desktops* com desempenho superior àquele dos programas para *mainframes*. O terceiro, por sua vez, foi a evolução dos algoritmos, que passaram de métodos não-otimizantes e/ou heurísticos, na década de 1970, a métodos otimizantes. O quarto foi a evolução dos sistemas de captura de dados e das ferramentas computacionais de gerenciamento. Já o quinto foi a evolução dos modelos de rede e da capacidade dos *softwares*, uma vez que os modelos passaram a incorporar aspectos que os deixavam cada vez mais próximos das situações reais. O sexto e último foi como as companhias efetivamente usaram, e continuam usando, os *softwares* para o *design* das suas redes de distribuição, já que as mesmas passaram a empregar sistematicamente essas ferramentas, encontrando inclusive novos meios de aplicá-las aos problemas enfrentados.

Também com enfoque mais estratégico, uma revisão da literatura sobre localização de instalações foi feita por Owen e Daskin (1998). Seu trabalho enfatizou as pesquisas que tratavam os problemas de localização de instalações com características dinâmicas (considerando um horizonte de planejamento mais amplo, normalmente maior do que um ano) e estocásticas (utilizando distribuições probabilísticas que levam em conta incertezas de alguns dados de entrada do problema ou utilizando análise de cenários). Os autores destacam que as dificuldades computacionais impostas pelos dois tipos de problema citados impediam até recentemente sua resolução. Isso fazia com que os pesquisadores se concentrassem em problemas mais simples, de natureza estática e determinística, como aqueles de mediana, de recobrimento e de centralização. Adicionalmente, Brandeau e Chiu (1984) destacaram que, com o passar do tempo, os pesquisadores desenvolveram modelos que incorporaram funções-objetivo mais realistas e algumas vezes não-lineares, ainda que essas funções aumentassem a complexidade dos problemas, tornando-os não-convexos e de difícil resolução. Essas funções-

objetivo normalmente abrangem os custos fixos de abertura e operação das instalações, os custos de transporte e os custos de manutenção dos estoques.

Mais precisamente no que diz respeito aos custos de manutenção de estoque, os mesmos podem ser divididos em duas parcelas, sendo a primeira correspondente aos custos dos estoques de ciclo e a segunda correspondente aos custos dos estoques de segurança (Evers, 1995). Uma das formulações clássicas para o nível de estoques de ciclo que uma instalação deve manter utiliza o *LEC*, sendo esse último proporcional à raiz quadrada das demandas atendidas pelo armazém, aos custos de colocação de pedidos e aos custos de oportunidade de se manter o estoque. Já a formulação clássica para o nível de estoques de segurança que uma instalação deve manter é proporcional à raiz quadrada das demandas atendidas por ela, às correlações e variâncias dessas demandas, aos *lead-times* de ressurgimento dos produtos e à variância de tais *lead-times*.

Ao longo dos anos, os custos de manutenção de estoques foram tratados de maneiras distintas quando incorporados aos problemas de localização de instalações, conforme é ilustrado na discussão a seguir.

3.3.1 Modelos Clássicos de Localização de Instalações que Desconsideram os Custos de Manutenção de Estoques

Owen e Daskin (1998) mostraram uma descrição dos problemas clássicos de localização de instalações, resolvidos por otimização realizada através de programação matemática. De acordo com os autores, esses problemas, que são do tipo estático e determinístico, fornecem um sólido alicerce para grande parte da teoria de localização de instalações desenvolvida.

Os autores mostraram inicialmente os problemas de *P-Mediana*, que foram introduzidos na literatura por Hakimi (1964). Neles, buscava-se a determinação de *P* instalações iguais de modo a minimizar a distância de viagem entre as mesmas e os pontos de demanda, sendo essa distância ponderada pela demanda. A formulação assumia que as demandas não eram sensíveis ao nível de serviço e que havia um conjunto finito de localidades potenciais para os armazéns, o que caracterizava o problema como discreto. Nota-se que tais problemas somente lidavam com aspectos de transporte. Matematicamente, eles são definidos com base na seguinte notação:

i = índice do nó de demanda,

j = índice do nó que representa a localidade potencial de uma instalação,

h_i = demanda no nó i ,

d_{ij} = distância entre o nó de demanda i e o nó j que representa a localidade potencial de uma instalação,

P = número de instalações a serem localizadas.

As variáveis de decisão do problema de P -Mediana são dadas por:

$$X_j = \begin{cases} 1 & \text{se uma instalação é localizada na potencial localidade } j, \\ 0 & \text{caso contrário.} \end{cases}$$

$$Y_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{se a demanda do nó } i \text{ é atendida pela instalação localizada em } j, \\ 0 & \text{caso contrário.} \end{cases}$$

O problema de programação linear inteira tem a seguinte função-objetivo:

$$\text{Minimizar } \sum_i \sum_j h_i d_{ij} Y_{ij}, \quad (2.11)$$

sujeita às seguintes restrições:

$$\sum_j X_j = P, \quad (2.12)$$

$$\sum_j Y_{ij} = 1 \quad \forall i, \quad (2.13)$$

$$Y_{ij} - X_j \leq 0 \quad \forall i, j, \quad (2.14)$$

$$X_j \in \{0,1\} \quad \forall j, \quad (2.15)$$

$$Y_{ij} \in \{0,1\} \quad \forall i, j. \quad (2.16)$$

A restrição (2.12) garante que exatamente P instalações serão localizadas. A restrição (2.13), por sua vez, garante que toda a demanda será alocada a ao menos uma instalação. Já a restrição (2.14) permite a alocação da demanda somente a instalações abertas. Finalmente, as restrições (2.15) e (2.16) garantem que as variáveis do problema assumam os valores binários adequados.

Em seguida, Owen e Daskin (1998) mostraram os problemas de recobrimento. Eles foram estudados, de acordo com Brandeau e Chiu (1989), por autores como Minieka (1970) e Elzinga e Hearn (1972). Neles, era determinado, para uma distância ou tempo máximos de atendimento, qual o número mínimo de instalações necessário para que todas as demandas fossem atendidas (cobertas), minimizando-se o custo fixo das instalações. Esses problemas são conhecidos como *problemas de recobrimento de um conjunto de locais*. Matematicamente, eles são definidos a partir da seguinte notação:

i = índice do nó de demanda,

j = índice do nó que representa a localidade potencial de uma instalação,

d_{ij} = distância entre o nó de demanda i e o nó j que representa a localidade potencial de uma instalação,

c_j = custo fixo de uma instalação localizada no nó j ,

N_i = conjunto dos nós j que atendem a distância ou tempo máximos aceitáveis de serviço em relação ao nó i ($N_i = \{j \mid d_{ij} \leq S\}$),

S = distância ou tempo máximos aceitáveis de serviço (raio de cobertura).

X_j é a única variável de decisão, definida por:

$$X_j = \begin{cases} 1 & \text{se uma instalação é localizada na potencial localidade } j, \\ 0 & \text{caso contrário.} \end{cases}$$

A função-objetivo do problema de programação linear inteira é dada por:

$$\text{Minimizar } \sum_j c_j X_j, \quad (2.17)$$

sujeita às seguintes restrições:

$$\sum_{j \in N_i} X_j \geq 1 \quad \forall i, \quad (2.18)$$

$$X_j \in \{0,1\} \quad \forall j. \quad (2.19)$$

A restrição (2.18) garante que todas as demandas i tenham ao menos uma instalação localizada dentro do raio de cobertura. Já a restrição (2.19) garante que a variável do problema assuma os valores binários adequados.

Uma variação do problema é a busca da maximização da demanda coberta para uma distância ou tempo máximos de atendimento, utilizando-se uma quantidade fixa de instalações determinada *a priori*. Também se assume que há um conjunto finito de localidades potenciais. Esses problemas são conhecidos como *problemas da máxima cobertura*, que têm sido extensivamente estudados desde que foram apresentados no artigo seminal de Church e ReVelle (1974). Matematicamente, eles são definidos através da seguinte notação:

i = índice do nó de demanda,

j = índice do nó que representa a localidade potencial de uma instalação,

h_i = demanda no nó i ,

d_{ij} = distância entre o nó de demanda i e o nó j que representa a localidade potencial de uma instalação,

N_i = conjunto dos nós j que atendem a distância ou tempo máximos aceitáveis de serviço em relação ao nó i ($N_i = \{j \mid d_{ij} \leq S\}$),

S = distância ou tempo máximos aceitáveis de serviço (raio de cobertura),

P = número de instalações a serem localizadas.

As variáveis de decisão do problema da máxima cobertura são dadas por:

$$X_j = \begin{cases} 1 & \text{se uma instalação é localizada na potencial localidade } j, \\ 0 & \text{caso contrário.} \end{cases}$$

$$Z_i = \begin{cases} 1 & \text{se o nó } i \text{ é coberto,} \\ 0 & \text{caso contrário.} \end{cases}$$

A função-objetivo do problema de programação linear inteira é dada por:

$$\text{Maximizar } \sum_j h_i Z_i, \tag{2.20}$$

sujeita às seguintes restrições:

$$Z_i \leq \sum_{j \in N_i} X_j \quad \forall i, \quad (2.21)$$

$$\sum_j X_j \leq P, \quad (2.22)$$

$$X_j \in \{0,1\} \quad \forall j, \quad (2.23)$$

$$Z_i \in \{0,1\} \quad \forall i. \quad (2.24)$$

A restrição (2.21) determina quais nós de demanda estão dentro do raio de cobertura. Em seguida, a restrição (2.22) limita a P o número de instalações localizadas. Finalmente, as restrições (2.23) e (2.24) garantem que as variáveis do problema assumam os valores binários adequados. Nota-se mais uma vez que esses problemas, assim como os anteriores, focalizavam-se primordialmente nos aspectos de transporte.

O terceiro problema clássico mostrado por Owen e Daskin (1998) foi aquele de centralização, onde se buscava a minimização da máxima distância entre os pontos de demanda e as instalações mais próximas dos mesmos. Esses problemas são conhecidos como problemas *MiniMax*. Neles, as instalações podem ser localizadas de duas formas. Na primeira, elas podem ser localizadas em nós específicos na rede, sendo o problema nesse caso conhecido como *vertex center problem*, que foi estudado, de acordo com Brandeau e Chiu (1989), por Halfin (1974), Hedetniemi et al. (1981) e Farley (1982). Na segunda, as instalações podem ser localizadas em qualquer lugar da rede, sendo o problema conhecido como *absolute center problem*, que foi estudado, ainda segundo Brandeau e Chiu (1989), por Hakimi (1964), Garfinkel et al. (1977) e Kariv e Hakimi (1979). Adicionalmente, nessa última forma do problema os pontos de demanda também podem ser atendidos por múltiplas instalações. Nota-se que a questão principal continua sendo o transporte. A título de ilustração, somente a formulação matemática do *vertex center problem* será mostrada. O problema é definido pela seguinte notação:

i = índice do nó de demanda,

j = índice do nó que representa a localidade potencial de uma instalação,

d_{ij} = distância entre o nó de demanda i e o nó j que representa a localidade potencial de uma instalação,

P = número de instalações a serem localizadas,

D = distância máxima aceitável entre um nó de demanda i e a instalação mais próxima.

As variáveis de decisão do problema são tais que:

$$X_j = \begin{cases} 1 & \text{se uma instalação é localizada na potencial localidade } j, \\ 0 & \text{caso contrário.} \end{cases}$$

$$Y_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{se o nó de demanda } i \text{ é atendido pela instalação localizada em } j, \\ 0 & \text{caso contrário.} \end{cases}$$

A função-objetivo do problema de programação linear inteira é tal que:

$$\text{Minimizar } D, \tag{2.25}$$

sujeita às seguintes restrições:

$$\sum_j X_j = P, \tag{2.26}$$

$$\sum_j Y_{ij} = 1 \quad \forall i, \tag{2.27}$$

$$Y_{ij} - X_j \leq 0 \quad \forall i, j, \tag{2.28}$$

$$D \geq \sum_i d_{ij} Y_{ij} \quad \forall i, \tag{2.29}$$

$$X_j \in \{0,1\} \quad \forall j, \tag{2.30}$$

$$Y_{ij} \in \{0,1\} \quad \forall i, j. \tag{2.31}$$

A restrição (2.26) garante que exatamente P instalações serão localizadas. Em seguida, a restrição (2.27) garante que toda a demanda será alocada a ao menos uma instalação. Já a restrição (2.28) permite a alocação da demanda somente a instalações abertas. A restrição (2.29), por sua vez, define a máxima distância entre os nós de demanda i e as instalações mais próximas. Finalmente, as restrições (2.30) e (2.31) garantem que as variáveis do problema assumam os valores binários adequados.

Owen e Daskin (1998) mostraram, por fim, problemas que incorporam outros aspectos de custo da rede, tornando-se mais próximos da realidade. São os problemas de localização de instalações com custo fixo e sem capacidade, conhecidos na literatura como *Fixed Charge Facility Location Problems*. Neles, é adicionado a um problema de *P-Mediana* o custo fixo de

uma dada instalação, relaxando-se a restrição que dita o número de instalações a serem localizadas. Busca-se, dessa maneira, o número de instalações que minimiza o custo total da rede, composto pelos custos fixos de construção e operação das instalações e pelos custos de transporte. Fazendo-se uma pequena modificação nesse modelo, através da adição das capacidades das instalações e da restrição de que a demanda total atribuída a uma instalação não ultrapasse sua capacidade, obtém-se os problemas de localização de instalações com custo fixo e capacidade. Eles são conhecidos na literatura internacional, segundo Miranda e Garrido (2004), como *Capacitated Facility Location Problems*. Matematicamente, o problema de localização com custos fixos e capacidade é definido pela seguinte notação (Nozick e Turnquist, 2001):

i = índice do nó de demanda,

j = índice do nó que representa a localidade potencial de uma instalação,

α = custo unitário de transporte,

h_i = demanda no nó i ,

c_j = custo fixo de uma instalação localizada no nó j ,

d_{ij} = distância entre o nó de demanda i e o nó j que representa a localidade potencial de uma instalação,

W_j = capacidade da instalação localizada em j .

As variáveis de decisão do problema de localização com custos fixos e capacidade são dadas por:

$$X_j = \begin{cases} 1 & \text{se uma instalação é localizada na potencial localidade } j, \\ 0 & \text{caso contrário.} \end{cases}$$

$$Y_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{se a demanda do nó } i \text{ é atendida pela instalação localizada em } j, \\ 0 & \text{caso contrário.} \end{cases}$$

A função-objetivo do problema de programação linear inteira é mostrada na equação (2.32):

$$\text{Minimizar } \sum_j c_j X_j + \alpha \sum_i \sum_j h_i d_{ij} Y_{ij}, \quad (2.32)$$

sujeita às seguintes restrições:

$$\sum_j Y_{ij} = 1 \quad \forall i, \quad (2.33)$$

$$Y_{ij} - X_j \leq 0 \quad \forall i, j, \quad (2.34)$$

$$\sum_i h_i Y_{ij} \leq W_j X_j \quad \forall j, \quad (2.35)$$

$$X_j \in \{0, 1\} \quad \forall j, \quad (2.36)$$

$$Y_{ij} \in \{0, 1\} \quad \forall i, j. \quad (2.37)$$

A restrição (2.33) garante que toda a demanda será alocada a exatamente uma instalação. Por sua vez, a restrição (2.34) permite a alocação da demanda somente a instalações abertas. A restrição (2.35), em seguida, garante que a soma das demandas atribuídas a uma instalação não ultrapasse sua capacidade (é desconsiderada no caso do problema sem capacidade). Finalmente, as restrições (2.36) e (2.37) garantem que as variáveis do problema assumam os valores binários adequados.

Entretanto, os modelos fundamentais mostrados por Owen e Daskin (1998) não tratam um componente importante dos custos de uma rede de distribuição, que são os custos de manutenção dos estoques. A importância da consideração dos custos de manutenção dos estoques de ciclo e de segurança nos problemas de localização de instalações é defendida, por exemplo, por Ballou (2001 e 2004). Assim, as subseqüentes seções 3.3.2 e 3.3.3 abordarão o tratamento dado aos custos relativos aos estoques nos principais modelos de localização encontrados na literatura.

3.3.2 Modelos de Localização de Instalações que Consideram Custos de Manutenção de Estoques Simplificados

A presente seção mostra como os custos de estoques foram incorporados, de maneira simplificada, a modelos de localização que empregam otimização realizada por meio de programação matemática. Em seus trabalhos, Jayaraman (1998), Jayaraman e Pirkul (1999), Ambrosino e Scutellà (2004) e Davariz (2006), dentre outros, incorporaram os aspectos relativos aos estoques, de maneira simplificada, nos modelos propostos.

Jayaraman (1998) propôs um modelo chamado *FLITNET* que é bastante característico da classe de problemas que incorpora o custo de manutenção de estoques de maneira simplificada nos problemas de localização de instalações. O modelo é apto a lidar com múltiplos produtos e

modais de transporte e deriva do clássico modelo de localização de instalações com custo fixo e capacidade. Ele trata os estoques de ciclo e em trânsito simultaneamente, determinando qual modal de transporte a ser utilizado para cada produto, o número de instalações a serem localizadas e onde localizá-las (a partir de um conjunto pré-determinado de possíveis localidades) e os parâmetros do estoque de ciclo de cada instalação, minimizando os custos totais (por ano) da rede. Além disso, o autor realizou uma análise de sensibilidade com a otimização de diversos cenários, nos quais foram gerados valores aleatórios, a partir de distribuições uniformes, das seguintes variáveis:

- Número de potenciais localidades para fábricas e armazéns;
- Custos fixos de abertura das fábricas;
- Custos fixos de abertura dos armazéns;
- Custo unitário de manutenção dos estoques nas fábricas e armazéns;
- Custo unitário de manutenção dos estoques em trânsito;
- Capacidade dos armazéns;
- Capacidade das fábricas;
- Frequência de envio dos diferentes produtos das fábricas aos armazéns e destes últimos aos mercados;
- *Lead-time* médio de envio dos diferentes produtos das fábricas aos armazéns e destes últimos aos mercados;
- Demanda dos mercados.

Os custos totais por ano (CA) foram definidos por Jayaraman (1998) em seu modelo como sendo:

$CA = \text{Custos fixos de abertura e operação dos armazéns} + \text{Custos de transporte das fábricas aos armazéns} + \text{Custos de transporte dos armazéns aos mercados consumidores} + \text{Custos do estoque em trânsito} + \text{Custos de manutenção dos estoques de ciclo nas fábricas} + \text{Custos de manutenção dos estoques de ciclo nos armazéns} + \text{Custos fixos de abertura e operação das fábricas}.$

Matematicamente, o problema é definido através da seguinte notação:

i = conjunto de potenciais fábricas,

j = conjunto de potenciais armazéns,

k = conjunto de mercados consumidores,

l = conjunto de produtos,

r = conjunto dos diferentes modais de transporte,

T_{ijlr} = custo unitário de transporte do produto l da fábrica i ao armazém j através do modal r ,

F_{ijlr} = frequência de envio do produto l da fábrica i ao armazém j através do modal r ,

d_{jklr} = custo unitário de transporte do produto l entre o armazém j e o mercado consumidor k através do modal r ,

L_{ijlr} = lead-time médio de envio do produto l da fábrica i ao armazém j através do modal r ,

a_{kl} = demanda do consumidor k pelo produto l ,

W_j = capacidade do armazém j ,

G_i = capacidade da fábrica i ,

F_j = custo fixo de abertura e operação do armazém j ,

O_i = custo fixo de abertura e operação da fábrica i ,

S_l = espaço ocupado pelo produto l ,

W = número de armazém a serem abertos,

P = número de fábricas a serem abertas,

CS_{ijlr} = custo do estoque de ciclo na fábrica i associado ao envio do produto l ao armazém j através do modal r ,

CC_{il} = custo unitário de estoque do produto l na fábrica i ,

CW_{jl} = custo unitário de estoque do produto l no armazém j ,

C_{lr} = custo unitário de estoque em transito do produto l por unidade de tempo de transporte do modal r ,

$\sum_j F_j Z_j$ = custo fixo agregado de abertura e operação dos armazéns,

$\sum_i \sum_j \sum_l \sum_r T_{ijlr} X_{ijlr}$ = custo agregado transporte dos produtos da fábricas ao armazéns,

$\sum_j \sum_k \sum_l \sum_r d_{jklr} Y_{jklr}$ = custo agregado transporte dos produtos dos armazéns aos consumidores,

$$\sum_i \sum_j \sum_l \sum_r C_{lr} L_{ijlr} X_{ijlr} = \text{custo agregado do estoque em trânsito},$$

$$\sum_i \sum_j \sum_l \sum_r 0.5 \times (CC_{il} \times X_{ijlr} / F_{ijlr}) = \text{custo agregado do estoque nas fábricas},$$

$$\sum_i \sum_j \sum_l \sum_r 0.5 \times (CW_{jl} \times X_{ijlr} / F_{ijlr}) = \text{custo agregado do estoque nos armazéns},$$

$$\sum_i O_i P_i = \text{custo fixo agregado de abertura e operação das fábricas}.$$

As variáveis de decisão do modelo *FLITNET* são dadas por:

X_{ijlr} = quantidade total do produto l enviado da fábrica i ao armazém j pelo modal r ,

Y_{jklr} = quantidade total do produto l enviado do armazém j ao mercado k pelo modal r ,

$$Z_j = \begin{cases} 1 & \text{se o armazém } j \text{ é aberto,} \\ 0 & \text{caso contrário.} \end{cases}$$

$$P_i = \begin{cases} 1 & \text{se a fábrica } i \text{ é aberta,} \\ 0 & \text{caso contrário.} \end{cases}$$

A função-objetivo do problema de programação linear inteira-mista tratado no modelo *FLITNET* é dada por:

$$\begin{aligned} \text{Minimizar } CA = & \sum_j F_j Z_j + \sum_i \sum_j \sum_l \sum_r T_{ijlr} X_{ijlr} + \sum_j \sum_k \sum_l \sum_r d_{jklr} Y_{jklr} + \\ & \sum_i \sum_j \sum_l \sum_r C_{lr} L_{ijlr} X_{ijlr} + \sum_i \sum_j \sum_l \sum_r 0.5 \times (CC_{il} \times X_{ijlr} / F_{ijlr}) + \\ & \sum_i \sum_j \sum_l \sum_r 0.5 \times (CW_{jl} \times X_{ijlr} / F_{ijlr}) + \sum_i O_i P_i, \end{aligned} \quad (2.38)$$

sujeita às seguintes restrições:

$$\sum_j \sum_r Y_{jklr} = a_{kl} \quad \forall k, l, \quad (2.39)$$

$$\sum_k \sum_l \sum_r S_l Y_{jklr} \leq W_j Z_j \quad \forall j, \quad (2.40)$$

$$\sum_j Z_j \leq W, \quad (2.41)$$

$$\sum_k Y_{jklr} \leq \sum_i X_{ijlr} \quad \forall l, r, j, \quad (2.42)$$

$$\sum_j \sum_r \sum_l S_l X_{ijlr} \leq G_i P_i \quad \forall i, \quad (2.43)$$

$$\sum_i P_i \leq P, \quad (2.44)$$

$$X_{ijlr}, Y_{jklr} \geq 0 \quad \forall i, j, k, l, r, \quad (2.45)$$

$$Z_j, P_i = \{0,1\} \quad \forall i, j. \quad (2.46)$$

A restrição (2.39) assegura que a demanda de todos os mercados consumidores é atendida. Em seguida, a restrição (2.40) assegura que a demanda total alocada a um armazém não ultrapasse sua capacidade. A restrição, por sua vez, (2.41) assegura que não sejam abertos mais do que W armazéns. A restrição (2.42) assegura que toda a demanda do consumidor k pelo produto l é igual ao total de unidades do produto l disponível no armazém j que foram transportadas de todas as plantas abertas. A restrição (2.43) tem como objetivo representar a restrição de capacidade da fábrica k em termos da quantidade de demanda com a qual ela pode lidar. Por sua vez, a restrição (2.44) assegura que não sejam abertas mais do que P fábricas. Já a restrição (2.45) assegura que as variáveis não assumam valores negativos. Finalmente, a restrição (2.46) garante que as variáveis assumam os valores binários adequados. É interessante ainda ressaltar que o parâmetro F_{ijlr} é um dado de entrada do problema determinado antes da otimização. Esse foi o artifício utilizado por Jayaraman (1998) para considerar os estoques de ciclo no problema sem a necessidade de utilizar uma otimização não-linear (necessária quando os estoques são modelados através do *LEC* e *PP*).

Jayaraman e Pirkul (1999) estenderam o modelo acima para a localização de instalações de produção e armazenagem em uma rede de distribuição que lida com múltiplas *commodities*. A rede é composta por fornecedores de diversas matérias-primas, fábricas, armazéns e mercados consumidores de produtos acabados. Dessa maneira eram tomadas decisões simultâneas sobre: (a) a localização das fabricas e dos armazéns; (b) a especificação de suas capacidades e os sistemas de distribuição das matérias-primas dos fornecedores às fábricas, dos produtos acabados das fábricas aos armazéns e destes aos mercados consumidores. O problema foi resolvido por meio de relaxação lagrangeana e métodos heurísticos.

Ambrosino e Scutellà (2004) trouxeram uma abordagem alternativa para incorporar os custos do estoque de ciclo em um problema de localização de armazéns, apresentando modelos

estáticos e dinâmicos. Nos problemas formulados foram incluídos armazéns intermediários, o que gera diferentes níveis de distribuição (por exemplo, entre armazéns centrais e intermediários e entre os intermediários e os mercados consumidores). O modelo também considerava a determinação de rotas de distribuição que podem passar por vários mercados consumidores a cada envio de produtos. Assim, a distribuição não é necessariamente feita diretamente dos armazéns a cada um dos mercados.

Na literatura brasileira, Davariz (2006) apresentou um interessante procedimento de análise da rede de produção e distribuição do Biodiesel no Brasil, utilizando o modelo proposto por Jayaraman (1998) em sua dissertação de mestrado.

Os modelos de Jayaraman (1998), Jayaraman e Pirkul (1999) e Ambrosino e Scutellà (2004), todavia, consideravam os custos de manutenção dos estoques através de uma abordagem de cobertura, onde toda a demanda dos mercados atendidos por um armazém deve ser mantida em estoque no horizonte de análise. Dessa maneira, os estoques foram considerados dados de entrada do problema, não podendo ser assim otimizados.

No entanto, justamente porque os custos com estoques se comportam de maneira não-linear (proporcionais a uma raiz quadrada) quando o *LEC* é adotado, os mesmos não podem ser tratados de maneira adequada pelos modelos que utilizam programação linear inteira-mista (Ballou, 2001), como os de Jayaraman (1998), Jayaraman e Pirkul (1999) e Ambrosino e Scutellà (2004).

3.3.3 Modelos de Localização de Instalações que Consideram Efeitos de Centralização dos Estoques

A presente seção apresenta a teoria relativa à centralização dos estoques de ciclo e segurança (cf. seções 3.3.3.1 e 3.3.3.2), mostrando em seguida como esses fenômenos foram levados em conta em alguns modelos de localização de instalações que empregam otimização via programação matemática (cf. seções 3.3.3.3 e 3.3.3.4).

3.3.3.1 Influência da Centralização nos Estoques de Segurança: o Efeito Portfolio

Quando se diminui o número n de armazéns em uma rede para somente um, Maister (1976) mostrou, por meio de um efeito estatístico conhecido como Regra da Raiz Quadrada, que os estoques de segurança diminuem proporcionalmente à raiz quadrada de n . Para isso, Maister (1976) assumiu as seguintes premissas:

- Não há transferências de produtos entre os armazéns, seja antes ou depois da centralização;
- Todos os armazéns, seja antes ou depois da centralização, usam a abordagem do fator de segurança ($k \times \sigma$) na determinação dos estoques de segurança, onde k é o fator de segurança que garante uma determinada probabilidade de não ocorrer um *stock-out* e σ é o desvio-padrão da demanda durante o *lead-time* (cf. seção 3.1);
- Demandas e *lead-times* de ressuprimento são variáveis aleatórias independentes e normalmente distribuídas;
- Não há correlação entre *lead-times* e demandas;
- A demanda média da rede continua a mesma após a centralização;
- Todos os armazéns, seja antes ou depois da centralização, apresentam o mesmo fator de segurança k que especifica o nível de serviço;
- A variância do *lead-time* de ressuprimento é zero para todos os armazéns, seja antes ou depois da centralização;
- Todos os armazéns, seja antes ou depois da centralização, possuem *lead-time* de ressuprimento unitário;
- As demandas nos armazéns descentralizados não apresentam correlação ($\rho_{ij} = 0$);
- As demandas nos armazéns descentralizados apresentam a mesma variância.

Como as demandas são variáveis aleatórias independentes, tem-se que:

$$\sigma_c^2 = \sum_n \sigma_{d,n}^2, \quad (2.47)$$

$$\sigma_{d,n}^2 = \sigma_d^2 \quad \forall n, \quad (2.48)$$

$$\sum_n \sigma_{d,n}^2 = n \times \sigma_d^2, \quad (2.49)$$

$$\sigma_c = \sigma_d \times \sqrt{n}, \quad (2.50)$$

onde:

n = número de armazéns na rede,

$\sigma_{d,n}$ = desvio-padrão da demanda de cada armazém descentralizado,

σ_d = desvio-padrão da demanda, igual para cada armazém descentralizado,

σ_c = desvio-padrão da demanda no armazém centralizado.

A redução no nível de estoque de segurança agregado é devido ao efeito estatístico de se somarem os desvios-padrão ao quadrado e depois se extrair a raiz quadrada dessa soma. Assim, o nível de serviço desejado, ou seja, a probabilidade de não haver *stock-out*, pode ser mantido com uma menor quantidade de estoques de segurança centralizados comparado aos múltiplos estoques de segurança descentralizados (Tallon, 1993).

Zinn, Levy e Bowersox (1989) aplicaram o conceito de Efeito Portfólio, também com base na Regra da Raiz Quadrada, para medir a redução percentual proporcionada pela centralização do estoque de várias instalações em uma única. Essa redução também é proporcional à raiz quadrada das variâncias das demandas nas instalações. Para isso, Zinn, Levy e Bowersox (1989) utilizaram as seguintes premissas:

- Não há transferências de produtos entre os armazéns, seja antes ou depois da centralização;
- A variância do *lead-time* de ressuprimento é igual a zero para todos os armazéns;
- Todos os armazéns, antes ou depois da centralização, apresentam o mesmo fator de segurança k que especifica o nível de serviço;
- A demanda em cada armazém é uma variável aleatória independente e normalmente distribuída;
- As demandas podem apresentar correlação ($\rho_{ij} \neq 0$).

A equação (2.54) define o Efeito Portfolio (*PE*):

$$SS_i = k\sigma_i, \quad (2.51)$$

$$SS_a = k \sqrt{\sum_{i=1}^n \sigma_i^2 + 2 \sum_{i < j} \sum_j \sigma_i \sigma_j \rho_{ij}}, \quad (2.52)$$

$$PE = 1 - \frac{SS_a}{\sum_{i=1}^n SS_i} \quad \text{para } 0 \leq PE \leq 1, \quad (2.53)$$

$$PE = 1 - \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n \sigma_i^2 + 2 \sum_{i < j} \sum_j \sigma_i \sigma_j \rho_{ij}}}{\sum_{i=1}^n \sigma_i}, \quad (2.54)$$

onde:

n = número de armazéns na rede,

k = fator de segurança que reflete o nível de proteção em relação aos stock-outs, ou seja, o nível de serviço,

σ_i, σ_j = desvio-padrão das demandas nos armazéns i e j ,

ρ_{ij} = coeficiente de correlação entre as demandas dos armazéns i e j ,

SS_a = estoque de segurança agregado de um produto quando os estoques são centralizados,

SS_n = estoque de segurança de um produto no armazém n .

Zinn, Levy e Bowersox (1989) também desenvolveram o conceito de Magnitude M_{ij} , que representa a relação entre os valores dos desvios-padrão da demanda nos armazéns i e j , e é dado pela equação (2.55):

$$M_{ij} = \frac{\sigma_i}{\sigma_j} \quad \text{para } \sigma_i \geq \sigma_j \text{ e } \sigma_j \neq 0, \quad (2.55)$$

Para determinar os efeito de M_{ij} e ρ_{ij} em PE , os autores substituíram a equação (2.55) na equação (2.54), no caso particular de dois armazéns, obtendo a equação (2.56):

$$PE = 1 - \frac{\sqrt{M_{12}^2 + 1 + 2M_{12}\rho_{12}}}{M_{12} + 1}, \quad (2.56)$$

Os autores concluíram, através da equação (2.56), que PE é impactado diretamente pela relação entre os valores dos desvios-padrão da demanda nos armazéns e não pelos valores absolutos desses desvios-padrão. Além disso, percebe-se na equação (2.56) que quanto maior é ρ_{ij} , menor é PE . Zinn, Levy e Bowersox (1989), então, notaram que M_{ij} modera o efeito de ρ_{ij} , tendo um grande impacto em PE principalmente quando os valores de ρ_{ij} são negativos e próximos de -1.

Os autores então mostraram que os resultados derivados por Maister (1976) são um caso particular do Efeito Portfólio, quando $\rho_{ij} = 0$ e $M_{ij} = 1$.

Nos anos posteriores à publicação dos artigos de Zinn, Levy e Bowersox (1989) vários outros autores desenvolveram trabalhos baseando-se no Efeito Portfólio. Mahmoud (1992) desenvolveu uma forma generalizada do Efeito Portfólio, apresentando uma função utilizada para a centralização dos estoques de segurança de n armazéns em um número menor m de armazéns, tal que $2 \leq m \leq n$. Para isso, Mahmoud (1992) utilizou a seguinte notação:

n = número total de armazéns na rede,

I = conjunto de todos os armazéns da rede,

i, j, l = índices de um armazém na rede; $i, j, l \in I = \{1, \dots, n\}$,

SS_i = estoque de segurança no armazém i , $i \in I$,

I' = subconjunto dos armazéns I a serem centralizados, $I' \subset I$, $|I'| = m$, $2 \leq m \leq n$,

$\sigma_i, \sigma_j, \sigma_l$ = desvios-padrão da demanda no armazém i, j e l ; $i, j, l \in I$,

k = fator de segurança que reflete o nível de proteção em relação aos stock-outs, ou seja, o nível de serviço,

M_{ij} = magnitude relativa do desvio-padrão da demanda nos armazéns i e j ,

$M_{ij} = \sigma_i / \sigma_j$, $\sigma_i \leq \sigma_j$ e $\sigma_j \neq 0$,

$\sigma_{I'}$ = desvio-padrão das demandas centralizadas em I' ,

$SS_{I'}$ = estoque de segurança centralizado em I' ,

ρ_{ij} = coeficiente de correlação das demandas nos armazéns i e j com $i, j \in I$,

$PE_{I'}$ = efeito portfolio da centralização dos armazéns I' .

O Efeito Portfólio é então definido por Mahmoud (1992) através da equação (2.62):

$$SS_i = k\sigma_i, \quad (2.57)$$

$$SS_{I'} = k\sigma_{I'}, \quad (2.58)$$

$$\sigma_{I'} = \sqrt{\sum_{i \in I'} \sigma_i^2 + 2 \sum_{\substack{i, j \in I' \\ i < j}} \sigma_i \sigma_j \rho_{ij}}, \quad (2.59)$$

$$PE_{I'} = 1 - \frac{SS_{I'}}{\sum_{i \in I'} SS_i}, \quad (2.60)$$

$$PE_{I'} = 1 - \frac{\sigma_{I'}}{\sum_{i \in I'} \sigma_i}, \quad (2.61)$$

$$PE_{I'} = 1 - \frac{\sqrt{\sum_{i \in I'} \sigma_i^2 + 2 \sum_{\substack{i, j \in I' \\ i < j}} \sigma_i \sigma_j \rho_{ij}}}{\sum_{i \in I'} \sigma_i}. \quad (2.62)$$

Mahmoud (1992), então, reescreveu a equação (2.62) utilizando o conceito de Magnitude M_{ij} , resultando na equação (2.63):

$$PE_{I'} = 1 - \frac{\sqrt{\sum_{i \in I'} M_{il}^2 + 2 \sum_{\substack{i, j \in I' \\ i < j}} M_{il} M_{jl} \rho_{ij}}}{\sum_{i \in I'} M_{il}}. \quad (2.63)$$

onde:

$$l = \{i \mid \sigma_l = \max[\sigma_i; i \in I']\},$$

$$M_{il} = \sigma_i / \sigma_l, \sigma_i \leq \sigma_l \text{ e } \sigma_l \neq 0,$$

$$M_{jl} = \sigma_j / \sigma_l, \sigma_j \leq \sigma_l \text{ e } \sigma_l \neq 0.$$

O autor então introduz o conceito de *Portfolio Quantity Effect* ($PQE_{I'}$), definido na equação (2.64), que mede a redução da quantidade de estoque de segurança mantido nos diferentes armazéns. Segundo Mahmoud (1992), ele é necessário uma vez que o Efeito Portfolio é uma medida de redução percentual dos estoques de segurança agregados devido à centralização

dos estoques em um único armazém, não refletindo as reduções das diferentes quantidades de estoque de segurança mantidas nos vários armazéns quando a rede resultante do procedimento de centralização apresenta mais do que um armazém.

$$PQE_{I'} = PE_{I'} \left(\sum_{i \in I'} SS_i \right). \quad (2.64)$$

Em seguida, Mahmoud (1992) utiliza o $PQE_{I'}$ para ilustrar um caso particular de uma rede composta por quatro armazéns onde duas sub-centralizações (dois armazéns presentes na rede resultante, cada um deles contendo os estoques de um dos outros dois eliminados cf. Figura 19 do Anexo 1) apresentam uma redução da quantidade de estoque de segurança maior do que a centralização de todos os estoques em um único armazém. O autor ainda ressaltou que as condições nas quais a centralização total é melhor, pior ou equivalente a várias sub-centralizações não podem ser derivadas explicitamente, pois são complexas funções de ρ_{ij} , M_{ij} e SS_i .

Evers e Beier (1993) propuseram uma formulação mais generalizada do Efeito Portfolio que incluía incertezas no *lead-time* de ressuprimento, considerando diferentes *lead-times* para os diferentes armazéns. Além disso, sua formulação também permitia a centralização de um número n de armazéns para um número m , tal que $1 \leq m < n$. A formulação se baseava nas seguintes hipóteses:

- Não há transferências de produtos entre os armazéns, seja antes ou depois da centralização;
- Todos os armazéns, antes ou depois da centralização, apresentam o mesmo fator de segurança k que especifica o nível de serviço;
- As demandas e os *lead-times* são variáveis aleatórias independentes e normalmente distribuídas;
- Não há correlação entre *lead-times* e demandas;
- A demanda média da rede continua a mesma após a centralização.

Em seguida, os autores utilizaram a fórmula do desvio-padrão da demanda durante o *lead-time*, calculado a partir da demanda alocada aos armazéns e do *lead-time* de ressuprimento propriamente dito, amplamente difundida na literatura (Bowersox e Closs, 2001), como mostram as equações (2.65) e (2.66).

$$\sigma_{a_j} = \sqrt{L_{a_j} \sigma_{D_{a_j}}^2 + \sigma_{L_{a_j}}^2 D_{a_j}^2}, \quad (2.65)$$

$$\sigma_{b_i} = \sqrt{L_{b_i} \sigma_{D_{b_i}}^2 + \sigma_{L_{b_i}}^2 D_{b_i}^2}, \quad (2.66)$$

onde:

σ_{a_j} = desvio-padrão da demanda durante o lead-time de ressuprimento no armazém centralizado j ,

σ_{b_i} = desvio-padrão da demanda durante o lead-time de ressuprimento no armazém descentralizado i ,

L_{a_j} = lead-time médio de ressuprimento no armazém centralizado j ,

L_{b_i} = lead-time médio de ressuprimento no armazém descentralizado i ,

$\sigma_{L_{a_j}}$ = desvio-padrão do lead-time de ressuprimento no armazém centralizado j ,

$\sigma_{L_{b_i}}$ = desvio-padrão do lead-time de ressuprimento no armazém descentralizado i ,

D_{a_j} = demanda média no armazém centralizado j ,

D_{b_i} = demanda média no armazém descentralizado i ,

$\sigma_{D_{a_j}}$ = desvio-padrão da demanda no armazém centralizado j ,

$\sigma_{D_{b_i}}$ = desvio-padrão da demanda no armazém descentralizado i .

Em seguida, para se calcular a média e o desvio-padrão da demanda alocada ao armazém centralizado j durante o *lead-time*, os autores introduziram uma nova variável, que é a proporção da demanda que é transferida dos armazéns descentralizados para aquele centralizado, representada por W_{ij} . Eles, então, redefiniram D_{a_j} em função de W_{ij} como mostrado na equação (2.67), considerando que a demanda média total da rede é a mesma tanto antes quanto após a centralização.

$$D_{a_j} = \sum_{i=1}^n W_{ij} D_{b_i} \quad \forall j, \quad (2.67)$$

onde:

W_{ij} = proporção da demanda transferida do armazém descentralizado i ao armazém centralizado j , tal que $0 \leq W_{ij} \leq 1$ e $\sum_{i=1}^n W_{ij} = 1 \forall i$.

A partir da nova variável, o desvio-padrão da demanda consolidada no armazém centralizado j $\sigma_{D_{a_j}}$ é dado pela equação (2.68). Esse desvio-padrão é uma composição dos desvios-padrão das demandas provenientes dos armazéns descentralizados i , representados por $\sigma_{D_{b_i}}$, de modo que a contribuição dada pelos diferentes $\sigma_{D_{b_i}}$ a $\sigma_{D_{a_j}}$ seja proporcional a W_{ij} .

$$\sigma_{D_{a_j}} = \sqrt{\sum_{i=1}^n W_{ij}^2 \sigma_{D_{b_i}}^2 + 2 \sum_{i=1}^n \sum_{l=1}^{i-1} W_{ij} W_{lj} \delta_{D_{b_{il}}}}, \quad (2.68)$$

$$\delta_{D_{b_{il}}} = \rho_{D_{b_{il}}} \sigma_{D_{b_i}} \sigma_{D_{b_l}}, \quad (2.69)$$

onde:

$\delta_{D_{b_{il}}}$ = covariância da demanda entre os armazéns descentralizados i e l ,

$\rho_{D_{b_{il}}}$ = correlação entre as demandas dos armazéns descentralizados i e l .

Evers e Beier (1993) substituíram, então, as equações (2.67) e (2.68) na equação (2.65) para determinar o desvio-padrão da demanda alocada ao armazém centralizado j durante o *lead-time*:

$$\sigma_{a_j} = \sqrt{L_{a_j} \left(\sum_{i=1}^n W_{ij}^2 \sigma_{D_{b_i}}^2 + 2 \sum_{i=1}^n \sum_{l=1}^{i-1} W_{ij} W_{lj} \delta_{D_{b_{il}}} \right) + \sigma_{L_{a_j}}^2 \left(\sum_{i=1}^n W_{ij} D_{b_i} \right)^2}. \quad (2.70)$$

Os estoques de segurança nos armazéns centralizados e descentralizados foram definidos por Evers e Beier (1993), respectivamente, como mostrado nas equações (2.71) e (2.72).

$$SS_{a_j} = k_{a_j} \sqrt{L_{a_j} \left(\sum_{i=1}^n W_{ij}^2 \sigma_{D_{b_i}}^2 + 2 \sum_{i=1}^n \sum_{l=1}^{i-1} W_{ij} W_{lj} \delta_{D_{b_{il}}} \right) + \sigma_{L_{a_j}}^2 \left(\sum_{i=1}^n W_{ij} D_{b_i} \right)^2}, \quad (2.71)$$

$$SS_{b_i} = k_{b_i} \sqrt{L_{b_i} \sigma_{D_{b_i}}^2 + D_{b_i}^2 \sigma_{L_{b_i}}^2}, \quad (2.72)$$

onde:

k_{a_j} = fator de segurança que reflete o nível de proteção em relação aos stock-outs,

ou seja, o nível de serviço no armazém centralizado j ,

k_{b_i} = fator de segurança que reflete o nível de proteção em relação aos stock-outs,

ou seja, o nível de serviço no armazém descentralizado i .

O Efeito Portfolio foi, finalmente, definido pelos autores de acordo com a equação (2.73):

$$PE = 1 - \frac{\sum_{j=1}^m SS_{a_j}}{\sum_{i=1}^n SS_{b_i}}, \quad (2.73)$$

onde:

SS_{a_j} = estoque de segurança na instalação centralizada j ,

SS_{b_i} = estoque de segurança na instalação descentralizada i .

Substituindo as equações (2.71) e (2.72) na equação (2.73) obtém-se a versão estendida do Efeito Portfolio:

$$PE = 1 - \frac{\sum_{j=1}^m k_{a_j} \sqrt{L_{a_j} \left(\sum_{i=1}^n W_{ij}^2 \sigma_{D_{b_i}}^2 + 2 \sum_{i=1}^n \sum_{l=1}^{i-1} W_{ij} W_{lj} \delta_{D_{b_{il}}} \right) + \sigma_{L_{a_j}}^2 \left(\sum_{i=1}^n W_{ij} D_{b_i} \right)^2}}{\sum_{i=1}^n k_{b_i} \sqrt{L_{b_i} \sigma_{D_{b_i}}^2 + D_{b_i}^2 \sigma_{L_{b_i}}^2}}, \quad (2.74)$$

Evers e Beier (1993) então utilizaram o modelo estendido e as premissas de Maister (1976) para maximizar o Efeito Portfolio em uma centralização de n para m armazéns, onde $m < n$. Os autores mostraram que a redução dos estoques de segurança é uma função de $1/n$ somente. Além disso, a máxima redução se dá quando as demandas dos n armazéns descentralizados são igualmente distribuídas entre os m armazéns centralizados, como mostra a equação (2.75).

$$W_{ij} = \frac{1}{m} \quad \forall i, j. \quad (2.75)$$

Tallon (1993) apresentou uma formulação do Efeito Portfolio que também levava em conta as correlações entre as demandas atendidas pelos armazéns, assim como as incertezas na demanda e no *lead-time* de ressuprimento. O autor definiu o desvio-padrão da demanda durante o *lead-time* no armazém centralizado de acordo com a equação (2.76) abaixo (adaptado de Evers e Beier, 1998).

$$\sigma_{DL_a} = \sqrt{\sum_{i=1}^n \sigma_{DL_{b_i}}^2 + 2 \sum_{i=1}^n \sum_{l=1}^{i-1} \left(\rho_{DL_{b_{il}}} \prod_{j=i,l} \sigma_{DL_{b_j}}^2 \right)}, \quad (2.76)$$

onde:

$\sigma_{DL_{b_i}}$ = desvio-padrão da demanda durante o *lead-time* no armazém descentralizado i ,

$\rho_{DL_{b_{il}}}$ = correlação entre as demandas durante o *lead-time* dos armazém descentralizados i e l .

O autor então definiu o desvio-padrão da demanda durante o *lead-time* nos armazéns descentralizados conforme a equação (2.77):

$$\sigma_{DL_{b_i}} = \sqrt{L_{b_i} \sigma_{D_{b_i}}^2 + \sigma_{L_{b_i}}^2 D_{b_i}^2}, \quad (2.77)$$

onde:

D_{b_i} = demanda média no armazém descentralizado i ,

L_{b_i} = *lead-time* médio no armazém descentralizado i ,

$\sigma_{D_{b_i}}$ = desvio-padrão da demanda no armazém descentralizado i ,

$\sigma_{L_{b_i}}$ = desvio-padrão do lead-time no armazém descentralizado i .

Tallon (1993), então, define o Efeito Portfolio como sendo:

$$PE = 1 - \frac{\sigma_{DL_a}}{\sum_{i=1}^n \sigma_{DL_{b_i}}} . \quad (2.78)$$

Ao substituir as equações (2.76) e (2.77) na equação (2.78), obtém-se a forma estendida do Efeito Portfolio proposta por Tallon (1993):

$$PE = 1 - \frac{k \sqrt{\sum_{i=1}^n L_{b_i} \sigma_{D_{b_i}}^2 + \sum_{i=1}^n D_{b_i}^2 \sigma_{L_{b_i}}^2 + 2 \sum_{i=1}^n \sum_{l=1}^{i-1} \left(\rho_{DL_{b_{il}}} \prod_{j=i,l} \sqrt{L_{b_j} \sigma_{D_{b_j}}^2 + D_{b_j}^2 \sigma_{L_{b_j}}^2} \right)}}{k \sum_{i=1}^n \sqrt{L_{b_i} \sigma_{D_{b_i}}^2 + D_{b_i}^2 \sigma_{L_{b_i}}^2}} , \quad (2.79)$$

onde:

k = fator de segurança que reflete o nível de proteção em relação aos stock-outs, ou seja, o nível de serviço.

Nota-se que Tallon (1993) adotou duas fortes premissas no cálculo do desvio-padrão da demanda durante o *lead-time* no armazém centralizado. Na primeira delas, o autor assume implicitamente que o *lead-time* no armazém centralizado é uma função dos *lead-times* dos armazéns descentralizados, e não uma função de suas próprias características operacionais. Na segunda premissa, Tallon (1993) assume que é possível se determinar, e utiliza em seu modelo, a correlação entre as demandas dos armazéns descentralizados durante o *lead-time*. Além disso, em vez de utilizar a demanda nos armazéns descentralizados, o autor utiliza a demanda durante o *lead-time* nos mesmos. De acordo com Evers e Beier (1998), as premissas utilizadas por Tallon (1993) em seu modelo não são facilmente aplicáveis ou observáveis na prática, sendo conseqüentemente pouco realistas.

Evers e Beier (1998) compararam as formulações desenvolvidas por Tallon (1993) e Evers e Beier (1993), realizando também análises de sensibilidade no intuito de verificar os efeitos da demanda e do *lead-time*, juntamente com suas variabilidades, nas economias decorrentes da centralização dos estoques de segurança. Eles mostraram que o valor do Efeito Portfólio é uma função da demanda média e sua variabilidade, sendo a demanda um importante fator na decisão de quais itens devem ser centralizados. Já a diferença do valor do Efeito Portfolio entre as possíveis localizações para o estoque centralizado é uma função do *lead-time* de ressuprimento e sua variabilidade, sendo o *lead-time* um importante fator na escolha do local para a centralização. Evers e Beier (1998) sugeriram que, sempre que possível, os estoques devem ser centralizados no armazém que apresenta o menor *lead-time* médio e a menor variabilidade do *lead-time*.

Tyagi e Das (1998) desenvolveram uma formulação para a centralização dos estoques de segurança em um número m qualquer de armazéns centralizados, onde $m < n$ e n é o número total de armazéns na rede, de modo a maximizar as economias com os estoques. Os autores adicionalmente consideraram que as demandas dos consumidores têm variâncias diferentes. Para isso, Tyagi e Das (1998) inicialmente assumiram que todas as demandas alocadas aos armazéns descentralizados eram independentes e que os *lead-times* e os valores de k para os estoques de segurança eram conhecidos e iguais para todos os armazéns após a centralização. Os autores definiram a variância da demanda total alocada ao armazém centralizado j ($Var[D_j]$) e a variância da demanda total alocada ao mesmo armazém durante o *lead-time* ($Var_{LT}[D_j]$), respectivamente, como mostram as equações (2.80) e (2.81).

$$Var[D_j] = \sum_{i=1}^n W_{ij}^2 \sigma_i^2, \quad (2.80)$$

$$Var_{LT}[D_j] = L \times Var(D_j), \quad (2.81)$$

onde:

σ_i^2 = variância da demanda na localidade descentralizada i ,

W_{ij} = proporção da demanda transferida da localidade descentralizada i para a localidade centralizada j ,

L = *lead-time* de ressuprimento.

Em seguida, Tyagi e Das (1998) definiram os estoques de segurança agregados nos armazéns centralizados (SS_c) e descentralizados (SS_d), para um mesmo fator de segurança k , como mostram as equações (2.82) e (2.83), respectivamente.

$$SS_c = \sum_{j=1}^m k\sqrt{L}\sqrt{\text{Var}(D_j)} = k\sqrt{L}\sum_{j=1}^m \sqrt{\sum_{i=1}^n W_{ij}^2 \sigma_i^2}, \quad (2.82)$$

$$SS_d = k\sqrt{L}\sum_{i=1}^n \sqrt{\sigma_i^2} = k\sqrt{L}\sum_{i=1}^n \sigma_i, \quad (2.83)$$

onde:

$k =$ fator de segurança que reflete o nível de proteção em relação aos stock-outs, ou seja, o nível de serviço.

Finalmente, os autores definiram o Efeito Portfólio conforme a equação (2.84), para demonstrar em seguida qual era o W_{ij} que o maximizava.

$$PE = 1 - \frac{SS_c}{SS_d} = 1 - \frac{k\sqrt{L}\sum_{j=1}^m \sqrt{\sum_{i=1}^n W_{ij}^2 \sigma_i^2}}{k\sqrt{L}\sum_{i=1}^n \sigma_i} = 1 - \frac{\sum_{j=1}^m \sqrt{\sum_{i=1}^n W_{ij}^2 \sigma_i^2}}{\sum_{i=1}^n \sigma_i}. \quad (2.84)$$

Tyagi e Das (1998) então minimizaram $\sum_{j=1}^m \sqrt{\sum_{i=1}^n W_{ij}^2 \sigma_i^2}$ para mostrar que o Efeito Portfólio é maximizado quando os armazéns centralizados, ou localidades centralizadas, fornecem a mesma fração da demanda a todos os mercados, ou localidades descentralizadas, a eles alocados (não necessariamente igual a $1/m$) de tal forma que:

$$W_{1j} = W_{2j} = \dots = W_{mj} = a_j \quad \forall j, \text{ com } 0 \leq a_j \leq 1 \text{ e } \sum_{j=1}^m a_j = 1. \quad (2.85)$$

Finalmente, a dupla de autores mostrou que economias máximas podem ser alcançadas sem se restringirem o número e tamanho dos armazéns centralizados, utilizando-se a regra mostrada em (2.85). Considerando-se PE^* o Efeito Portfólio maximizado, tem-se que:

$$\begin{aligned}
PE^* &= 1 - \frac{\sum_{j=1}^m \sqrt{\sum_{i=1}^n W_{ij}^2 \sigma_i^2}}{\sum_{i=1}^n \sigma_i}, \\
PE^* &= 1 - \frac{\sum_{j=1}^m \sqrt{\sum_{i=1}^n a_j \sigma_i^2}}{\sum_{i=1}^n \sigma_i}, \\
PE^* &= 1 - \frac{\sum_{j=1}^m a_j \sqrt{\sum_{i=1}^n \sigma_i^2}}{\sum_{i=1}^n \sigma_i}, \\
PE^* &= 1 - \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n \sigma_i^2}}{\sum_{i=1}^n \sigma_i}, \quad \text{já que } \sum_{j=1}^m a_j = 1.
\end{aligned} \tag{2.86}$$

Uma vez que PE^* não depende de m na equação (2.86), os ganhos máximos com o Efeito Portfolio não dependem do número de armazéns centralizados, contanto que os armazéns centralizados forneçam a mesma fração da demanda a todos os mercados a eles alocados.

3.3.3.2 Efeito de Consolidação (*Consolidation Effect*): Incorporando os Estoques de Ciclo ao Efeito Portfolio

Evers (1995) integrou os estoques de ciclo à análise de centralização de estoques, reexaminando e ampliando a formulação do Efeito Portfolio de Evers e Beier (1993). O autor definiu então o Efeito de Consolidação (*CE*) como a redução percentual no estoque total médio devida à centralização dos estoques de ciclo e de segurança. Ele então se baseou nas mesmas premissas utilizadas por Evers e Beier (1993), ou seja:

- Não há transferências de produtos entre os armazéns, seja antes ou depois da centralização;
- Todos os armazéns, seja antes ou depois da centralização, apresentam o mesmo fator de segurança k que especifica o nível de serviço;

- As demandas e os *lead-times* são variáveis aleatórias independentes e normalmente distribuídas;
- Não há correlação entre demandas;
- Não há correlação entre *lead-times*;
- A demanda média da rede continua a mesma após a centralização.

Em seguida, Evers (1995) definiu o CE como mostrado na equação (2.87):

$$CE = 1 - \frac{\sum_{j=1}^m \left(\frac{1}{2} CS_{a_j} + SS_{a_j} \right)}{\sum_{i=1}^n \left(\frac{1}{2} CS_{b_i} + SS_{b_i} \right)}, \quad (2.87)$$

onde:

CS_{a_j} = estoque de ciclo no armazém centralizado j ,

CS_{b_i} = estoque de ciclo no armazém descentralizado i ,

SS_{a_j} = estoque de segurança no armazém centralizado j , cf. equação (2.71),

SS_{b_i} = estoque de segurança no armazém descentralizado i , cf. equação (2.72).

Para a determinação de CS_{a_j} e CS_{b_i} o autor se baseou no modelo do *LEC* e *PP*. Lembrando-se que D_{a_j} é definido em função de W_{ij} como mostrado na equação (2.67) e considerando que a demanda média total da rede é a mesma tanto antes quanto após a centralização, tem-se:

$$CS_{a_j} = \sqrt{\frac{2A_{a_j} D_{a_j}}{C_{a_j}}} = \sqrt{\frac{2A_{a_j} \sum_{i=1}^n W_{ij} D_{b_i}}{C_{a_j}}}, \quad (2.88)$$

$$CS_{b_i} = \sqrt{\frac{2A_{b_i} D_{b_i}}{C_{b_i}}}, \quad (2.89)$$

onde:

A_{a_j} = custo de colocação de pedido no armazém centralizado j ,

A_{b_i} = custo de colocação de pedido no armazém descentralizado i ,

C_{a_j} = custo unitário de manutenção de estoques no armazém centralizado j ,

C_{b_i} = custo unitário de manutenção de estoques no armazém descentralizado i ,

D_{a_j} = demanda média no armazém centralizado j ,

D_{b_i} = demanda média no armazém descentralizado i ,

W_{ij} = proporção da demanda média transferida da localidade descentralizada i à localidade centralizada j tal que $0 \leq W_{ij} \leq 1$ e $\sum_{j=1}^m W_{ij} = 1 \forall i$.

Substituindo as equações (2.71), (2.72), (2.88) e (2.89) na equação (2.87), obtém-se o CE de Evers (1995):

$$CE = 1 - \frac{\sum_{j=1}^m \left[\frac{1}{2} \sqrt{\frac{2A_{a_j} \sum_{i=1}^n W_{ij} D_{b_i}}{C_{a_j}}} + k_{a_j} \sqrt{L_{a_j} \left(\sum_{i=1}^n W_{ij}^2 \sigma_{D_{b_i}}^2 + 2 \sum_{i=1}^n \sum_{l=1}^{i-1} W_{ij} W_{il} \delta_{D_{b_i l}} \right) + \sigma_{L_{a_j}}^2 \left(\sum_{i=1}^n W_{ij} D_{b_i} \right)^2} \right]}{\sum_{i=1}^n \left(\frac{1}{2} \sqrt{\frac{2A_{b_i} D_{b_i}}{C_{b_i}}} + k_{b_i} \sqrt{L_{b_i} \sigma_{D_{b_i}}^2 + D_{b_i}^2 \sigma_{L_{b_i}}^2} \right)}. \quad (2.90)$$

O autor em seguida empregou as premissas utilizadas por Maister (1976) para maximizar, nessas condições, o Efeito Consolidação em uma centralização de n para m armazéns, onde $m < n$. Evers (1995) mostrou que a máxima redução se dá quando as demandas dos n armazéns descentralizados são igualmente distribuídas entre os m armazéns centralizados, como mostra a equação (2.91), idêntica à encontrada por Evers e Beier (1993):

$$W_{ij} = \frac{1}{m} \quad \forall i, j. \quad (2.91)$$

Wanke (2009) estendeu a validade do Efeito de Consolidação de Evers (1995), tomando como ponto de partida a regra de alocação ótima de Tyagi e Das (1998), aos casos onde os mercados apresentam diferentes demandas e correlações entre as mesmas, assim como diferentes *lead-*

times de ressuprimento dos armazéns (médias e desvios-padrão). A prova da extensão do modelo foi realizada em uma rede com dois armazéns e dois mercados. Wanke (2009) ainda determinou analiticamente as variáveis e *trade-offs* mais relevantes para o Efeito de Consolidação no caso estudado, confirmando-os por meio de análise de sensibilidade. Ainda por meio de análise de sensibilidade, o autor avaliou o impacto da centralização dos estoques nos custos totais da rede (custos de manutenção dos estoques, custo de distribuição e de colocação de pedidos).

De acordo com os resultados encontrados por Wanke (2009), o Efeito de Consolidação é maximizado quando ambos os estoques de ciclo e segurança são centralizados em um único armazém e quando a regra de alocação de estoque derivada de Tyagi e Das (1998) é utilizada. Além disso, o autor mostrou que a variável mais relevante para o Efeito de Consolidação no caso estudado é a relação entre os desvios-padrão dos *lead-times* de ressuprimento dos armazéns, sendo que os estoques devem ser centralizados no armazém que possui o menor desvio-padrão do *lead-time*.

3.3.3.3 Incorporação Simplificada dos Efeitos de Centralização nos Modelos de Localização de Instalações

A presente seção apresenta como a teoria relativa à centralização dos estoques mostrada nas seções 3.3.3.1 e 3.3.3.2 foi incorporada de maneira simplificada a alguns modelos de localização de instalações que empregam otimização por meio de programação matemática.

Mahmoud (1992) desenvolveu um modelo para determinar um esquema ótimo de centralização baseando-se no *Portfolio Quantity Effect* (cf. seção 3.3.3.1). De acordo com o autor, as condições nas quais uma centralização total (um único armazém na rede após a centralização) é melhor, pior ou equivalente a várias sub-centralizações (mais que um armazém na rede após a centralização) não podem ser explicitamente derivadas, pois são complexas funções de M_{ij} , ρ_{ij} e SS_i (cf. seção 3.3.3.1). Para lidar com essa complexidade, Mahmoud (1992) desenvolveu o conceito de *Portfolio Cost Effect* (PCE_i), que mede a redução do custo total da rede de distribuição decorrente da centralização. O PCE_i é composto de quatro elementos principais decorrentes da centralização, mostrados na equação (2.92):

$$PCE_i = PHCE_i + PTCE_i + PICE_i + PPCE_i, \quad (2.92)$$

onde:

$PHCE_I = \text{Portfolio Holding Cost Effect}$: redução no custo de manutenção de estoques na rede,

$PTCE_I = \text{Portfolio Transportation Cost Effect}$: redução no custo de transporte na rede,

$PICE_I = \text{Portfolio Investment Cost Effect}$: investimento necessário para que a centralização seja realizada,

$PPCE_I = \text{Portfolio Procurement Cost Effect}$: redução nos custos de colocação de pedido e ganhos de escala na compra ou produção em maiores volumes.

Dessa maneira, para cada centralização I' é necessário se medir o *Portfolio Cost Effect* $PCE_{I'}^r$, como mostrado na equação (2.93), para cada possível localidade r do armazém centralizado, sendo $r \in I'$:

$$PCE_{I'}^r = PHCE_{I'}^r + PTCE_{I'}^r + PICE_{I'}^r + PPCE_{I'}^r, \quad (2.93)$$

O $PHCE_{I'}^r$ se relaciona com o *Portfolio Quantity Effect* como mostra a equação (2.94):

$$PHCE_{I'}^r = \left[\sum_{i \in I'} h_i SS_i \right] - \left[h_r (1 - PQE_{I'}) \left(\sum_{i \in I'} SS_i \right) \right], \quad (2.94)$$

onde:

$h_i = \text{custo unitário de manutenção de estoque no armazém } i$,

$h_r = \text{custo unitário de manutenção de estoque no armazém centralizado } r$,

$SS_i = \text{estoque de segurança no armazém } i$.

No caso geral onde $2 \leq m \leq n$, a quantidade total de combinações de $PCE_{I'}^r$ a ser analisada é

igual a $\sum_{m=2}^n m C_m^n$. Essa quantidade de combinações pode ser reduzida para $\sum_{m=2}^n C_m^n$ escolhendo-

se a localização do armazém centralizado que dá o máximo $PCE_{I'}^*$ para cada centralização I' ,

ou seja, $PCE_{I'}^* = \text{Max}_r(PCE_{I'}^r)$. O problema de otimização pode ser então definido pela seguinte notação:

i = índice de um armazém na rede,

I = conjunto de todos os armazéns da rede,

n = número total de armazéns na rede, $i \in I = \{1, \dots, n\}$,

I' = subconjunto dos armazéns I a serem consolidados, $I' \subset I$, $|I'| = m$, $2 \leq m \leq n$,

k = índice de uma possível consolidação,

CP = conjunto de todas as possíveis consolidações, $CP = \{I'_1, I'_2, \dots, I'_k, \dots, I'_N\}$,

N = número total de possíveis consolidações indexadas por k , $|CP| = N = \sum_{m=2}^n C_m^n$,

S = esquema de consolidação ótimo, $S \subset CP$.

O problema de otimização é dado pela equação (2.95):

$$\text{Encontrar } S \text{ que Maximiza } \sum_k^{I' \in C} PCE_{I'}^* \quad (2.95)$$

sujeito às seguintes restrições:

$$\bigcup_{I'_k \in S} I'_k = I, \quad (2.96)$$

$$I'_i \cap I'_j = \emptyset \quad \forall I'_i, I'_j \in S. \quad (2.97)$$

Segundo Mahmoud (1992), esse problema é similar ao problema de partição de conjuntos, bastante difundido na literatura.

Das e Tyagi (1999), mostrando situações nas quais o Efeito Portfolio é favorecido por sub-centralizações, desenvolveram um modelo de programação não-linear para a alocação de estoques aos mercados consumidores a fim de maximizar o Efeito Portfólio. Para isso, os autores consideraram as correlações entre as demandas dos mercados. Eles ressaltaram que quando mercados apresentando demandas com correlações positivas são alocados a um mesmo armazém, o nível do estoque de segurança agregado necessariamente aumenta. Ao contrário, se as correlações são negativas, o nível do estoque de segurança agregado diminui.

Assim, economias podem ser conseguidas se dois princípios genéricos forem seguidos. Em primeiro lugar, deve-se evitar que mercados com fortes correlações positivas sejam alocados a um determinado armazém. Em segundo lugar, os grupos devem ser formados de modo que os mercados consumidores apresentem correlações positivas e negativas, fazendo com que a variância total do grupo diminua. Matematicamente, o modelo de alocação proposto por Das e Tyagi (1999) é definido de acordo com a seguinte notação:

i = índice de um grupo de consumidores,

n = número de grupos de consumidores,

j = índice de um mercado consumidor,

d_j = demanda do consumidor j ,

$E(d_j) = \mu_j$ = demanda média do consumidor j ,

$Var(d_j) = \sigma_j^2$ = variância da demanda do consumidor j ,

r_{jk} = correlação entre as demandas d_j do consumidor j e d_k do consumidor k ,

L = lead-time de ressurgimento,

k = fator de segurança que reflete o nível de proteção em relação aos stock-outs, ou seja, o nível de serviço,

D_i = demanda agregada do grupo de consumidores i ,

$Var(D_i) = \sum_j z_{ij}^2 \sigma_j^2 + 2 \sum_j \sum_{k>j} z_{ij} z_{ik} r_{jk} \sigma_j \sigma_k$ = variância da demanda agregada do grupo de consumidores i .

A variável de decisão do modelo proposto por Das e Tyagi (1999) é tal que:

$$z_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{se o grupo } i \text{ inclui o consumidor } j, \\ 0 & \text{caso contrário.} \end{cases}$$

O problema de programação não-linear inteira tem a seguinte função-objetivo:

$$\text{Minimizar } k \sqrt{L} \sum_i \sqrt{\sum_j z_{ij}^2 \sigma_j^2 + 2 \sum_j \sum_{k>j} z_{ij} z_{ik} r_{jk} \sigma_j \sigma_k}, \quad (2.98)$$

sujeita à seguinte restrição:

$$\sum_{i=1}^n z_{ij} = 1 \quad \forall j. \quad (2.99)$$

O objetivo da equação (2.98) é minimizar os estoques de segurança para todos os grupos i de consumidores. A restrição (2.99) garante que os consumidores pertençam a somente um grupo.

Croxton e Zinn (2005) propuseram um modelo para a incorporação dos custos de manutenção dos estoques de segurança nos problemas de localização de armazéns que assume um conjunto pré-determinado de possíveis localidades para a instalação dos mesmos. A inclusão dos custos com a manutenção dos estoques de segurança se baseia na Regra da Raiz Quadrada. Mais precisamente, é calculado o custo de manutenção dos estoques de segurança para o caso de centralização em uma única instalação. Na otimização, esse custo é multiplicado pela raiz quadrada do número de instalações presentes, o que transforma o custo em uma função discreta, eliminando a não-linearidade da função objetivo. O modelo considera ainda os custos com transporte e custos de manutenção dos armazéns sem, entretanto, considerar a capacidade destes últimos. Matematicamente, o problema é definido a partir da seguinte notação:

m = número total de fábricas,

n = número total de potenciais localidades para os armazéns,

p = número total de mercados consumidores,

r = número total de classes de produtos,

s = número de armazéns na rede, $s = \{1, \dots, n\}$,

i = índice de uma potencial localidade para uma fábrica, $i = \{1, \dots, m\}$,

j = índice de uma potencial localidade para um armazém, $j = \{1, \dots, n\}$,

k = índice de um consumidor, $k = \{1, \dots, p\}$,

h = índice de uma classe de produtos, $h = \{1, \dots, r\}$,

$SS_1^h = k^h \sqrt{(\sigma_d^h)^2}$ = estoque de segurança total da classe de produtos h na rede se os estoques estão centralizados em um único armazém,

k^h = fator de segurança que reflete o nível de proteção em relação aos stock-outs da classe de produtos h , ou seja, o nível de serviço,

σ_d^h = desvio-padrão das demandas pela classe de produtos h ,

$SS_s^h = SS_1^h \sqrt{s}$ = estoque de segurança total da classe de produtos h na rede se os estoques estão descentralizados em s armazéns,

F_j = custos fixos de operação do armazém j ,

T_{ij} = custos unitários de transporte entre fábrica i armazém j ,

T_{jk} = custos unitários de transporte entre armazém j e mercado k ,

C_i^h = capacidade de produção da classe de produtos h na fábrica i ,

D_k^h = demanda do consumidor k pela classe de produtos h ,

$I_s^h = SS_s^h$ = custo de manutenção de estoques da classe de produtos h em s armazéns.

O modelo proposto por Croxton e Zinn (2005) tem como variáveis de decisão:

V_{ij}^h = unidades do produto h enviadas da fábrica i ao armazém j ,

X_{jk}^h = unidades do produto h enviadas do armazém j ao mercado consumidor k ,

$Y_j = \begin{cases} 1 & \text{se a localidade } j \text{ receberá um armazém,} \\ 0 & \text{caso contrário,} \end{cases}$

$Y_j^h = \begin{cases} 1 & \text{se o armazém aberto na localidade } j \text{ armazenará a classe de produtos } h, \\ 0 & \text{caso contrário,} \end{cases}$

$W_s^h = \begin{cases} 1 & \text{se } s \text{ armazéns são usados para armazenar a classe de produtos } h, \\ 0 & \text{caso contrário.} \end{cases}$

A função-objetivo do modelo de programação linear inteira-mista é dada pela equação (2.100):

$$\text{Minimizar } \sum_{j=1}^n F_j Y_j + \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \sum_{h=1}^r T_{ij} V_{ij}^h + \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^p \sum_{h=1}^r T_{jk} X_{jk}^h + \sum_{s=1}^n \sum_{h=1}^r I_s^h W_s^h, \quad (2.100)$$

sujeita às seguintes restrições:

$$\sum_{i=1}^m V_{ij}^h = \sum_{k=1}^p X_{jk}^h \quad \forall j, h, \quad (2.101)$$

$$\sum_{i=1}^m V_{ij}^h \leq C_i^h \quad \forall j, h, \quad (2.102)$$

$$\sum_{k=1}^p X_{jk}^h \geq D_k^h \quad \forall k, h, \quad (2.103)$$

$$V_{ij}^h \leq C_i^h Y_j^h \quad \forall i, j, h, \quad (2.104)$$

$$X_{jk}^h \leq D_k^h Y_j^h \quad \forall j, k, h, \quad (2.105)$$

$$Y_j^h \leq Y_j \quad \forall j, h, \quad (2.106)$$

$$\sum_{s=1}^n W_s^h = 1 \quad \forall h, \quad (2.107)$$

$$\sum_{j=1}^n Y_j^h = \sum_{s=1}^n s W_s^h \quad \forall h, \quad (2.108)$$

onde:

$F_j Y_j$ = custo fixo total de operação do armazém j ,

$T_{ij} V_{ij}^h$ = custo total de transporte do produto h da fábrica i ao armazém j ,

$T_{jk} X_{jk}^h$ = custo total de transporte do produto h do armazém j ao mercado consumidor k ,

$I_s^h W_s^h$ = custo total de manutenção do estoque de segurança do produto h em s armazéns (função discreta já que W_s^h é uma variável binária).

As restrições (2.101) a (2.104) mantêm o equilíbrio do fluxo de produtos enquanto a demanda dos consumidores é atendida sem exceder a capacidade das fábricas. Já as restrições (2.105) e (2.106) asseguram que somente haverá fluxo de entrada e saída em um armazém se o mesmo estiver aberto. Em seguida, as restrições (2.107) e (2.108) definem as variáveis W_s^h para que o estoque de segurança seja corretamente calculado. Por sua vez, restrição (2.107) garante que apenas uma configuração de centralização com s armazéns será escolhida para cada classe de produtos h . A restrição (2.108), finalmente, garante que haverá exatamente s armazéns armazenando a classe de produtos h .

A simplificação para inclusão dos custos de manutenção de estoques baseada na Regra da Raiz Quadrada é, na visão de Croxton e Zinn (2005), o atrativo do modelo proposto. No entanto, de

acordo com Silva (2006), o modelo desconsidera justamente as relações não-lineares que podem gerar maior precisão nos problemas de localização.

3.3.3.4 Incorporação Não-Simplificada dos Efeitos de Centralização nos Modelos de Localização de Instalações

A presente seção apresenta como a teoria relativa à centralização dos estoques mostrada nas seções 3.3.3.1 e 3.3.3.2 foi incorporada de maneira não-simplificada a alguns modelos de localização de instalações que empregam otimização realizada por meio de programação matemática.

Uma tentativa de incorporar o comportamento não-linear dos estoques de segurança nos problemas de localização foi apresentada por Ballou (1984), com o modelo chamado *DISPLAN*. A solução quase-ótima era encontrada através de um método heurístico, devido às dificuldades de identificação de mínimos globais, inerentes aos problemas com funções-objetivo não-lineares.

Das e Tyagi (1997), em seu trabalho sobre centralização de instalações, desenvolveram um modelo que incorpora simultaneamente os estoques de ciclo e de segurança para determinar o número, a localização e a capacidade de instalações, juntamente com a alocação dos mercados consumidores às instalações. Os autores defendiam que nem a Regra da Raiz Quadrada nem o Efeito Portfólio eram adequados para responder a tais questões. A resolução do modelo consistia na minimização do custo total da rede, composto pelo custo de colocação de pedidos, pelo custo de manutenção dos estoques de ciclo e de segurança e pelo custo de transporte, assumindo que havia um conjunto pré-determinado de possíveis localidades para as instalações e que cada mercado era atendido por somente uma instalação. A política de estoques da rede era baseada no modelo de *LEC* e *PP*. O problema era matematicamente definido pela seguinte notação:

i = índice de um armazém na rede,

j = índice de um mercado consumidor na rede,

d_j = demanda do mercado consumidor j ,

$E(d_j) = \mu_j$ = demanda média do mercado consumidor j ,

$Var(d_j) = \sigma_j^2 =$ variância do mercado consumidor j ,

$t_{ij} =$ custo unitário de transporte do armazém i ao mercado consumidor j ,

$H =$ custo unitário de manutenção de estoque,

$F =$ custo de colocação de pedido feito pelo armazém à fábrica,

$L =$ lead-time de ressurgimento do armazém (em semanas),

$(1-\alpha) =$ nível de serviço desejado nos armazéns,

$Z_\alpha =$ número de desvios-padrão da distribuição normal correspondente ao nível de serviço $(1-\alpha)$ desejado,

$D_i =$ demanda semanal agregada de todos os mercados consumidores atendidos pelo armazém i (variável aleatória),

$\bar{D}_i = E(D_i) = \sum_j x_{ij} \mu_j =$ demanda semanal agregada média de todos os mercados consumidores atendidos pelo armazém i ,

$Var(D_i) = \sum_j x_{ij} \sigma_j^2 =$ variância da demanda semanal agregada de todos os mercados consumidores atendidos pelo armazém i ,

$Q_i = \sqrt{\frac{2\bar{D}_i F}{H}} = \sqrt{2F/H} \sqrt{\sum_j x_{ij} \mu_j} =$ LEC para o armazém i ,

$OC =$ custo agregado de colocação de pedido $= F \sum_i \frac{\bar{D}_i}{Q_i} = \sqrt{2F/H} \sum_i \sqrt{\sum_j x_{ij} \mu_j}$,

$CC =$ custo agregado de manutenção do estoque de ciclo $= H \sum_i \frac{Q_i}{2} = \sqrt{2F/H} \sum_i \sqrt{\sum_j x_{ij} \mu_j}$,

$SC =$ custo agregado de manutenção do estoque de segurança $=$

$$HZ_\alpha \sqrt{L} \sum_i \sqrt{Var(D_i)} = HZ_\alpha \sqrt{L} \sum_i \sqrt{\sum_j x_{ij} \sigma_j^2},$$

$LC =$ custo agregado de transporte $= \sum_i \sum_j x_{ij} \mu_j t_{ij}$,

A variável de decisão do modelo proposto por Das e Tyagi (1997) é dada por:

$$x_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{se o armazém } i \text{ atende o mercado consumidor } j, \\ 0 & \text{caso contrário.} \end{cases}$$

O problema de otimização tem como função-objetivo:

Minimizar $CT = OC + CC + SC + LC$, isto é,

$$2\sqrt{2F/H} \sum_i \sqrt{\sum_j x_{ij} \mu_j} + HZ_\alpha \sqrt{L} \sum_i \sqrt{\sum_j x_{ij} \sigma_j^2} + \sum_i \sum_j x_{ij} \mu_j t_{ij}, \quad (2.109)$$

sujeita às seguintes restrições:

$$\sum_i x_{ij} = 1 \quad \forall j, \quad (2.110)$$

$$x_{ij} = \{0,1\} \quad \forall i, j. \quad (2.111)$$

A restrição (2.110) garante que cada mercado consumidor é servido por apenas um armazém. Já a restrição (2.111) garante que a variável assumia os valores binários adequados.

Outro modelo que incorpora os custos de manutenção dos estoques de segurança foi desenvolvido por Miranda e Garrido (2004). Ele é uma extensão do modelo clássico de localização de instalações com custo fixo e capacidade e deve ser resolvido através de programação não-linear inteira-mista. Nele, um conjunto de mercados consumidores deveria ser alocado a um conjunto de armazéns. Sua resolução consistia na minimização do custo total da rede composto pelo custo fixo total das instalações, custo de manutenção do estoque de ciclo, custo de manutenção do estoque de segurança, custos de transporte e de colocação de pedidos. A política de estoques era baseada no modelo de *LEC* e *PP*. Era assumido que cada mercado consumidor seria servido por apenas um armazém e que haveria um conjunto pré-determinado de possíveis localidades para a instalação dos mesmos. Finalmente, os autores assumiam que as demandas dos diferentes consumidores não eram correlacionadas, ou seja, a correlação entre as demandas de um dado par de mercados valia zero.

A intenção dos autores era a aplicação do modelo para um grande número de possíveis pontos de localização dos armazéns e um grande número de mercados consumidores. Isso inviabilizaria a utilização de uma rotina de otimização não-linear, que poderia necessitar de um tempo muito longo na resolução do problema. Para superar esse obstáculo, Miranda e Garrido (2004) desenvolveram uma solução heurística baseada na Relaxação Lagrangeana e no Método do Subgradiente. Matematicamente, o problema é definido pela seguinte notação:

$N =$ número total de possíveis localidades para um armazém,

M = número total de consumidores,

i = índice de um possível armazém na rede, $i = \{1, \dots, N\}$,

j = índice de um consumidor, $j = \{1, \dots, M\}$,

d_j = demanda média do consumidor j ,

u_j = variância da demanda do consumidor j ,

D_i = demanda agregada no armazém i ,

U_i = variância agregada no armazém i ,

k = fator de segurança que reflete o nível de proteção em relação aos stock-outs, ou seja, o nível de serviço,

LT_i = lead-time de ressuprimento para o armazém i ,

TH = horizonte de planejamento para o qual o custo total da rede será determinado,

Cap_i = capacidade do armazém i ,

HC_i = custo unitário de manutenção estoques no armazém i ,

OC_i = custo de colocação de pedido de ressuprimento no armazém i ,

RC_i = custo unitário de transporte da fábrica ao armazém i ,

TC_{ij} = custo unitário de transporte do armazém i para o consumidor j ,

F_i = custo fixo de abertura e operação do armazém i .

As variáveis de decisão do problema são definidas como:

$$Y_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{se o armazém } i \text{ atende o mercado consumidor } j, \\ 0 & \text{caso contrário,} \end{cases}$$

$$Z_i = \begin{cases} 1 & \text{se um armazém é aberto em } i, \\ 0 & \text{caso contrário.} \end{cases}$$

O problema de programação não-linear tem como função-objetivo a equação (2.112):

$$\begin{aligned} \text{Minimizar } \sum_{i=1}^N F_i \cdot Z_i + \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M TH \cdot (TC_{ij} + RC_i) \cdot d_j \cdot Y_{ij} + \sum_{i=1}^N TH \cdot \sqrt{2 \cdot HC_i \cdot OC_i} \cdot \sqrt{D_i} + \\ \sum_{i=1}^N TH \cdot HC_i \cdot k \cdot \sqrt{LT_i} \cdot \sqrt{U_i}, \end{aligned} \quad (2.112)$$

sujeita às seguintes restrições:

$$\sum_{i=1}^N Y_{ij} = 1 \quad \forall j, \quad (2.113)$$

$$\sum_{j=1}^M d_j \cdot Y_{ij} \leq Cap_i \cdot Z_i \quad \forall i, \quad (2.114)$$

$$\sum_{j=1}^M d_j \cdot Y_{ij} = D_i \quad \forall i, \quad (2.115)$$

$$\sum_{j=1}^M Y_{ij} \cdot u_j = U_i \quad \forall i, \quad (2.116)$$

$$Z_i, Y_{ij} \in \{0,1\} \quad \forall i, j, \quad (2.117)$$

onde:

$F_i \cdot Z_i$ = custo fixo de abertura e operação do armazém aberto em i ,

$TH \cdot (TC_{ij} + RC_i) \cdot d_j \cdot Y_{ij}$ = custo de transporte da fábrica ao armazém i e do mesmo ao consumidor j ,

$TH \cdot \sqrt{2 \cdot HC_i \cdot OC_i} \cdot \sqrt{D_i}$ = custo de manutenção dos estoques de ciclo no armazém i ,

$TH \cdot HC_i \cdot k \cdot \sqrt{LT_i} \cdot \sqrt{U_i}$ = custo de manutenção dos estoques de segurança no armazém i .

A restrição (2.113) garante que cada consumidor será servido por apenas um armazém. A restrição (2.114), por sua vez, garante que a capacidade de um armazém não será excedida, quando esse armazém é aberto. Já a restrição (2.115) calcula a demanda agregada alocada a um armazém. Em seguida, a restrição (2.116) calcula a variância da demanda agregada alocada a um armazém. Finalmente, a restrição (2.117) garante que as variáveis assumam os valores binários adequados.

Na literatura brasileira, Silva (2006) apresenta em sua dissertação de mestrado uma interessante aplicação do modelo de Miranda e Garrido (2004) para a análise da rede de distribuição de uma empresa do setor siderúrgico brasileiro. Todavia, ao contrário de Miranda e Garrido (2004), Silva (2006) utilizou uma rotina comercial de otimização não-linear em vez do procedimento de Relaxação Lagrangeana, uma vez que a magnitude do problema analisado o permitia.

Tendo sido abordada nesta seção a literatura pertinente ao problema que motiva o presente estudo, a próxima seção apresentará o objetivo do mesmo. Antes disso, um resumo dos principais trabalhos mostrados na revisão é apresentado no Quadro 4.

Quadro 4 - Resumo dos principais estudos abordados na revisão de literatura.

Autores	Componente(s) da Rede Presente(s) no Estudo	Abordagem Matemática	Política de Alocação	Importância do Estudo
Harris (1913)	Estoques de Ciclo	Desenvolvimento analítico	Toda a demanda alocada ao armazém tratado	Desenvolveu o <i>LEC</i>
Hakimi (1964)	Transporte (distribuição)	Programação linear inteira	Sistemas independentes	Apresentou o modelo de P-Mediana para a localização de instalações através de programação matemática
Hakimi (1964); Garfinkel et al. (1977); Kariv e Hakimi (1979)	Transporte (distribuição)	Programação linear inteira	Sistemas independentes	Desenvolveram alguns dos trabalhos iniciais que utilizavam o modelo de minimização da máxima distância entre mercados e armazéns (MiniMax) para a localização de instalações através de programação matemática, no caso onde os armazéns podem ser localizados em qualquer posição de um espaço planar (<i>absolute center problem</i>)
Minieka (1970); Elzinga e Hearn (1972)	Custo fixo da instalação; transporte (distribuição)	Programação linear inteira	Sistemas independentes	Desenvolveram alguns dos trabalhos iniciais que utilizavam o modelo de Cobertura para localização de instalações através de programação matemática
Church e ReVelle (1974)	Transporte (distribuição)	Programação linear inteira	Sistemas independentes	Apresentaram o modelo da Máxima Cobertura para a localização de instalações através de programação matemática

Autores	Componente(s) da Rede Presente(s) no Estudo	Abordagem Matemática	Política de Alocação	Importância do Estudo
Halfin (1974); Hedetniemi et al. (1981); Farley (1982)	Transporte (distribuição)	Programação linear inteira	Sistemas independentes	Desenvolveram alguns dos trabalhos iniciais que utilizavam o modelo de minimização da máxima distância entre mercados e armazéns (MiniMax) para a localização de instalações através de programação matemática, no caso onde os armazéns podem ser localizados em posições fixadas <i>a priori</i> de um espaço planar (<i>vertex center problem</i>)
Maister (1976)	Estoques de segurança	Desenvolvimento analítico	Sistemas independentes	Concluiu que a redução nos estoques de segurança depende da relação $(m/n)^{1/2}$
Ballou (1984)	Custos fixos de operação de armazéns e fábricas; transporte (ressuprimento e distribuição); estoques de ciclo e segurança	Programação linear inteira e métodos heurísticos	Sistemas independentes	Apresentou o modelo <i>DISPLAN</i> para a localização de instalações através de programação matemática que tratava a não-linearidade dos estoques através de métodos heurísticos
Brandeau e Chiu (1984)	Dependente do estudo abordado	Dependente do estudo abordado	Dependente do estudo abordado	Realizaram uma revisão de literatura que mostrou mais de 50 tipos de problemas relacionados à localização de instalações
Zinn et al. (1989)	Estoques de segurança	Desenvolvimento analítico	Sistemas independentes	Concluíram que a relação entre as incertezas da demanda nas localidades descentralizadas (magnitude) pode ser tão relevante quando a correlação para o Efeito Portfólio
Mahmoud (1992)	Estoques de segurança	Programação linear-inteira	Sistemas independentes	Concluiu que o impacto da localidade escolhida para centralização tem um importante papel no Efeito Portfólio
Evers e Beier (1993)	Estoques de segurança	Programação não-linear	<i>Cross-filling</i> , centralização e sistemas independentes	Concluíram que a redução percentual no estoque de segurança depende somente do número de instalações descentralizadas n ($1/n$)
Tallon (1993)	Estoques de segurança	Desenvolvimento analítico	Sistemas independentes	Concluiu que existem relevantes interações entre de demanda e incertezas do <i>lead-time</i> de ressuprimento
Evers (1995)	Estoques de ciclo e segurança	Programação não-linear	<i>Cross-filling</i> , centralização e sistemas independentes	Concluiu que o Efeito de Consolidação é maximizado quando as demandas das instalações descentralizadas n são igualmente divididas entre as instalações centralizadas m ($1/m$)

Autores	Componente(s) da Rede Presente(s) no Estudo	Abordagem Matemática	Política de Alocação	Importância do Estudo
Geoffrion e Powers (1995)	Não Aplicável	Não Aplicável	Não Aplicável	Analisaram a evolução do <i>design</i> estratégico de redes de distribuição realizado por otimização matemática entre 1975 e 1995
Das e Tyagi (1997)	Transporte (distribuição); estoques de ciclo e segurança	Programação não-linear	Sistemas independentes	Apresentaram um dos modelos iniciais para a localização de instalações através de programação matemática não-linear que tratava estoques de ciclo e segurança utilizando o modelo de <i>LEC</i> e <i>PP</i>
Evers e Beier (1998)	Estoques de segurança	Desenvolvimento analítico	<i>Cross-filling</i> , centralização e sistemas independentes	Concluíram que incertezas do <i>lead-time</i> parecem ser um fator crucial para se escolher a localidade da instalação centralizada
Tyagi e Das (1998)	Estoques de segurança	Programação não-linear	<i>Cross-filling</i> , centralização e sistemas independentes	Concluíram que o Efeito Portfolio é maximizado sempre que uma determinada instalação centralizada fornece a mesma proporção de demanda a cada instalação descentralizada (não necessariamente $1/m$, onde m é o número total de instalações centralizadas na rede)
Jayaraman (1998)	Custos fixos de abertura de armazéns e fábrica; transporte (ressuprimento e distribuição); estoques de ciclo	Programação linear inteira mista	Sistemas independentes	Apresentou o modelo <i>FLITNET</i> para a localização de instalações através de programação matemática que englobou vários aspectos do problema de localização, em especial os estoques de ciclo
Owen e Daskin (1998)	Dependente do estudo abordado	Dependente do estudo abordado	Dependente do estudo abordado	Realizaram uma revisão de literatura que mostrou problemas clássicos de localização de instalações
Jayaraman e Pirkul (1999)	Custos fixos de abertura de armazéns e fábrica; transporte (ressuprimento e distribuição); estoques de ciclo	Programação linear inteira-mista	Sistemas independentes	Estenderam o modelo <i>FLITNET</i> para a localização de instalações em uma rede que lida com múltiplas commodities
Das e Tyagi (1999)	Estoques de segurança	Programação não-linear	Sistemas independentes	Concluíram que quando os coeficientes de correlação apresentam uma mistura de sinais negativos e positivos e altas magnitudes, a penalidade por usar centralização total ao contrário de sub-centralizações é muito alta

Autores	Componente(s) da Rede Presente(s) no Estudo	Abordagem Matemática	Política de Alocação	Importância do Estudo
Nozick e Turnquist (2001)	Custo fixo de abertura de armazéns; capacidade dos armazéns; transporte (distribuição)	Programação linear inteira	Sistemas independentes	Apresentaram uma formulação eficiente para a resolução do <i>Capacitated Facility Location Problem</i>
Ballou e Burnetas (2003)	Transporte (distribuição); estoques de ciclo e segurança	Desenvolvimento analítico e regressões	<i>Cross-filling</i>	Concluíram que a minimização dos estoques totais de ciclo e segurança depende das forças concorrentes que influenciam a decisão do <i>cross-filling</i>
Miranda e Garrido (2004)	Custos fixos de operação de armazéns; transporte (ressuprimento e distribuição); estoques de ciclo e segurança	Programação não-linear e relaxação lagrangeana	Sistemas independentes	Apresentaram um modelo para a localização de instalações através de programação matemática não-linear que tratava estoques de ciclo e segurança utilizando o modelo de <i>LEC</i> e <i>PP</i> . O modelo foi desenhado para uso em redes de larga escala e era resolvido por relaxação lagrangeana
Ambrosino e Scutellà (2004)	Custos fixos de operação de armazéns; transporte (ressuprimento e distribuição); estoques de ciclo	Programação linear inteira	Sistemas independentes	Apresentaram modelos estáticos e dinâmicos para a localização de armazéns centrais e intermediários, assim como para a determinação de rotas de distribuição entre tais armazéns e os mercados consumidores
Croxton e Zinn (2005)	Custos fixos de operação de armazéns e fábrica; transporte (ressuprimento e distribuição); estoques de segurança	Programação linear inteira-mista	Sistemas independentes	Apresentaram um modelo para a localização de instalações através de programação matemática que linearizou a função-objetivo, no que diz respeito aos estoques de segurança, através da regra da raiz quadrada
Wanke e Saliby (2009)	Transporte (distribuição); estoques de ciclo e segurança	Programação não-linear	<i>Cross-filling</i> , centralização e sistemas independentes	Caracterizaram as diferentes políticas de alocação de estoques em termos das demandas dos mercados, <i>lead-times</i> de ressuprimento, custos de manutenção de estoques, custos totais de distribuição, custos totais de estoques e <i>fill-rate</i>

Autores	Componente(s) da Rede Presente(s) no Estudo	Abordagem Matemática	Política de Alocação	Importância do Estudo
Wanke (2009)	Transporte (distribuição); estoques de ciclo e segurança	Programação não-linear	<i>Cross-filling</i> , centralização e sistemas independentes	Concluiu que o Efeito de Consolidação é maximizado quando ambos os estoques de ciclo e segurança são centralizados em um único armazém e quando a regra de alocação de estoque derivada de Tyagi e Das (1998) é utilizada. Mostrou que a variável mais relevante para o Efeito de Consolidação é a relação entre os desvios-padrão dos <i>lead-times</i> de ressuprimento dos armazéns, sendo que os estoques devem ser centralizados no armazém que possui o menor valor de desvio-padrão do <i>lead-time</i>

4 Modelo Proposto

O modelo proposto neste trabalho trata o problema de localização de armazéns em uma rede de distribuição e da subsequente alocação de seus estoques de ciclo e segurança aos mercados, de modo a minimizar o custo total da rede. Para efeitos de simplificação e análise, a rede de distribuição analisada é composta por três estágios: uma fábrica, armazéns e mercados consumidores. Mais precisamente, uma fábrica, cinco possíveis localidades para os armazéns e cinco mercados consumidores a constituem. A representação esquemática dessa rede é mostrada na Figura 10.

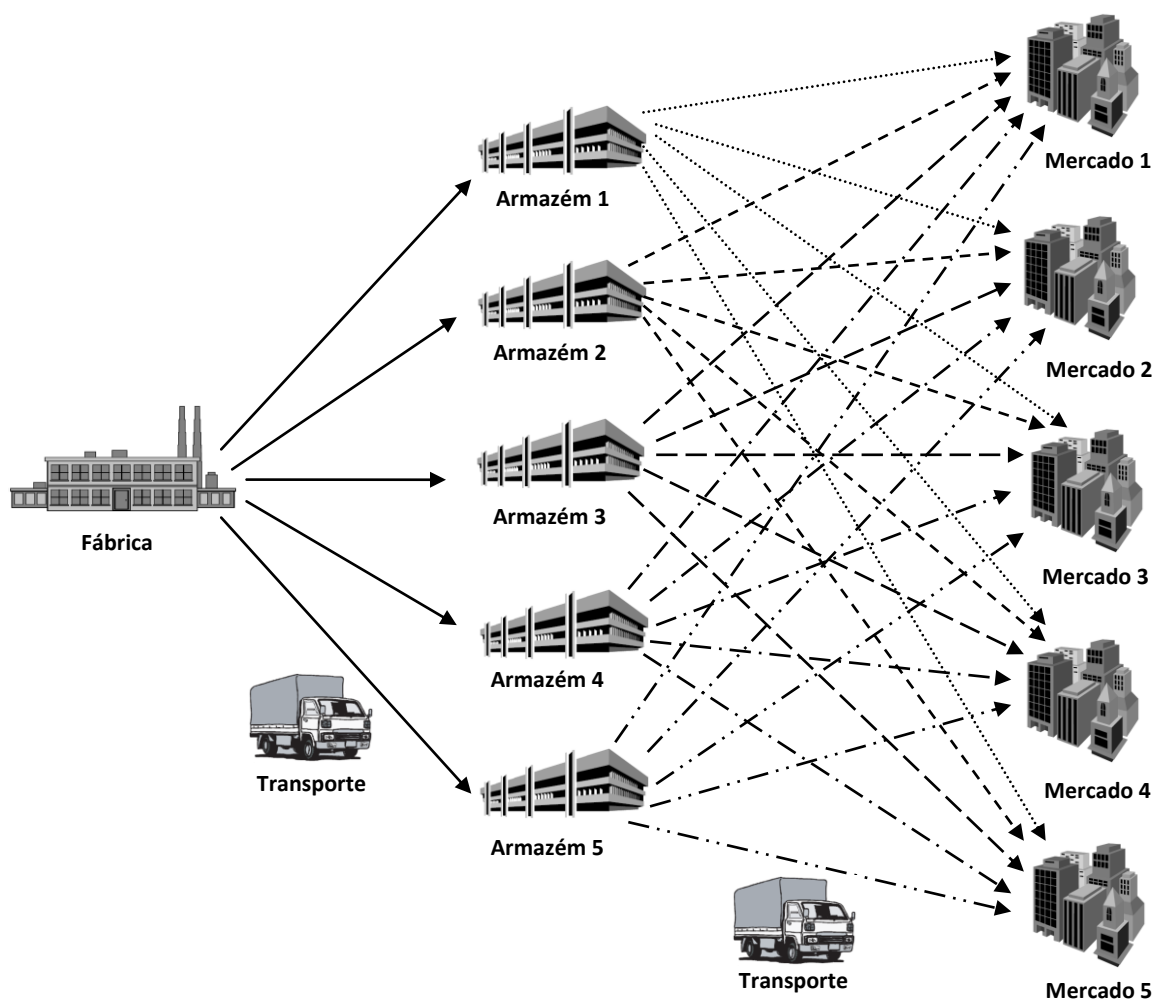


Figura 10 - Representação esquemática da rede estudada.

Conforme comentado na seção 2, o modelo possibilitará a realização da análise de sensibilidade por meio da geração de parâmetros de entrada aleatórios e da otimização de múltiplos cenários, com o intuito de se determinar o impacto dos dados de entrada na adoção das políticas de alocação de estoques apresentadas na seção 3.2.

No modelo, o custo total da rede é composto pelo custo de ressuprimento dos armazéns (transporte da fábrica aos armazéns), pelo custo de distribuição dos produtos (transporte dos armazéns aos mercados consumidores) e pelos custos de manutenção dos estoques de ciclo e de segurança. Uma vez que os custos de abertura dos armazéns não são levados em consideração no modelo, pode-se interpretar a solução do problema como característica da reorganização da rede de distribuição de uma empresa. Além disso, uma vez que a capacidade

dos armazéns não foi levada em conta como uma restrição do modelo, o mesmo se caracteriza com um problema de localização não-capacitado.

A solução propriamente dita do problema se constitui na minimização do custo total da rede, sujeito às restrições de demanda dos mercados consumidores, cuja equação é dada por:

$$CT_{Rede} = CT_{Ressup} + CT_{Dist} + CT_{EC/CP} + CT_{ES}, \quad (4.1)$$

onde:

CT_{Rede} = custo total da rede,

CT_{Ressup} = custo de ressuprimento dos armazéns,

CT_{Dist} = custo de distribuição para os mercados,

$CT_{EC/CP}$ = custo de manutenção dos estoques de ciclo e de colocação de pedidos,

CT_{ES} = custo de manutenção dos estoques de segurança.

Para tal, algumas premissas são assumidas:

1. A fábrica tem sua localização fixa e pré-determinada;
2. Os mercados consumidores têm sua localização fixa e pré-determinada;
3. As possíveis localidades dos armazéns são pré-determinadas e finitas;
4. O número de armazéns é finito e no máximo igual ao número de possíveis localidades;
5. Há somente um produto a ser transportado e estocado na rede;
6. As demandas dos mercados são variáveis aleatórias independentes, com correlação e desvios-padrão diferentes de zero;
7. Os *lead-times* de ressuprimento entre a fábrica e os armazéns são variáveis aleatórias independentes, com desvio-padrão diferente de zero;
8. Os mercados podem ser servidos por mais de um armazém, ou seja, pode haver *cross-filling*;
9. São considerados os estoques de ciclo e estoques de segurança nos armazéns;
10. Não são considerados estoques para a fábrica e mercados consumidores;

11. São considerados os níveis de serviço requeridos por cada mercado na forma de um fator de segurança que garante uma determinada probabilidade de não ocorrência de *stock-outs*. Além disso, o fator é o mesmo para todos os armazéns;
12. É assumido um modelo de gestão de estoques nos armazéns do tipo *LEC* e *PP*;
13. Os custo unitários de ressuprimento são função do *lead-time* da fábrica para cada armazém, sendo medidos em $\$/\text{unidade}/\text{dia}$;
14. Os custos de unitários de transporte entre os armazéns e os mercados dependem das distâncias entre os mesmos. Eles são medidos em $\$/\text{unidade}$.

O fato do modelo proposto permitir o *cross-filling*, em conjunto com a consideração simultânea dos estoques de ciclo e de segurança, de demandas correlacionadas e de variabilidade nos *lead-times*, é um diferencial importante. Isso, porque vários dos trabalhos de localização presentes na literatura assumem a premissa de que cada mercado é servido por somente um armazém (sistemas independentes), que as demandas não são correlacionadas e que os *lead-times* não apresentam variabilidade. Tais premissas levam a formulações simplificadas dos estoques de ciclo e de segurança. O modelo proposto neste estudo assume, assim, premissas menos restritivas e bem mais próximas da realidade.

Na formulação matemática do modelo foi utilizado o resultado de Evers (1995) para a determinação dos estoques agregados de ciclo e de segurança, de acordo com o numerador da na equação (2.90). O resultado foi escolhido, pois justamente leva em conta os estoques de ciclo e segurança utilizando o modelo *LEC* e *PP*, as correlações entre as demandas dos mercados, os desvios-padrão das demandas dos mercados e os desvios-padrão dos *lead-times* de ressuprimento dos armazéns. O modelo formulado nesta pesquisa é dado pela seguinte notação:

n = número total de mercados,

m = número de possíveis localidades para um armazém,

i, l = índice de um mercado; $i, l = \{1, \dots, n\}$,

j = índice de um possível armazém na rede; $j = \{1, \dots, m\}$,

A_{a_j} = custo unitário de colocação de pedido no armazém j ,

C_{a_j} = custo unitário de manutenção de estoques no armazém j ,

D_{b_i} = demanda média do mercado i ,

ρ_{il} = correlação entre as demandas médias dos mercados i e l ,

L_{a_j} = lead-time médio de ressurgimento no armazém j ,

$\sigma_{D_{b_i}}$ = desvio-padrão da demanda do mercado i ,

$\sigma_{L_{a_j}}$ = desvio-padrão do lead-time de ressurgimento no armazém j ,

k_{a_j} = fator de segurança que reflete o nível de proteção em relação aos stock-outs, ou seja, o nível de serviço no armazém j ,

T_{ij} = custo unitário de transporte na distribuição entre mercado i e armazém j ,

S = custo unitário e diário de ressurgimento da fábrica para os armazéns (igual para todos os armazéns).

A variável de decisão do modelo proposto é tal que:

W_{ij} = proporção da demanda média do mercado i atendida pelo armazém j , tal que $0 \leq W_{ij} \leq 1$.

A função-objetivo do problema de programação não-linear é dada pela equação (4.2):

$$\begin{aligned} \text{Minimizar } CT_{\text{Rede}} = & \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n SL_{a_j} W_{ij} D_{b_i} + \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n T_{ij} W_{ij} D_{b_i} + \sum_{j=1}^m \sqrt{2A_{a_j} C_{a_j} \sum_{i=1}^n W_{ij} D_{b_i}} + \\ & \sum_{j=1}^m k_{a_j} C_{a_j} \sqrt{L_{a_j} \left(\sum_{i=1}^n W_{ij}^2 \sigma_{D_{b_i}}^2 + 2 \sum_{i=1}^n \sum_{l=1}^{i-1} W_{ij} W_{lj} \rho_{il} \sigma_{D_{b_i}} \sigma_{D_{b_l}} \right) + \sigma_{L_{a_j}}^2 \left(\sum_{i=1}^n W_{ij} D_{b_i} \right)^2}, \end{aligned} \quad (4.2)$$

sujeita à seguinte restrição:

$$\sum_{j=1}^m W_{ij} = 1 \quad \forall i, \quad (4.3)$$

onde:

$\sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n SL_{a_j} W_{ij} D_{b_i}$ é o custo de ressurgimento dos armazéns,

$\sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n T_{ij} W_{ij} D_{b_i}$ é o custo de distribuição para os mercados,

$\sum_{j=1}^m \sqrt{2A_{a_j} C_{a_j} \sum_{i=1}^n W_{ij} D_{b_i}}$ é o custo de manutenção de estoques de ciclo e de colocação de pedidos,

$\sum_{j=1}^m k_{a_j} C_{a_j} \sqrt{L_{a_j} \left(\sum_{i=1}^n W_{ij}^2 \sigma_{D_{b_i}}^2 + 2 \sum_{i=1}^n \sum_{l=1}^{i-1} W_{ij} W_{lj} \rho_{il} \sigma_{D_{b_i}} \sigma_{D_{b_l}} \right) + \sigma_{L_{a_j}}^2 \left(\sum_{i=1}^n W_{ij} D_{b_i} \right)^2}$ é o custo de manutenção dos estoques de segurança.

A restrição (4.3) garante que toda a demanda dos mercados seja atendida.

É importante ressaltar, para a compreensão da equação (4.2) no ato da comparação da mesma com a equação (2.90), que há uma diferença básica entre elas: a formulação de Evers (1995) lida com quantidades de estoque, enquanto que a formulação apresentada na equação (4.2) trata dos custos de ressuprimento, distribuição, estoques e colocação de pedidos.

Uma consequência direta dessa diferença é o tratamento dado aos estoques de ciclo em cada uma das formulações. Evers (1995) assumiu, ao calcular os estoques de ciclo no numerador da equação (2.90), que os mesmos são dados pelos estoques médios presentes no armazém. Por sua vez, os estoques médios EM equivalem à metade do LEC em cada armazém aberto j , como mostra a equação (4.6):

$$EM_j = \frac{1}{2} LEC_j, \quad (4.4)$$

$$LEC_j = \sqrt{\frac{2A_{a_j} \sum_{i=1}^n W_{ij} D_{b_i}}{C_{a_j}}}, \quad (4.5)$$

$$EM_j = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{2A_{a_j} \sum_{i=1}^n W_{ij} D_{b_i}}{C_{a_j}}}. \quad (4.6)$$

No modelo formulado neste estudo, os custos de manutenção de estoques de ciclo e de colocação de pedidos foram calculados a partir do LEC . Para isso, esses custos são definidos como:

$$CT_{EC/CP} = \sum_{j=1}^m \left(EM_j \times C_{a_j} + NR_j \times A_{a_j} \right), \quad (4.7)$$

onde:

NR_j é o número de ressuprimentos realizados no armazém j .

NR_j é dado pela demanda total alocada ao armazém j dividida pelo LEC , como mostra a equação (4.8):

$$NR_j = \frac{\sum_{i=1}^n W_{ij} D_{b_i}}{LEC_j}. \quad (4.8)$$

Substituindo-se as equações (4.6) e (4.8) na equação (4.7), obtém-se a formulação do custo de manutenção dos estoques de ciclo e de colocação de pedido, mostrada na equação (4.13):

$$CT_{EC/CP} = \sum_{j=1}^m \left(\frac{1}{2} \sqrt{\frac{2A_{a_j} \sum_{i=1}^n W_{ij} D_{b_i}}{C_{a_j}}} \times C_{a_j} + \frac{\sum_{i=1}^n W_{ij} D_{b_i}}{\sqrt{\frac{2A_{a_j} \sum_{i=1}^n W_{ij} D_{b_i}}{C_{a_j}}}} \times A_{a_j} \right), \quad (4.9)$$

$$CT_{EC/CP} = \sum_{j=1}^m \left(\sqrt{\frac{2A_{a_j} C_{a_j}^2 \sum_{i=1}^n W_{ij} D_{b_i}}{4C_{a_j}}} + \sqrt{\frac{A_{a_j}^2 C_{a_j} \left(\sum_{i=1}^n W_{ij} D_{b_i} \right)^2}{2A_{a_j} \sum_{i=1}^n W_{ij} D_{b_i}}} \right), \quad (4.10)$$

$$CT_{EC/CP} = \sum_{j=1}^m \left(\sqrt{\frac{A_{a_j} C_{a_j} \sum_{i=1}^n W_{ij} D_{b_i}}{2}} + \sqrt{\frac{A_{a_j} C_{a_j} \sum_{i=1}^n W_{ij} D_{b_i}}{2}} \right), \quad (4.11)$$

$$CT_{EC/CP} = \sum_{j=1}^m 2 \sqrt{\frac{A_{a_j} C_{a_j} \sum_{i=1}^n W_{ij} D_{b_i}}{2}} = \sum_{j=1}^m \sqrt{\frac{4A_{a_j} C_{a_j} \sum_{i=1}^n W_{ij} D_{b_i}}{2}}, \quad (4.12)$$

$$CT_{EC/CP} = \sum_{j=1}^m \sqrt{2A_{a_j} C_{a_j} \sum_{i=1}^n W_{ij} D_{b_i}}. \quad (4.13)$$

Finalmente, há uma pequena diferença de formato no que diz respeito aos estoques de segurança. Evers (1995) utiliza no numerador da equação (2.90) a covariância da demanda entre os mercados i e l , definida na equação (4.14):

$$\delta_{D_{b_i}} = \rho_{il} \sigma_{D_{b_i}} \sigma_{D_{b_l}}. \quad (4.14)$$

A equação (4.14) foi substituída na parcela do numerador da equação (2.90) que diz respeito aos estoques de segurança, resultando na equação (4.15) que foi utilizada no modelo proposto neste trabalho.

$$k_{a_j} \sqrt{L_{a_j} \left(\sum_{i=1}^n W_{ij}^2 \sigma_{D_{b_i}}^2 + 2 \sum_{i=1}^n \sum_{l=1}^{i-1} W_{ij} W_{lj} \rho_{il} \sigma_{D_{b_i}} \sigma_{D_{b_l}} \right) + \sigma_{L_{a_j}}^2 \left(\sum_{i=1}^n W_{ij} D_{b_i} \right)^2}. \quad (4.15)$$

Chamamos a atenção do leitor ao fato de que a presente pesquisa, ao utilizar o modelo de localização de armazéns e alocação de estoques apresentado traz algumas contribuições científicas. A primeira delas é apresentar uma formulação mais abrangente do problema de localização de instalações e alocação de estoques que considera simultaneamente os estoques de ciclo e de segurança na otimização dos custos não-lineares da rede.

Já a segunda contribuição consiste no tratamento mais realístico do problema de localização, através da captura das incertezas inerentes ao mesmo. Isso é possível uma vez que a formulação apresentada considera as demandas probabilísticas dos mercados, com desvios-padrão e correlações diferentes de zero. Além disso, ela também considera que os *lead-times* de ressuprimento dos armazéns são probabilísticos, com desvios-padrão diferentes de zero.

A terceira contribuição científica é analisar o problema de localização de armazéns e alocação de estoques assumindo a premissa do *cross-filling*, ao permitir que a alocação dos estoques na rede se caracterize pelas políticas mostradas na seção 3.2 (centralização total, sistemas independentes, *cross-filling* total ou política mista). Essa contribuição é importante, pois como foi apresentado na revisão de literatura, muitos dos trabalhos previamente realizados

assumiram apenas a premissa de sistemas independentes, o que restringe o escopo da análise e pode ocultar importantes implicações gerenciais.

Finalmente, a quarta e última contribuição da pesquisa é trazer, através da análise de sensibilidade, uma melhor compreensão gerencial da adequação das políticas de alocação de estoques às diversas características da operação (traduzidas pelo *lead-time* de ressuprimento e suas variações), do produto (traduzidas pela variação do custo de manutenção de estoques que reflete produtos de diferentes valores a cada cenário de análise) e da demanda dos mercados. Essa necessidade foi anteriormente salientada por Wanke e Saliby (2009) e Wanke (2009).

5 Metodologia

A presente seção traz a seqüência metodológica necessária para a realização desta pesquisa. Primeiramente, é apresentada a implementação do modelo de localização de instalações. Em seguida, o procedimento da análise de sensibilidade é detalhado. Finalmente, são expostas as técnicas estatísticas utilizadas para tratar os resultados obtidos da análise de sensibilidade. Fechando a seção, a Figura 12 mostra um resumo dos passos da metodologia.

5.1 Implementação do Modelo

O modelo de programação não-linear mostrado na seção anterior foi implementado no *software* AIMMS 3.8 (*Paragon Decision Technology B. V.*). O *software* foi escolhido por apresentar poderosas rotinas de cálculo que garantem que os mínimos globais sejam encontrados. Mais especificamente, a rotina LGO (*Lipschitz-continuous Global Optimizer*), desenvolvida pela empresa *Pinter Consulting Services* é utilizada pelo AIMMS para resolver problemas não-lineares e foi empregada para a otimização dos cenários na análise de sensibilidade. Outro fator relevante é a possibilidade de programar, o que permitiu a implementação da análise de sensibilidade, a ser posteriormente detalhada, dentro do próprio *software*. Além disso, o AIMMS 3.8 é de fácil utilização, já que apresenta uma interface gráfica amigável para a montagem dos modelos.

O primeiro passo na implementação do modelo foi a declaração das variáveis. Primeiramente foi necessário se declararem os Conjuntos (*Sets*) que são os índices dos armazéns e mercados (descritos como m e n , respectivamente, no modelo proposto na seção 4). Em seguida, foram

declarados os Parâmetros (*Parameters*) que representam os valores das variáveis de entrada e saída. Os Parâmetros podem ser indexados pelos Conjuntos, representando assim características dos elementos presentes nestes últimos (por exemplo, demandas médias dos mercados ou *lead-times* de ressuprimento dos armazéns). Houve ainda as Variáveis (*Variables*) propriamente ditas, que são calculadas pelas rotinas de otimização. No modelo em questão, elas eram W_{ij} e CT_{Rede} . Finalmente o Problema Matemático (*Mathematical Problem*) deve ser declarado, onde se especificam a função objetivo (CT_{Rede}) e o tipo de programação matemática utilizada. No caso do problema da pesquisa, a programação matemática escolhida solucionava problemas não-lineares. Feito isso, e com todos os valores das variáveis de entrada carregados no programa, a otimização pode ser realizada. O passo seguinte foi a geração dos valores das variáveis de entrada e a coleta das variáveis de saída sob a forma de um arquivo que permitisse a passagem de dados para o pacote estatístico. No caso deste estudo, o arquivo em questão foi escrito no formato MS EXCEL™.

5.2 Análise de Sensibilidade

A análise de sensibilidade foi estruturada no âmbito de próprio modelo, sendo escrita na linguagem do *software* AIMMS 3.8. Mais especificamente, foram gerados 10.000 cenários diferentes, com valores aleatórios para as demandas dos mercados, os desvios-padrão das demandas dos mercados, as correlações entre as demandas dos mercados, os *lead-times* de ressuprimento dos armazéns, os desvios-padrão dos *lead-times* de ressuprimento dos armazéns, os custos de manutenção de estoques nos armazéns, os custos de colocação de pedidos nos armazéns, os custos de ressuprimento dos armazéns e os custos de transporte entre armazéns e mercados.

Foi assumido, para os propósitos da análise de sensibilidade, que cada uma dessas variáveis pode ser representada por uma distribuição uniforme contínua, com parâmetros máximos e mínimos apresentados no Quadro 5. Esses parâmetros são os mesmos adotados por Wanke e Saliby (2009) e Wanke (2009), compilados de artigos publicados anteriormente no *Journal of Business Logistics*.

Quadro 5 - Parâmetros utilizados na análise de sensibilidade. Fonte: Adaptado de Wanke e Saliby (2009) e Wanke (2009).

Variáveis	Mínimo	Máximo
Demandas médias dos mercados i D_{b_i} (unidades/dia)	80	120
Desvio-padrão das demandas dos mercados i $\sigma_{D_{b_i}}$ (unidades/dia)	3	30
Lead-time médio dos armazéns j L_{a_j} (dias)	1	5
Desvio-Padrão dos lead-times dos armazéns j $\sigma_{L_{a_j}}$ (dias)	0,5	2,0
Correlação entre as demandas dos mercados i e l ρ_{il}	-1	1
Fator de segurança dos estoques nos armazéns j k_j	1	1
Custo unitário de colocação de pedido no armazém j A_{a_j} (\$/pedido)	17	67
Custo unitário de manutenção de estoques no armazém j C_{a_j} (\$/unidade/dia)	0,35	0,68
Custo unitário e diário de ressuprimento dos armazéns j (Esse valor é o mesmo para todos os armazéns em cada cenário) S (\$/unidade/dia)	0,8	1,0
Custo unitário de transporte entre mercados i e armazéns j T_{ij} (\$/unidade)	0,5	1,0

Foi realizado um refinamento no que diz respeito aos custos de transporte entre mercados e armazéns para que as diferentes distâncias entre os mesmos fossem levadas em conta. O primeiro passo desse refinamento consistiu em estimar as distâncias entre os mercados e armazéns, considerando-se que cada localidade possuía um mercado e um armazém e que essas localidades seriam São Paulo (Mercado e Armazém 1), Rio de Janeiro (Mercado e Armazém 2), Vitória (Mercado e Armazém 3), Belo Horizonte (Mercado e Armazém 4) e Curitiba (Mercado e Armazém 5). As localidades são mostradas de maneira esquemática na

Figura 11. O Quadro 6 apresenta as distâncias aproximadas entre armazéns e mercados, considerando-se que a distância entre os mesmos em uma mesma localidade vale zero.

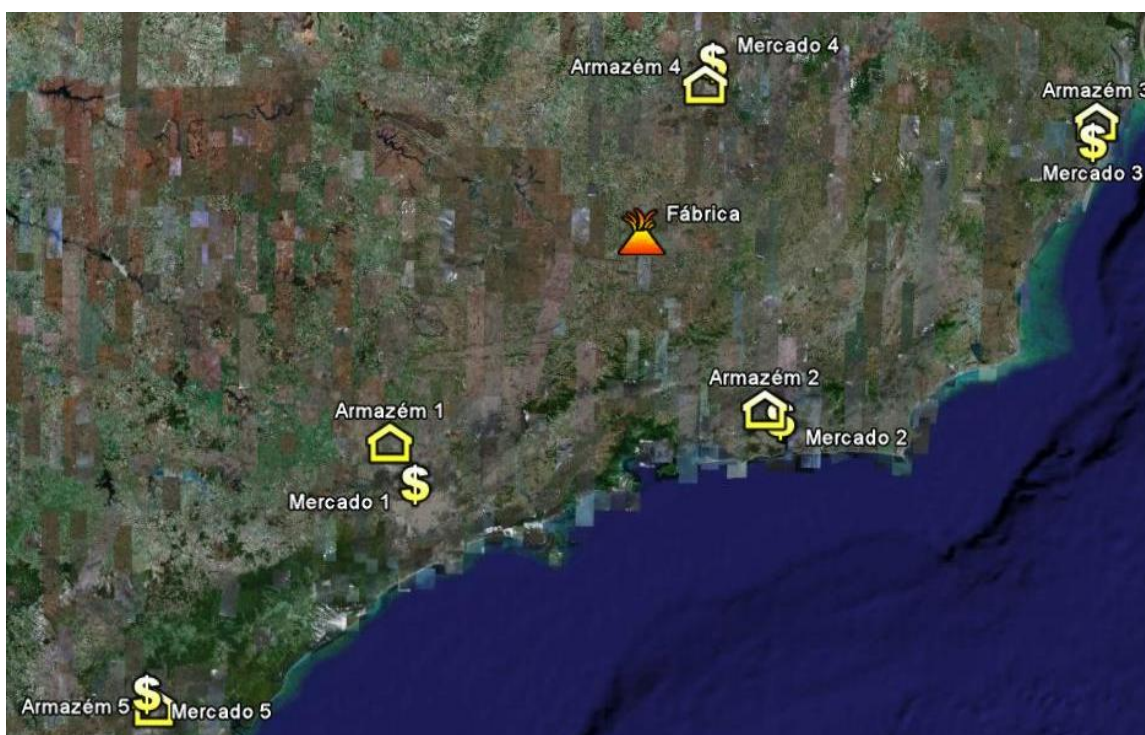


Figura 11 - Configuração física da rede estudada, mostrando a fábrica, os armazéns e os mercados. Fonte: Google Earth (Acesso em 15/07/2008).

Quadro 6 - Distâncias aproximadas entre armazéns e mercados. Fonte: Google Maps (Acesso em 15/07/2008).

	Distâncias aproximadas em km entre armazéns e mercados				
	Mercado 1	Mercado 2	Mercado 3	Mercado 4	Mercado 5
Armazém 1	0	429	958	586	408
Armazém 2	429	0	525	444	858
Armazém 3	958	525	0	526	1386
Armazém 4	586	444	526	0	1011
Armazém 5	408	858	1386	1011	0

No passo posterior foi assumido que os custos unitários de transporte mínimo e máximo entre armazéns e mercados seriam os mesmos utilizados por Wanke e Saliby (2009), ou seja, 0,5 e 1,0 \$/unidade respectivamente. Em seguida, o intervalo delimitado por esses custos foi dividido em sete faixas (cf. Quadro 7). Cada faixa de custos foi atribuída a uma das faixas de distâncias nas quais foi dividido o intervalo tendo como limite inferior e superior, respectivamente, zero e 1.100 km. Este intervalo foi utilizado por cobrir a quase totalidade de

distâncias entre armazéns e mercados mostradas no Quadro 6. A atribuição das faixas de custo às faixas de distância é também mostrada no Quadro 7.

Quadro 7 - Atribuição dos intervalos de custo de transporte aos intervalos de distância entre armazéns e mercados.

Faixas de distâncias (km)		Faixas de custos (\$/unidade)	
Mínima	Máxima	Mínimo	Máximo
0	199	0,50	0,60
200	299	0,60	0,80
300	499	0,80	0,84
500	699	0,84	0,88
700	899	0,88	0,92
900	1099	0,92	0,96
1100	>1100	0,96	1,00

Uma vez que cada distância pode ser encaixada em uma das faixas de distância do Quadro 7, foi possível determinar os custos unitários de transporte entre mercados e armazéns. Os valores dos mínimos custos unitário de transporte são apresentados no Quadro 8. O Quadro 9, por sua vez, traz os valores dos máximos custos unitários de transporte.

Quadro 8 - Custo unitário mínimo de transporte entre armazéns e mercados.

	Custo unitário mínimo (\$/unidade)				
	Mercado 1	Mercado 2	Mercado 3	Mercado 4	Mercado 5
Armazém 1	0,50	0,80	0,92	0,84	0,80
Armazém 2	0,80	0,50	0,84	0,80	0,88
Armazém 3	0,92	0,84	0,50	0,84	0,96
Armazém 4	0,84	0,80	0,84	0,50	0,92
Armazém 5	0,80	0,88	0,96	0,92	0,50

Quadro 9 - Custo unitário máximo de transporte entre armazéns e mercados.

	Custo unitário máximo (\$/unidade)				
	Mercado 1	Mercado 2	Mercado 3	Mercado 4	Mercado 5
Armazém 1	0,60	0,84	0,96	0,88	0,84
Armazém 2	0,84	0,60	0,88	0,84	0,92
Armazém 3	0,96	0,88	0,60	0,88	1,00
Armazém 4	0,88	0,84	0,88	0,60	0,96
Armazém 5	0,84	0,92	1,00	0,96	0,60

5.3 Apresentação e Tratamento Estatístico dos Resultados da Análise de Sensibilidade

Para cada um dos diferentes cenários otimizados foram determinados: a quantidade de armazéns abertos na rede; suas localizações; os mercados alocados a cada armazém aberto (e em qual proporção); e os níveis ótimos de estoque de ciclo e de segurança nesses armazéns. Assim, as questões **a.** a **d.**¹ dos objetivos específicos da pesquisa puderam ser respondidas.

Em seguida, os resultados coletados foram analisados com o auxílio do *software* SPSS (*SPSS, Inc, IL, USA*), visando responder as demais perguntas específicas da pesquisa. Dessa maneira, foram realizadas análises descritivas para a apresentação dos resultados (histogramas e tabelas de frequência), testes não-paramétricos e regressões logísticas. Foram considerados significantes os resultados para os quais $p < 0,05$.

Em todas as análises a variável dependente foi a política de alocação de estoques adotada em cada cenário otimizado da análise de sensibilidade. O Quadro 10 mostra as categorias que essa variável pode assumir (como discutido anteriormente na seção 3.2), além de uma descrição da configuração dos armazéns e mercados relativa a cada categoria, levando-se em conta que a rede estudada apresenta cinco possíveis localidades para os armazéns e cinco mercados. Já as variáveis independentes primárias foram os parâmetros de entrada (Quadro 25 – Anexo 3) e alguns parâmetros de saída do modelo de otimização (Quadro 26 – Anexo 3). Foram também utilizadas algumas variáveis secundárias (Quadro 27 – Anexo 3), determinadas a partir de transformações das variáveis primárias.

Quadro 10 - Descrição das categorias que a política de alocação de estoques pode assumir no estudo.

Política de Alocação (Mostrada na seção 3.2)	Número de Armazéns Abertos na Rede	Situação dos Mercados
Centralização total	1	Todos os mercados servidos por um único armazém
Sistemas Independentes	5	Cada mercado servido por um único armazém
<i>Cross-filling</i> total	5	Todos os mercados servidos por todos os armazéns
Política mista	Entre 2 e 5	Situações intermediárias entre aquelas que ocorrem nos Sistemas Independentes e no <i>cross-filling</i>

¹ Pergunta **a.**: Quantos armazéns devem ser abertos na rede?; Pergunta **b.**: Quais são as suas localizações?; Pergunta **c.**: Quais mercados, e em qual proporção, devem ser alocados a um determinado armazém?; Pergunta **d.**: Quais são os níveis ótimos de estoque de ciclo e de segurança em cada armazém?

Mais especificamente, no que diz respeito às técnicas estatísticas utilizadas, as análises descritivas se prestaram a apresentar os resultados coletados de uma maneira organizada e facilmente compreensível, trazendo a frequência de ocorrência das políticas de alocação de estoques. Assim, elas foram empregadas para responder a questão **e.**² dos objetivos específicos da pesquisa.

Em seguida, as análises estatísticas empregadas para caracterizar as diferentes políticas de alocação de estoques em termos das variáveis apresentadas nos quadros do Anexo 3 foram os testes não-paramétricos. Eles foram escolhidos, pois apresentam menos requerimentos a respeito das formas das populações estudadas, não exigindo que se assuma a premissa de que os dados analisados sejam normalmente distribuídos e que suas matrizes de variância e covariância sejam homogêneas (Ho, 2006). Dentre os testes não-paramétricos existentes, aqueles utilizados foram o teste de Kruskal-Wallis e de mediana. O teste de Kruskal-Wallis é utilizado quando são analisadas variáveis dependentes que apresentam mais do que duas categorias. Segundo Ho (2006), ele é a versão não-paramétrica da Análise de Variância (ANOVA). As três principais hipóteses do teste são:

1. Os dados são independentes e aleatórios;
2. Os dados devem ser medidos ao menos em nível ordinal;
3. Devem existir no mínimo cinco observações em cada conjunto de variáveis para que se possa utilizar as probabilidades de Chi-quadrado (χ^2).

No teste, as variáveis independentes foram agrupadas em função das categorias da variável dependente. No caso do presente estudo, por exemplo, se a variável dependente política de alocação apresentasse somente dois valores, cada variável independente seria dividida em dois grupos. A hipótese nula testada é que, para uma mesma variável independente, os grupos nos quais a mesma foi dividida vêm de distribuições de população idênticas, ou seja, não há diferença estatisticamente significativa entre as distribuições dos grupos formados (Ho, 2006). Assim, se após a realização dos testes o valor do Chi-quadrado calculado for estatisticamente significativo, rejeitar-se-ia a hipótese nula e se concluiria que as categorias nas quais a variável independente foi dividida não vêm de distribuições de população idênticas. Isso significa, em outras palavras, que houve diferença estatisticamente significativa entre as distribuições das categorias formadas. Entretanto, o teste de Kruskal-Wallis não quantifica a diferença, ele

² Pergunta **e.**: Quais são as frequências de ocorrência de cada uma das políticas de alocação de estoques?

somente afirma que uma diferença existe. Para quantificá-la, foi usado um teste de mediana, que avaliou a diferença entre as medianas das categorias nas quais as políticas de alocação foram divididas. Os testes de Kruskal-Wallis e de mediana se prestaram, assim, a responder as questões **f.** e **g**³. dos objetivos específicos da pesquisa.

A regressão logística, por sua vez, é utilizada quando se deseja determinar quais variáveis independentes são as mais importantes, e quantificar o impacto das mesmas, na previsão da ocorrência de uma determinada categoria da variável dependente. Tal técnica foi, então, utilizada para determinar quais parâmetros de entrada do modelo são os mais importantes para o surgimento de uma determinada categoria das políticas de alocação de estoques, respondendo a pergunta **h.**⁴ dos objetivos específicos da pesquisa. A regressão logística também apresenta a vantagem de não assumir a premissa de multinormalidade e de não ter requerimentos específicos sobre a as formas das populações estudadas (Sharma, 1996). Além disso, como a variável dependente estudada é não-métrica, a regressão logística deve ser utilizada (Hair et Al., 2006). A variável dependente (política de alocação de estoques) analisada no estudo possui quatro categorias e isso faz com que seja necessário empregar a regressão logística multinomial, que é a técnica adequada a tal situação. A regressão logística multinomial compara as diversas categorias que a variável dependente pode apresentar através da combinação de regressões logísticas binomiais, onde as categorias são comparadas duas a duas. Para que as comparações sejam realizadas, deve ser escolhida uma categoria de referência com a qual as demais categorias existentes serão comparadas (Landau e Everitt, 2004). No presente estudo a categoria de referência será aquela que apresentar a menor frequência de ocorrência na análise de sensibilidade. No que diz respeito à escolha das variáveis independentes que integrarão a equação resultante da regressão, foi adotado no SPSS o método de seleção *stepwise*.

O valor de interesse para interpretação do resultados de uma regressão logística é $EXP(B)$, informado diretamente como resultado no SPSS. Tal valor é conhecido com a Razão de Vantagens (*Odds Ratio*). A Razão de Vantagens é uma medida da influência do aumento de uma unidade do valor de uma variável independente na relação entre a probabilidade de ocorrência da categoria que se deseja estudar e a probabilidade de ocorrência da categoria de

³ Pergunta **f.**: Como são caracterizadas as políticas de alocações de estoques em termos dos parâmetros utilizados na análise de sensibilidade? Pergunta **g.**: Qual é o impacto de cada uma das políticas no custo total da rede e nos seus principais componentes?

⁴ Pergunta **h.**: Quais são as variáveis de entrada que possuem maior importância na ocorrência dessas políticas?

referência (Leech et Al., 2005). Em outras palavras, o aumento de uma unidade no valor da variável independente pode aumentar (ou diminuir) a probabilidade de ocorrência da categoria estudada em $[EXP(B) - 1] \times 100\%$ em relação à probabilidade de ocorrência da categoria de referência, considerando-se que as demais variáveis independentes permaneçam constantes. Dessa maneira, pode-se determinar quais são as variáveis independentes mais importantes, e quantificar o impacto de tais variáveis, na probabilidade de ocorrência da categoria estudada.

O valor do R^2 de Nagelkerke, que também é um valor mostrado diretamente nos resultados do SPSS, é similar ao valor do R^2 de uma regressão linear e é usado para estimar a variância que pode ser predita pelas variáveis presentes na equação resultante da regressão logística. Assim, o R^2 de Nagelkerke é uma medida da eficácia da equação resultante (Leech et Al., 2005).

A Figura 12 resume os passos da metodologia da pesquisa.



Figura 12 - Passos da metodologia.

6 Análise e Discussão dos Resultados

A presente seção apresenta os resultados da análise de sensibilidade e o tratamento estatístico dado a eles. Inicialmente são mostrados as estatísticas descritivas para as políticas de localização de estoques e custos na rede. Em seguida são apresentados os resultados do

teste de Kruskal-Wallis e de mediana e da regressão logística. Finalmente são exploradas as implicações gerenciais do estudo.

6.1 Descrição dos Resultados

O *software* AIMMS encontrou satisfatoriamente a configuração da rede que proporcionava o valor mínimo global de CT_{Rede} em cada um dos 10.000 cenários aleatórios gerados. Devido à grande quantidade de informações geradas na análise de sensibilidade, são detalhados os resultados de dois cenários no intuito de ilustrar como o modelo responde a tais perguntas.

O Quadro 11 apresenta os valores dos W_{ij} que proporcionam o valor mínimo global de CT_{Rede} para o Cenário 00001. Esse conjunto de variáveis traz consigo duas informações importantes sobre a configuração da rede. A primeira delas é a informação sobre quais armazéns foram abertos. Se um ou mais valores na linha correspondente a um armazém forem diferentes de zero, isso indica que tal armazém foi aberto. A segunda informação diz respeito à proporção da demanda de um mercado alocada a um dado armazém aberto. Na coluna correspondente a um determinado mercado, os valores das células indicam a proporção da demanda de tal mercado servida por cada armazém, variando de zero (indicando que armazém não serve o mercado) a um (indicando que o armazém atende toda a demanda do mercado). A soma dos valores das colunas deve ser igual a 1, de acordo com a restrição (4.3) do modelo proposto de que toda a demanda dos mercados deve ser servida.

Dessa maneira, o Quadro 11 traz resposta, de maneira individual, à pergunta **a.**, ou seja, qual a quantidade de armazéns abertos na rede. Pode-se notar neste cenário foi aberto somente um armazém. Além disso, o Quadro 11 também mostra qual foi a localização do armazém aberto, respondendo de maneira individual a pergunta **b.**, que no Cenário 00001 é a localidade 5. Finalmente, o Quadro também responde de maneira individual a pergunta **c.** ao apresentar quais mercados, e em qual proporção, foram alocados ao armazém aberto. No Cenário 00001 ocorreu uma centralização total e todos os mercados tiveram suas demandas servidas somente pelo armazém 5.

Quadro 11 - W_{ij} ótimos calculados no Cenário 00001. Eles representam os armazéns abertos e as proporções das demandas dos mercados servidas por eles.

W_{ij} Ótimo						
Cenário 00001		Mercado i				
		1	2	3	4	5
Armazém j	1	0	0	0	0	0
	2	0	0	0	0	0
	3	0	0	0	0	0
	4	0	0	0	0	0
	5	1	1	1	1	1

A resposta à pergunta **d.** dos objetivos da pesquisa para o Cenário 00001 é dada pelo Quadro 12. Nele, são apresentados os níveis ótimos de estoque de ciclo e de segurança para o armazém 5. É interessante notar que o estoque de segurança ótimo representa uma probabilidade de não ocorrência de *stock-out* de aproximadamente 85%, uma vez que o fator de segurança em relação aos *stocks-outs* utilizado na análise foi $k = 1$ (respectivamente cf. Quadro 2 e Quadro 5).

Quadro 12 - Níveis ótimos dos estoques de segurança para os armazéns abertos no Cenário 00001.

Cenário 00001		
Armazém j	Estoque de Ciclo Ótimo (unidades)	Estoque de Segurança Ótimo (unidades)
1	0	0
2	0	0
3	0	0
4	0	0
5	178	782

A título de comparação, o Quadro 13 apresenta o conjunto de valores de W_{ij} que leva ao mínimo global de CT_{Rede} para o Cenário 06482. Assim, pode-se notar que agora houve dois armazéns abertos, localizados nas localidades 2 e 3. As proporções das demandas dos mercados atendidas pelos armazéns abertos também são mostradas no quadro. Ao contrário do ocorrido no Cenário 00001, neste foi observada uma política mista de alocação de estoques, sendo que os mercado 1 e 2 foram sub-centralizados no armazém 2. Nos demais mercados foi verificado o *cross-filling* (cf. Figura 15 do Anexo 1), já que os mesmos foram servidos simultaneamente pelos armazéns 2 e 3.

Quadro 13 - W_{ij} ótimos calculados no Cenário 06482. Eles representam os armazéns abertos e as proporções das demandas dos mercados servidas por eles.

W_{ij} Ótimo						
Cenário 06482		Mercado i				
		1	2	3	4	5
Armazém j	1	0	0	0	0	0
	2	1	1	0,18	0,87	0,55
	3	0	0	0,82	0,13	0,45
	4	0	0	0	0	0
	5	0	0	0	0	0

Ainda a título de comparação, o Quadro 14 apresenta, para o Cenário 06482, os níveis ótimos de estoque de ciclo e de segurança para os armazéns 2 e 3.

Quadro 14 - Níveis ótimos dos estoques de segurança para os armazéns abertos no Cenário 06482.

Cenário 06482		
Armazém j	Estoque de Ciclo Ótimo (unidades)	Estoque de Segurança Ótimo (unidades)
1	0	0
2	158	730
3	87	122
4	0	0
5	0	0

Em seguida, o Quadro 15 mostra a freqüência de ocorrência das políticas de alocação de estoque observadas na análise de sensibilidade em função do número de armazéns na rede e situação dos mercado, respondendo assim a pergunta e. dos objetivos da pesquisa.

Quadro 15 - Freqüência de ocorrência das políticas em função do número de armazéns na rede e situação dos mercados.

Política	Configuração da Rede	Número de Armazéns na Rede	Freqüência	Total
Centralização Total	CET	1	9437	9437
Mista	SCE	2	37	563
	SCE_CF	2	103	
		3	8	
		4	3	
	SCE_CF_SI	3	1	
SCE_SI	2	411		
Total				10000

Legenda (vide Anexo 1 para uma representação gráfica):

CET = centralização total;

SCE =sub-centralização;

SCE_CF = sub-centralização e *cross-filling*;

SCE_CF_SI = sub-centralização, *cross-filling* e sistema independente;

SCE_SI = sub-centralização e sistema independente.

Nota-se que a política de sistemas independentes, na qual cada um dos cinco mercados seria servido por somente um armazém, não foi observada em nenhum dos 10.000 cenários, ao contrário do que foi observado por Ballou e Burnetas (2003), Wanke e Saliby (2009) e Wanke (2009) em seus estudos de redes mais simples, compostas por 2 armazéns e 2 mercados. A política de sistemas independentes se caracteriza pela ausência de técnicas de *risk-pooling* no que diz respeito aos estoques. Assim sendo, o fato da mesma não ter sido observada pode indicar que, em redes mais complexas compostas por mais mercados e possíveis localidades para armazéns, as soluções ótimas devem contemplar alguma técnica de mitigação de risco de manutenção de estoques, em maior ou menor grau. Adicionalmente, poderia se esperar que essa política minimizasse os custos de distribuição uma vez que os armazéns poderiam servir os mercados geograficamente mais próximos (Das e Tyagi, 1997). Contudo, esse possível benefício pode não ter sido suficiente para compensar os prejuízos causados pela ausência de uma técnica de *risk-pooling* no que diz respeito aos estoques quando as correlações entre as demandas são consideradas.

A política de *cross-filling* total, na qual todos os mercados seriam servidos por todos os armazéns, também não foi observada em nenhum dos cenários aleatórios, novamente ao contrário do que foi observado por Ballou e Burnetas (2003), Wanke e Saliby (2009) e Wanke (2009) em seus estudos de redes mais simples. Ballou e Burnetas (2003) afirmam que tal política apresenta um *trade-off* intrínseco no que diz respeito aos estoques de segurança e de ciclo. Por um lado, ela proporciona reduções substanciais no nível do estoque de segurança agregado da rede. Entretanto, por outro lado ela pode proporcionar o maior nível de estoque de ciclo agregado da rede, já que a demanda total poderia estar dividida igualmente entre todos os armazéns, caracterizando a condição necessária para a maximização dos estoques agregados de ciclo quando se utiliza o *LEC*. Além disso, tal política pode ter um efeito negativo em termos de custos de transporte quando comparada à política dos sistemas independentes, como observaram Ballou e Burnetas (2003) e Wanke e Saliby (2009). Esse efeito é facilmente compreendido, uma vez que todos os armazéns devem receber ressurgimento e que há distribuição para todos os mercados a partir de todos os armazéns.

Tais *trade-offs* parecem indicar que, quando se emprega o *cross-filling* total em redes de maior complexidade, os ganhos obtidos em termos de redução dos custos dos estoques de

segurança não são suficientes para compensar os prejuízos ocorridos em termos dos custos dos estoques de ciclo, dos custos de ressuprimento dos armazéns e dos custos de distribuição para os mercados, fazendo com que a política não possibilite a obtenção de resultados ótimos para o custo total da rede.

Além disso, o número máximo de armazéns abertos na rede foi quatro, apesar de ter havido cinco possíveis localidades para os mesmos. Esse fato pode indicar que há um limite para o número de armazéns abertos na rede a partir do qual não há mais ganhos em termos de minimização de custo total de operação, ao menos no caso em que não são consideradas restrições de capacidade dos armazéns.

No que diz respeito às políticas observadas, centralização total e mista, é interessante notar que em mais de 94% dos cenários a política de centralização total permitiu a otimização dos custos da rede. Esse fato pode indicar que em redes de maior complexidade e que não foram estudadas sob hipóteses restritivas como aquelas de Maister (1976), dentre outros, as incertezas relativas às demanda dos mercados e aos *lead-times* dos armazéns aumentam de tal maneira que a centralização total se caracteriza como a melhor maneira de mitigá-las. Além disso, uma sub-centralização sempre foi observada em todas as ocorrências da política mista, reforçando a idéia de que a mitigação de risco é sempre explorada quando possível. A grande ocorrência da política de centralização total que, segundo Wanke e Saliby (2009), minimiza os níveis totais de estoque e conseqüentemente os custos dos mesmos, pode também indicar que em redes de maior complexidade, ao menos com os parâmetros de entrada utilizados nesta pesquisa, os custos de manutenção estoques são predominantes e exigem uma política que os minimize. A grande ocorrência da política de centralização total e das sub-centralizações também pode indicar que o *pooling* de demanda, que é o tipo de agrupamento que ocorre quando uma centralização é empregada, apresenta benefícios mais substanciais do que o *pooling* da demanda durante o *lead-time*, que é o tipo de agrupamento que ocorre quando o *cross-filling* é empregado, ao menos para os parâmetros de entrada utilizados nesta pesquisa.

No entanto, em poucos cenários as políticas de *cross-filling* e de sistemas independentes foram observadas em partes da rede de distribuição, dentro do contexto das políticas mistas. Isso indica que apesar das mesmas não serem observadas como a política predominante, elas

ajudam a proporcionar custos mínimos da rede. Mesmo que sejam observadas em pouco mais de 11% dos cenários, tais políticas tem sua importância. Primeiramente, a política de sistemas independentes é importante para isolar mercados, proporcionando aos mesmos um tratamento mais customizado em termos do serviço prestado e velocidade de atendimento. Além disso, a política dos sistemas independentes pode ser útil e proporcionar benefícios em termos de custo de distribuição quando os custos de transporte são bastante altos, devido a, por exemplo, necessidade de utilização de modal de transporte *Premium*. A política do *cross-filling*, por sua vez, é importante para promover o *pooling* de demanda durante o *lead-time*, ajudando a aumentar a disponibilidade de produtos por evitar *stock-outs* no caso de picos de demanda durante o *lead-time*.

Por sua vez, o Quadro 16 mostra as freqüências de abertura de cada um dos armazéns nas duas políticas observadas. Já a Figura 13 traz uma representação mais visual para a freqüência da abertura dos cinco diferentes armazéns, mas sem a segmentação por política de ocorrência. Pode-se notar que não há tendências para a abertura dos armazéns, já que os mesmos apresentaram frequências de aberturas muito próximas umas das outras. Isso é facilmente verificado através da Figura 13.

Quadro 16 - Freqüências da abertura dos cinco diferentes armazéns.

Política	Número Total de Armazéns Abertos na Rede	Armazém 1 aberto?		Armazém 2 aberto?		Armazém 3 aberto?		Armazém 4 aberto?		Armazém 5 aberto?	
		Não	Sim	Não	Sim	Não	Sim	Não	Sim	Não	Sim
Centralização Total	1	7336	2101	7494	1943	7681	1756	7609	1828	7628	1809
Mista	2	457	94	350	201	299	252	330	221	217	334
	3	7	2	2	7	3	6	3	6	3	6
	4		3		3	2	1	1	2		3
Sub-Total		7800	2200	7846	2154	7985	2015	7943	2057	7848	2152
Total Geral		10000		10000		10000		10000		10000	

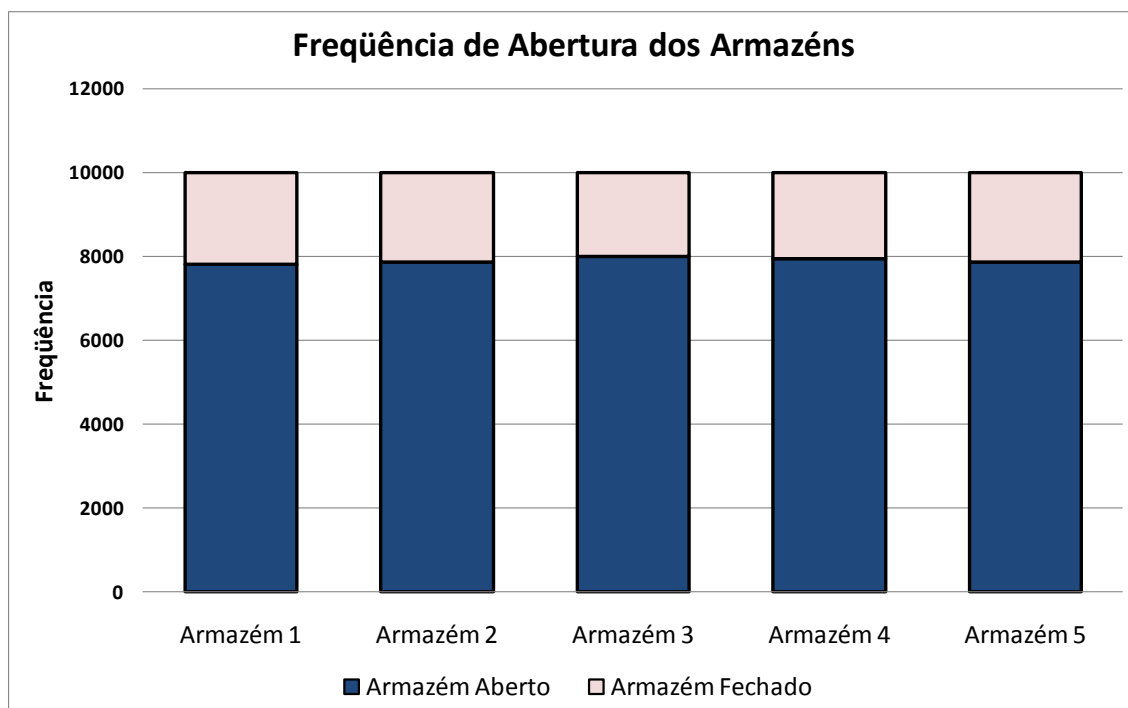


Figura 13 - Frequência de abertura dos armazéns.

O Quadro 17 apresenta a situação de cada um dos mercados nas análises de sensibilidade.

Quadro 17 - Situação de cada um dos mercados.

Situação do mercado	Mercado 1	Mercado 2	Mercado 3	Mercado 4	Mercado 5
Centralizado	9437	9437	9437	9437	9437
<i>Cross-filling</i>	28	31	32	27	45
Sistema Independente	41	25	97	37	212
Sub-centralizado	494	507	434	499	306
Total	10000	10000	10000	10000	10000

Os dois quadros precedentes chamam a atenção para uma particularidade em relação aos mercados 3 (Vitória) e 5 (Curitiba) no que diz respeito a uma maior frequência de sistemas independentes, ou seja, de armazéns abertos exclusivamente para atendê-los. Isso se deve, provavelmente, ao fato das maiores distâncias médias que esses mercados apresentam em relação aos possíveis armazéns de origem, conforme se pode notar no Quadro 6, indicando uma tendência do que se pode esperar no que diz respeito à adoção de sistemas independentes.

Fechando a apresentação dos resultados, o Quadro 18 apresenta as estatísticas descritivas para os componentes de custo da rede estudada. Adicionalmente, o Anexo 4 apresenta os histogramas dos componentes dos custos. Uma análise mais aprofundada no que diz respeito a estes componentes será feita posteriormente, quando as diferentes políticas de alocação forem caracterizadas por meio dos testes de Kruskal-Wallis e mediana.

Quadro 18 - Resumo das estatísticas descritivas dos custos da rede.

Componente de custo	Mínimo	Máximo	Média	Mediana	Desvio-padrão	Desvio percentual em relação à Mediana	
						Mínimo	Máximo
Custo total de ressuprimento	368,17	2303,53	773,64	708,21	270,13	-48,0%	225,3%
Custo total de distribuição	309,91	489,96	404,56	404,47	24,89	-23,4%	21,1%
Custo total de transporte (ressuprimento e distribuição)	711,42	2729,33	1178,20	1113,69	273,68	-36,1%	145,1%
Custo total de estoque de ciclo	75,60	265,70	142,62	142,21	30,89	-46,8%	86,8%
Custo total de estoque de segurança	84,23	715,48	285,24	267,92	115,17	-68,6%	167,0%
Custo total da rede (transporte e estoque)	997,85	3092,61	1606,06	1559,00	293,43	-36,0%	98,4%

6.2 Testes de Kruskal-Wallis e de Mediana

O Quadro 19 apresenta os testes de Kruskal-Wallis e de mediana realizados no intuito de caracterizar as políticas de alocação de estoques observadas em termos dos parâmetros de entrada do problema. Isso responde as perguntas **f.** e **g.** dos objetivos específicos da pesquisa, ou seja, como são caracterizadas as políticas de alocação de estoques em termos dos parâmetros utilizados na análise de sensibilidade e qual é o impacto de cada uma das políticas no custo total da rede e nos seus principais componentes, respectivamente. As variáveis que apresentaram diferença de mediana estatisticamente significativa foram destacadas em **negrito** e **itálico**.

Quadro 19 - Testes de Kruskal-Wallis e de Mediana.

Nome da Variável	Mediana		Teste K-W		Teste de Mediana	
	Centralização Total	Mista	χ^2	Signif.	χ^2	Signif.
Demanda do mercado 1	99,820	100,341	1,719	0,190	0,830	0,362
Demanda do mercado 2	99,918	100,262	0,003	0,958	0,423	0,515
Demanda do mercado 3	100,311	100,618	0,631	0,427	0,047	0,828
Demanda do mercado 4	99,999	99,248	2,451	0,117	1,176	0,278
<i>Demanda do mercado 5</i>	<i>99,620</i>	<i>102,262</i>	<i>9,076</i>	<i>0,003</i>	<i>8,449</i>	<i>0,004</i>
Desvio padrão da demanda do mercado 1	16,505	15,564	2,037	0,153	2,577	0,108
Desvio padrão da demanda do mercado 2	16,574	16,841	0,937	0,333	0,047	0,828
<i>Desvio padrão da demanda do mercado 3</i>	<i>16,433</i>	<i>15,319</i>	<i>4,076</i>	<i>0,043</i>	<i>3,164</i>	<i>0,075</i>
Desvio padrão da demanda do mercado 4	16,501	16,617	0,261	0,610	0,002	0,965
<i>Desvio padrão da demanda do mercado 5</i>	<i>16,619</i>	<i>15,141</i>	<i>5,354</i>	<i>0,021</i>	<i>8,449</i>	<i>0,004</i>

Nome da Variável	Mediana		Teste K-W		Teste de Mediana	
	Centralização Total	Mista	χ^2	Signif.	χ^2	Signif.
Correlação entre as demandas dos mercados 1 e 2	-0,013	0,016	2,526	0,112	1,176	0,278
Correlação entre as demandas dos mercados 1 e 3	0,003	-0,007	0,226	0,634	0,047	0,828
Correlação entre as demandas dos mercados 1 e 4	0,002	-0,013	0,269	0,604	0,228	0,633
Correlação entre as demandas dos mercados 1 e 5	0,005	0,002	0,002	0,965	0,002	0,965
Correlação entre as demandas dos mercados 2 e 3	0,007	0,003	0,011	0,915	0,017	0,896
Correlação entre as demandas dos mercados 2 e 4	0,020	0,049	0,703	0,402	0,318	0,573
Correlação entre as demandas dos mercados 2 e 5	-0,009	-0,005	1,583	0,208	0,017	0,896
Correlação entre as demandas dos mercados 3 e 4	-0,004	0,031	0,166	0,684	0,679	0,410
Correlação entre as demandas dos mercados 3 e 5	-0,004	0,059	1,262	0,261	1,583	0,208
Correlação entre as demandas dos mercados 4 e 5	0,011	0,001	0,531	0,466	0,152	0,696
Lead-time de ressuprimento do armazém 1	3,001	3,419	48,840	0,000	29,409	0,000
Lead-time de ressuprimento do armazém 2	2,973	2,790	5,716	0,017	5,287	0,021
Lead-time de ressuprimento do armazém 3	3,027	2,647	24,777	0,000	17,709	0,000
Lead time de ressuprimento do armazém 4	3,043	2,710	17,146	0,000	14,246	0,000
Lead time de ressuprimento do armazém 5	3,085	2,296	127,150	0,000	116,696	0,000
Desvio-padrão do <i>lead-time</i> de ressuprimento do armazém 1	1,247	1,297	0,793	0,373	1,176	0,278
Desvio-padrão do <i>lead-time</i> de ressuprimento do armazém 2	1,251	1,252	1,872	0,171	0,002	0,965
Desvio-padrão do <i>lead-time</i> de ressuprimento do armazém 3	1,250	1,246	0,673	0,412	0,092	0,761
Desvio-padrão do <i>lead-time</i> de ressuprimento do armazém 4	1,253	1,240	0,252	0,616	0,092	0,761
Desvio-padrão do <i>lead-time</i> de ressuprimento do armazém 5	1,245	1,251	0,133	0,716	0,017	0,896
Custo unitário de transporte entre o armazém 1 e o mercado 1	0,550	0,550	0,019	0,890	0,017	0,896
Custo unitário de transporte entre o armazém 1 e o mercado 2	0,820	0,820	0,382	0,537	0,679	0,410
Custo unitário de transporte entre o armazém 1 e o mercado 3	0,940	0,939	2,931	0,087	3,480	0,062
Custo unitário de transporte entre o armazém 1 e o mercado 4	0,860	0,860	0,049	0,825	0,423	0,515
Custo unitário de transporte entre o armazém 1 e o mercado 5	0,820	0,821	0,857	0,355	0,679	0,410
Custo unitário de transporte entre o armazém 2 e o mercado 1	0,820	0,819	1,584	0,208	2,050	0,152
Custo unitário de transporte entre o armazém 2 e o mercado 2	0,551	0,548	2,466	0,116	2,577	0,108
Custo unitário de transporte entre o armazém 2 e o mercado 3	0,861	0,860	0,363	0,547	0,679	0,410
Custo unitário de transporte entre o armazém 2 e o mercado 4	0,820	0,820	0,869	0,351	0,152	0,696
Custo unitário de transporte entre o armazém 2 e o mercado 5	0,900	0,900	0,066	0,798	0,544	0,461
Custo unitário de transporte entre o armazém 3 e o mercado 1	0,940	0,940	0,002	0,966	0,092	0,761
Custo unitário de transporte entre o armazém 3 e o mercado 2	0,860	0,860	0,023	0,880	0,092	0,761
Custo unitário de transporte entre o armazém 3 e o mercado 3	0,550	0,547	1,701	0,192	0,830	0,362
Custo unitário de transporte entre o armazém 3 e o mercado 4	0,860	0,861	2,940	0,086	2,863	0,091
Custo unitário de transporte entre o armazém 3 e o mercado 5	0,980	0,981	0,257	0,612	0,228	0,633
Custo unitário de transporte entre o armazém 4 e o mercado 1	0,860	0,861	1,172	0,279	1,583	0,208
Custo unitário de transporte entre o armazém 4 e o mercado 2	0,820	0,821	1,121	0,290	2,577	0,108
Custo unitário de transporte entre o armazém 4 e o mercado 3	0,860	0,861	3,706	0,054	4,158	0,041
Custo unitário de transporte entre o armazém 4 e o mercado 4	0,549	0,548	0,952	0,329	0,830	0,362
Custo unitário de transporte entre o armazém 4 e o mercado 5	0,940	0,941	0,287	0,592	0,996	0,318
Custo unitário de transporte entre o armazém 5 e o mercado 1	0,820	0,820	0,017	0,897	0,318	0,573
Custo unitário de transporte entre o armazém 5 e o mercado 2	0,900	0,899	1,157	0,282	0,996	0,318
Custo unitário de transporte entre o armazém 5 e o mercado 3	0,980	0,980	0,485	0,486	0,092	0,761
Custo unitário de transporte entre o armazém 5 e o mercado 4	0,940	0,940	0,094	0,759	0,092	0,761

Nome da Variável	Mediana		Teste K-W		Teste de Mediana	
	Centralização Total	Mista	χ^2	Signif.	χ^2	Signif.
Custo unitário de transporte entre o armazém 5 e o mercado 5	0,550	0,549	1,484	0,223	0,152	0,696
Custo de manutenção de estoques no armazém 1	0,517	0,523	0,226	0,634	0,679	0,410
Custo de manutenção de estoques no armazém 2	0,514	0,511	0,103	0,748	0,092	0,761
Custo de manutenção de estoques no armazém 3	0,516	0,498	7,797	0,005	7,004	0,008
Custo de manutenção de estoques no armazém 4	0,517	0,505	4,100	0,043	3,480	0,062
Custo de manutenção de estoques no armazém 5	0,515	0,485	18,801	0,000	18,447	0,000
Custo de colocação de pedidos no armazém 1	42,020	41,328	0,462	0,497	0,679	0,410
Custo de colocação de pedidos no armazém 2	42,027	40,026	4,110	0,043	0,996	0,318
Custo de colocação de pedidos no armazém 3	41,729	39,413	4,221	0,040	2,306	0,129
Custo de colocação de pedidos no armazém 4	42,034	40,385	4,638	0,031	2,306	0,129
Custo de colocação de pedidos no armazém 5	42,341	39,621	11,370	0,001	5,287	0,021
Custo unitário e diário de ressuprimento dos armazéns	0,901	0,900	0,937	0,333	0,228	0,633
Custo total de ressuprimento	701,915	807,203	95,700	0,000	52,492	0,000
Custo total de distribuição	405,741	373,201	675,110	0,000	352,885	0,000
Custo total de transporte (ressuprimento e distribuição)	1109,806	1173,338	44,349	0,000	25,765	0,000
Custo total de estoque de ciclo	140,270	178,419	613,115	0,000	352,885	0,000
Custo total de estoque de segurança	266,740	287,185	14,379	0,000	12,349	0,000
Custo total da rede (transporte e estoques)	1551,833	1674,259	98,962	0,000	68,663	0,000
DMax/DMin	1,320	1,316	0,727	0,394	1,176	0,278
SDMax/SDMin	3,763	3,880	2,505	0,113	1,583	0,208
LTMax/LTMin	2,782	2,480	49,588	0,000	33,294	0,000
SLTMax/SLTMin	2,446	2,419	1,137	0,286	0,152	0,696
CEMax/CEMin	1,569	1,552	0,715	0,398	0,679	0,410
CPMax/CPMin	2,426	2,453	0,216	0,642	0,830	0,362
CP/CE_Armazém1	81,431	81,017	0,813	0,367	0,228	0,633
CP/CE_Armazém2	81,449	78,777	3,145	0,076	3,480	0,062
CP/CE_Armazém3	81,050	79,543	0,608	0,435	0,996	0,318
CP/CE_Armazém4	80,855	78,757	0,974	0,324	0,996	0,318
CP/CE_Armazém5	82,262	80,723	1,061	0,303	0,830	0,362
(CP/CE)Max/(CP/CE)Min	2,667	2,582	0,620	0,431	2,863	0,091
S/CEMin	2,266	2,268	0,496	0,481	0,017	0,896
S/CEMax	1,430	1,430	2,212	0,137	0,002	0,965
S/CPMin	0,0380	0,0390	4,213	0,040	5,287	0,021
S/CPMax	0,0150	0,0153	6,133	0,013	3,480	0,062
Demanda total na rede (soma das demandas dos mercados)	499,881	503,466	3,502	0,061	5,694	0,017
Soma de todas as correlações entre as demandas dos mercados	-0,007	-0,018	0,024	0,877	0,002	0,965
Valor absoluto da CorrDMax/CorrDMin	0,998	1,000	0,001	0,975	0,047	0,828
Número de correlações entre as demandas dos mercados que são positivas	5,000	5,000	1,177	0,278	0,002	0,967
Número de correlações entre as demandas dos mercados que são negativas	5,000	5,000	1,177	0,278	2,919	0,088
Média aritmética da demanda dos 5 mercados	99,976	100,693	3,502	0,061	5,694	0,017
Média aritmética do desvio-padrão da demanda dos 5 mercados	16,527	15,916	11,915	0,001	8,961	0,003
Média aritmética da correlação entre as demandas dos 5 mercados	-0,001	-0,002	0,024	0,877	0,002	0,965
Média aritmética do lead-time de ressuprimento dos 5 armazéns	3,021	2,836	49,626	0,000	46,393	0,000
Média aritmética do desvio-padrão do lead-time de ressuprimento dos 5 armazéns	1,248	1,255	0,763	0,382	0,679	0,410
Média aritmética do custo de manutenção de estoques dos 5 armazéns	0,515	0,508	15,438	0,000	11,747	0,001
Média aritmética do custo de colocação de pedidos dos 5 armazéns	42,023	40,611	19,302	0,000	12,349	0,000
Média aritmética do lead-time dos armazéns abertos	1,569	1,840	138,493	0,000	83,796	0,000
Média aritmética do desvio-padrão do lead-time dos armazéns abertos	1,093	1,192	23,677	0,000	34,302	0,000

Na análise do Quadro 19 para se responder a questão *f.* dos objetivos da pesquisa (como são caracterizadas as políticas em termos dos parâmetros de entrada), a primeira informação que chama a atenção diz respeito aos *lead-times* de ressuprimento dos cinco possíveis armazéns, já que há diferenças estatisticamente significativas entre as medianas dos mesmos para as duas categorias de política. Nota-se, com exceção do armazém 1, que a política de centralização total é caracterizada por maiores valores de *lead-time* dos armazéns do que a política mista. Isso é confirmado pela média aritmética dos *lead-times* dos cinco possíveis armazéns, que também apresentam valores mais altos na política de centralização total. Além disso, pode-se dizer que a amplitude dos *lead-times* médios dos possíveis armazéns é maior quando ocorre a política de centralização total, uma vez que a relação entre os *lead-times* máximo e mínimo é maior nessa política. Até este momento, as variáveis analisadas levaram em conta informações dos armazéns independentemente dos mesmos estarem abertos ou fechados na rede otimizada. As próximas duas variáveis, a média aritmética dos *lead-times* dos armazéns abertos e a média aritmética dos desvios-padrão do *lead-time* dos armazéns abertos, ao contrário e como seus próprios nomes indicam, dizem respeito a somente os armazéns abertos na rede otimizada e trazem informações sobre quais armazéns devem ser escolhidos. Em especial, quando a política de centralização total foi adotada no cenário, tais variáveis são exatamente o *lead-time* e o desvio-padrão do *lead-time* do único armazém aberto. Assim, a média aritmética dos *lead-times* dos armazéns abertos e a média aritmética dos desvios-padrão do *lead-time* dos armazéns abertos apresentam valores inferiores para a política de centralização total, sugerindo que os armazéns abertos quando tal política ocorre apresentam, na média, menores valores de *lead-time* e de desvio-padrão do *lead-time*. Esses resultados corroboram os achados de Wanke e Saliby (2009), especificamente aqueles apresentados na tabela 4 do respectivo estudo.

Tais informações indicam que a política de centralização prevalece em redes que apresentam *lead-time* médios maiores e mais dispersos nos possíveis armazéns, sendo utilizada para mitigar o risco em relação ao ressuprimento dos mesmos, ao se optar pela centralização de diferentes demandas num único armazém. Já a política mista, ao contrário, é usada quando os *lead-times* médios dos possíveis armazéns são menores e menos dispersos, permitindo o agrupamento de demandas de diferentes origens em armazéns distintos.

Em relação aos custos de manutenção de estoques, pode-se notar que os armazéns três, quatro e cinco apresentam valores mais altos para esse parâmetro na política de centralização total. Além disso, a média aritmética do custo de manutenção de estoques dos cinco armazéns

também é mais alta em tal política. Uma interpretação do custo de manutenção de estoques é que o mesmo reflete o valor dos produtos armazenados, sendo que altos custos de manutenção de estoques representam produtos de alto valor, e vice-versa. Assim, as informações obtidas em relação aos custos de manutenção de estoques indicam que produtos de alto valor favorecem a política de centralização total, devendo ser preferencialmente centralizados em um único armazém. Por outro lado, produtos com custo mais baixo favorecem outros tipos de política, como a mista. Este resultado está de acordo com as conclusões de Wanke e Saliby (2009).

Outra variável que apresentou diferenças significativas entre as medianas foi o custo de colocação de pedidos. Pode-se notar que seu valor é maior na política de centralização total do que na mista para os armazéns dois, três, quatro e cinco. Além disso, a média aritmética do custo de colocação de pedidos dos cinco armazéns também é mais alta na política de centralização total. Isso indica que quando os custos de pedidos nos armazéns são, na média, mais altos, é mais benéfico que as operações sejam centralizadas em um único armazém. Ao contrário, custos de pedidos mais baixos favorecem a adoção da política mista, com a pulverização dos pedidos por mais de um armazém.

Em seguida, nota-se também diferença de medianas para a relação entre o custo de ressuprimento dos armazéns e o menor custo de colocação de pedidos observado entre os cinco possíveis armazéns. Essa relação é menor na política centralização total. Além disso, a relação entre o custo de ressuprimento dos armazéns e o maior custo de colocação de pedidos observado entre os cinco possíveis armazéns também apresenta diferença de mediana e também é menor na política centralização total. Os dois resultados podem ser uma consequência direta do fato dos armazéns possuírem maiores custos de pedidos na política de centralização total.

Finalmente, notam-se diferenças de mediana para o desvio-padrão da demanda dos mercados. Os mercados 3 e 5 apresentam valores mais altos desta variável na política de centralização total. Além disso, a média aritmética do desvio-padrão da demanda dos cinco mercados também é mais alta na política citada. Assim, pode-se dizer que a política de centralização total é favorecida quando os desvios-padrão dos mercados apresentam valores mais altos, sendo, então, usada para mitigação das variações da demandas dos mercados. Ao contrário, quando as demandas dos mercados apresentam menor variabilidade, ou seja, quando os

desvios-padrão da demanda dos mercados são menores, a política mista é favorecida. Resultados semelhantes também são verificados em Wanke e Saliby (2009).

As informações referentes aos componentes do custo total da rede permitiram que a pergunta **g.** dos objetivos da pesquisa fosse respondida (qual o impacto das políticas nos componentes do custo da rede). Percebe-se que o custo total de ressuprimento é menor para a política de centralização total. Essa informação é explicada pelo fato dos custos de ressuprimento serem diretamente proporcionais aos *lead-times* dos armazéns abertos. Uma vez que na política de centralização total os armazéns abertos apresentam, na média, menor *lead-time*, é coerente se esperar que os custos de ressuprimento também sejam menores nessa política. Já os custos de distribuição são menores na política mista, onde há certo nível de descentralização, corroborando as observações de Tyagi e Das (1997). Isso indica que os mercados também foram alocados aos armazéns abertos em se considerando sua proximidade a estes últimos, o que resulta em menores custos de transporte. Apesar do clássico *trade-off* existente entre os custos de ressuprimento e distribuição nas duas políticas, o custo total de transporte, que é a soma dos custos precedentes, foi menor na política de centralização total.

O custo dos estoques de ciclo, por sua vez, foi menor na política de centralização total. Essa observação está de acordo com os resultados de Ballou e Burnetas (2003) e Wanke e Saliby (2009). Além disso, os custos com os estoques de segurança também foram menores na política de centralização total. Como consequência direta, o custo total dos estoques é menor na política de centralização total do que na mista, estando também de acordo com os resultados de Wanke e Saliby (2009). Isso mostra que a centralização total, quando é a solução ótima da rede, pode gerar os menores custos de estoques. Por fim, o custo total da rede foi menor na política de centralização total, já que tanto os custos totais de transporte e de estoque também eram menores.

O Quadro 20 apresenta um resumo dos testes de Kruskal-Wallis e de Mediana, caracterizando as políticas de alocação de estoques observadas em termos dos parâmetros de entrada que apresentaram diferença estatisticamente significativa em suas medianas.

Quadro 20 - Caracterização das políticas de alocação de estoques observadas em termos dos parâmetros de entrada do modelo de otimização.

Nome da Variável	Política	
	Centralização Total	Mista
Demanda do Mercado 5	Baixo	Alto
Desvio Padrão da Demanda do Mercado 3	Alto	Baixo
Desvio Padrão da Demanda do Mercado 5	Alto	Baixo
Lead Time de Ressuprimento do Armazém 1	Baixo	Alto
Lead Time de Ressuprimento do Armazém 2	Alto	Baixo
Lead Time de Ressuprimento do Armazém 3	Alto	Baixo
Lead Time de Ressuprimento do Armazém 4	Alto	Baixo
Lead Time de Ressuprimento do Armazém 5	Alto	Baixo
Custo de Manutenção de Estoques no Armazém 3	Alto	Baixo
Custo de Manutenção de Estoques no Armazém 4	Alto	Baixo
Custo de Manutenção de Estoques no Armazém 5	Alto	Baixo
Custo de Colocação de Pedidos no Armazém 2	Alto	Baixo
Custo de Colocação de Pedidos no Armazém 3	Alto	Baixo
Custo de Colocação de Pedidos no Armazém 4	Alto	Baixo
Custo de Colocação de Pedidos no Armazém 5	Alto	Baixo
LTM _{Max} /LT _{Min}	Alto	Baixo
S/CP _{Min}	Baixo	Alto
S/CP _{Max}	Baixo	Alto
Média Aritmética do Desvio-Padrão da Demanda dos 5 Mercados	Alto	Baixo
Média Aritmética do Lead Time de ressuprimento dos 5 Armazéns	Alto	Baixo
Média Aritmética do Custo de Manutenção de Estoques dos 5 Armazéns	Alto	Baixo
Média Aritmética do Custo de Colocação de Pedidos dos 5 Armazéns	Alto	Baixo
Média Aritmética do Lead Time dos Armazéns Abertos	Baixo	Alto
Média Aritmética do Desvio-Padrão do Lead Time dos Armazéns Abertos	Baixo	Alto

6.3 Regressão Logística

Conforme apresentado anteriormente, somente duas categorias das políticas de alocação de estoques (centralização total e mista) ocorreram nas análises de sensibilidade. Isso permitiu que uma regressão logística binomial, que é um caso particular da regressão logística multinomial apresentada na seção 5.3, fosse realizada. Dessa maneira, a pergunta **h.** dos objetivos da pesquisa pode ser respondida, mostrando quais são as variáveis que tem o maior impacto na probabilidade de ocorrência das políticas. A categoria de referência foi a política mista, uma vez que tal política apresentou a menor frequência de ocorrência (c.f. seção 5.3). O

Quadro 21 mostra os resultados da regressão, onde as variáveis que apresentaram significância estatística foram destacadas em negrito e itálico.

Quadro 21 - Regressão logística tendo como categoria de referência a política mista. Obs.: N.A significa Não Aplicável.

Nome da Variável	B	Erro Padrão	EXP(B)	Wald	Signif.
Demanda do mercado 1	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	0,162
Demanda do mercado 2	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	0,941
Demanda do mercado 3	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	0,424
Demanda do mercado 4	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	0,061
<i>Demanda do mercado 5</i>	<i>-0,011</i>	<i>0,004</i>	<i>0,989</i>	<i>8,559</i>	<i>0,003</i>
Desvio padrão da demanda do mercado 1	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	0,101
Desvio padrão da demanda do mercado 2	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	0,211
Desvio padrão da demanda do mercado 3	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	0,083
Desvio padrão da demanda do mercado 4	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	0,853
Desvio padrão da demanda do mercado 5	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	0,051
Correlação entre as demandas dos mercados 1 e 2	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	0,132
Correlação entre as demandas dos mercados 1 e 3	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	0,776
Correlação entre as demandas dos mercados 1 e 4	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	0,448
Correlação entre as demandas dos mercados 1 e 5	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	0,736
Correlação entre as demandas dos mercados 2 e 3	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	0,903
Correlação entre as demandas dos mercados 2 e 4	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	0,442
Correlação entre as demandas dos mercados 2 e 5	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	0,088
Correlação entre as demandas dos mercados 3 e 4	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	0,735
Correlação entre as demandas dos mercados 3 e 5	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	0,392
Correlação entre as demandas dos mercados 4 e 5	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	0,622
<i>Lead-time de ressuprimento do armazém 1</i>	<i>-0,325</i>	<i>0,043</i>	<i>0,723</i>	<i>57,980</i>	<i>0,000</i>
<i>Lead-time de ressuprimento do armazém 2</i>	<i>0,141</i>	<i>0,042</i>	<i>1,151</i>	<i>11,518</i>	<i>0,001</i>
<i>Lead-time de ressuprimento do armazém 3</i>	<i>0,241</i>	<i>0,042</i>	<i>1,273</i>	<i>32,578</i>	<i>0,000</i>
<i>Lead-time de ressuprimento do armazém 4</i>	<i>0,204</i>	<i>0,042</i>	<i>1,226</i>	<i>23,576</i>	<i>0,000</i>
<i>Lead-time de ressuprimento do armazém 5</i>	<i>0,579</i>	<i>0,046</i>	<i>1,784</i>	<i>155,818</i>	<i>0,000</i>
Desvio-padrão do <i>lead-time</i> de ressuprimento do armazém 1	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	0,508
Desvio-padrão do <i>lead-time</i> de ressuprimento do armazém 2	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	0,161
Desvio-padrão do <i>lead-time</i> de ressuprimento do armazém 3	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	0,409
Desvio-padrão do <i>lead-time</i> de ressuprimento do armazém 4	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	0,563
Desvio-padrão do <i>lead-time</i> de ressuprimento do armazém 5	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	0,811
Custo unitário de transporte entre o armazém 1 e o mercado 1	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	0,957
Custo unitário de transporte entre o armazém 1 e o mercado 2	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	0,427
Custo unitário de transporte entre o armazém 1 e o mercado 3	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	0,086
Custo unitário de transporte entre o armazém 1 e o mercado 4	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	0,469
Custo unitário de transporte entre o armazém 1 e o mercado 5	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	0,467
Custo unitário de transporte entre o armazém 2 e o mercado 1	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	0,176
Custo unitário de transporte entre o armazém 2 e o mercado 2	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	0,172
Custo unitário de transporte entre o armazém 2 e o mercado 3	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	0,556
Custo unitário de transporte entre o armazém 2 e o mercado 4	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	0,401

Nome da Variável	B	Erro Padrão	EXP(B)	Wald	Signif.
Custo unitário de transporte entre o armazém 2 e o mercado 5	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	0,850
Custo unitário de transporte entre o armazém 3 e o mercado 1	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	0,736
Custo unitário de transporte entre o armazém 3 e o mercado 2	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	0,909
Custo unitário de transporte entre o armazém 3 e o mercado 3	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	0,220
Custo unitário de transporte entre o armazém 3 e o mercado 4	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	0,126
Custo unitário de transporte entre o armazém 3 e o mercado 5	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	0,520
Custo unitário de transporte entre o armazém 4 e o mercado 1	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	0,333
Custo unitário de transporte entre o armazém 4 e o mercado 2	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	0,191
Custo unitário de transporte entre o armazém 4 e o mercado 3	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	0,051
Custo unitário de transporte entre o armazém 4 e o mercado 4	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	0,267
Custo unitário de transporte entre o armazém 4 e o mercado 5	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	0,516
Custo unitário de transporte entre o armazém 5 e o mercado 1	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	0,974
Custo unitário de transporte entre o armazém 5 e o mercado 2	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	0,281
Custo unitário de transporte entre o armazém 5 e o mercado 3	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	0,392
Custo unitário de transporte entre o armazém 5 e o mercado 4	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	0,875
Custo unitário de transporte entre o armazém 5 e o mercado 5	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	0,184
Custo de manutenção de estoques no armazém 1	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	0,409
Custo de manutenção de estoques no armazém 2	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	0,927
Custo de manutenção de estoques no armazém 3	1,970	0,527	7,171	13,973	0,000
Custo de manutenção de estoques no armazém 4	1,509	0,527	4,523	8,213	0,004
Custo de manutenção de estoques no armazém 5	2,818	0,524	16,740	28,869	0,000
Custo unitário e diário de ressuprimento dos armazéns	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	0,239
DMax/DMin	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	0,236
SDMax/SDMin	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	0,074
LTM_{Max}/LTM_{Min}	0,662	0,062	1,939	114,637	0,000
SLTMax/SLTMin	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	0,152
CEMax/CEMin	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	0,231
CPMax/CPMin	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	0,717
CP/CE_Armazém1	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	0,267
CP/CE_Armazém2	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	0,137
CP/CE_Armazém3	0,003	0,001	1,003	4,226	0,040
CP/CE_Armazém4	0,003	0,001	1,003	5,423	0,020
CP/CE_Armazém5	0,005	0,001	1,005	10,514	0,001
(CP/CE)Max/(CP/CE)Min	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	0,739
S/CEMin	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	0,051
S/CEMax	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	0,403
S/CPMin	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	0,870
S/CPMax	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	0,454
Valor absoluto da CorrDMax/CorrDMin	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	0,788
Número de correlações entre as demandas dos mercados que são positivas	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	0,240
Constante	-4,233	0,779	0,015	29,536	0,000
R² de Nagelkerke	0,116				

Para compreender como as variáveis citadas acima influenciam a probabilidade de ocorrência da política de centralização total em relação à probabilidade de ocorrência da política mista, é necessário analisar a Razão de Vantagens ($EXP(B)$ ou *Odds Ratio*) de cada uma das variáveis que apresentou significância estatística. Conforme explanado na seção 5.3, a Razão de Vantagens mede como o aumento de uma unidade no valor da variável independente pode aumentar (ou diminuir) a probabilidade de ocorrência da categoria estudada (política de centralização total) em $[EXP(B) - 1] \times 100\%$ em relação à probabilidade de ocorrência da categoria de referência (política mista). O Quadro 22 apresenta as informações referentes à Razão de Vantagens de cada variável independente que se mostrou significativa, sendo que as variáveis foram ordenadas de forma decrescente a partir daquela que mais favorece a ocorrência da política de centralização total.

Quadro 22 - Variáveis que têm maior influência na ocorrência da política de centralização total. As variáveis são mostradas em ordem decrescente de importância, de acordo com seus valores da Razão de Vantagens, ou $EXP(B)$.

Nome da Variável	$EXP(B)$	Signif.	$[EXP(B) - 1] \times 100\%$
Custo de manutenção de estoques no armazém 5	16,740	0,000	1574,0
Custo de manutenção de estoques no armazém 3	7,171	0,000	617,1
Custo de manutenção de estoques no armazém 4	4,523	0,004	352,3
L _T Max/L _T Min	1,939	0,000	93,9
Lead-time de ressuprimento do armazém 5	1,784	0,000	78,4
Lead-time de ressuprimento do armazém 3	1,273	0,000	27,3
Lead-time de ressuprimento do armazém 4	1,226	0,000	22,6
Lead-time de ressuprimento do armazém 2	1,151	0,001	15,1
CP/CE_Armazém5	1,005	0,001	0,5
CP/CE_Armazém3	1,003	0,040	0,3
CP/CE_Armazém4	1,003	0,020	0,3
Demanda do mercado 5	0,989	0,003	-1,1
Lead-time de ressuprimento do armazém 1	0,723	0,000	-27,7
R^2 de Nagelkerke	0,116		

Legenda: $[EXP(B) - 1] \times 100\%$ é a influência do aumento de uma unidade no valor da variável independente na probabilidade de ocorrência da política de centralização total (aumento ou diminuição da probabilidade)

Nota-se no Quadro 22 que as variáveis que têm as maiores influências na probabilidade de ocorrência da política de centralização total são os custos de manutenção de estoques nos armazéns 5, 3 e 4. O aumento em uma unidade nos valores dos custos de manutenção de estoques nos armazéns 5, 3 e 4 aumenta, respectivamente, em 1574,0%, 617,1% e 352,3% a probabilidade de ocorrência da política de centralização total. Isso corrobora o que os testes de Kruskal-Wallis e de mediana mostraram: produtos de alto valor, ou seja, com altos custos

de manutenção de estoques, favorecem a adoção da política de centralização total. Como consequência direta, produtos de baixo valor, ou seja, com baixos custos de manutenção de estoques, favorecem a adoção da política mista. Este resultado está de acordo com as conclusões de Wanke e Saliby (2009).

Seguindo em ordem decrescente de influência, a próxima variável importante é a amplitude dos *lead-times* médios dos armazéns, medida pela relação entre os *lead-times* máximo e mínimo dos possíveis armazéns. O aumento em uma unidade no valor da amplitude faz com que a probabilidade de ocorrência da política de centralização total aumente em 93,9%. Isso mostra que grandes amplitudes nos *lead-times* dos possíveis armazéns da rede favorecem a adoção da política de centralização total, também corroborando os resultados dos testes de Kruskal-Wallis e de mediana e estando de acordo com os achados de Wanke e Saliby (2009).

As próximas variáveis importantes são os *lead-times* dos armazéns 5, 3, 4 e 2, sendo que aumentos em uma unidade nos seus valores fazem, respectivamente, com que a probabilidade de ocorrência da política de centralização total aumente em 78,4%, 27,3%, 22,6% e 15,1%. Tais informações também reforçam os resultados dos testes de Kruskal-Wallis e mediana de que altos *lead-times* dos possíveis armazéns da rede favorecem a adoção da política de centralização total, estando mais uma vez em consonância com os resultados de Wanke e Saliby (2009). O *lead-time* do armazém 1 aparece como uma exceção, já que diminui em 27,7% a probabilidade de ocorrência da política de centralização total, consequentemente favorecendo a ocorrência da política mista.

Finalmente, as relações entre o custos de colocação de pedidos e o custos de manutenção de estoques nos armazéns 5, 4 e 3 também apresentaram significância estatística na regressão. Entretanto, suas influências na probabilidade de ocorrência da política de centralização total são bastante pequenas, já que o aumento de uma unidade no valor de tais variáveis aumenta a probabilidade, respectivamente, em apenas 0,5%, 0,3% e novamente 0,3%. A demanda do mercado 5 aparece isoladamente como uma variável importante, mas assim como as relações entre o custos de colocação de pedidos e o custos de manutenção de estoques nos armazéns 5, 4 e 3, ela não tem um influência muito grande na probabilidade de ocorrência da política de centralização total. Há uma diminuição de 1,1% de tal probabilidade quando o valor da demanda no mercado 5 aumenta em uma unidade.

6.4 Implicações Gerenciais

Uma interessante utilidade gerencial dos resultados mostrados no presente trabalho é a verificação da adequação de políticas de alocação de estoques praticadas em redes logísticas já em operação, com as conseqüentes constatação da necessidade de reorganização da rede e determinação da política mais adequada a tal reorganização. Nas situações onde as redes já estão em operação, os gestores possuem um conjunto de dados de entrada definidos e com séries históricas normalmente consistentes. Isso permite aos gestores determinar com precisão os parâmetros de entrada do modelo de localização. Permite ainda comparar valores dentro um mesmo grupo de parâmetros de entrada a partir de referências que possibilitam determinar o que é um valor alto ou baixo de um parâmetro. É justamente essa classificação de valores a condição necessária para que os resultados das análises realizadas neste estudo possam ser utilizadas na prática.

Dessa maneira, os resultados do teste de Kruskal-Wallis e mediana trazem as características dos produtos, da demanda dos mercados e da operação dos armazéns às quais cada uma das políticas observadas é mais adequada, como sumariza o Quadro 23. As informações apresentadas no quadro fornecem, assim, aos gestores importantes *insights* a serem utilizados no ato da determinação da política mais adequada às redes por eles gerenciadas. Os gestores podem medir em suas redes os valores das variáveis de entrada trazidas no Quadro 23, realizando o posterior enquadramento das mesmas nas categorias também apresentadas no quadro e decidindo se a política em prática na rede é a mais adequada para as características observadas. Caso não seja, o gestor pode promover uma reorganização da rede, tendo uma ferramenta para determinar qual política deve ser adotada na nova configuração.

Quadro 23 - Sumário da caracterização das políticas de alocação de estoques em termos dos parâmetros de entrada do problema de localização de armazéns e alocação de estoques.

Nome da Variável	Política	
	Centralização Total	Mista
Lead-times de ressuprimento dos armazéns	Alto	Baixo
Custo de manutenção de estoques nos armazéns (também interpretado com o valor dos produtos)	Alto	Baixo
Custo de colocação de pedidos no armazéns	Alto	Baixo
LTMax/LTMin (amplitude do lead-time)	Alto	Baixo

Nome da Variável	Política	
	Centralização Total	Mista
S/CPMin	Baixo	Alto
S/CPMax	Baixo	Alto
Média aritmética do desvio-padrão da demanda dos 5 mercados	Alto	Baixo
Média aritmética do lead-time de ressuprimento dos 5 armazéns	Alto	Baixo
Média aritmética do custo de manutenção de estoques dos 5 armazéns	Alto	Baixo
Média aritmética do custo de colocação de pedidos dos 5 armazéns	Alto	Baixo
Média aritmética do lead-time dos armazéns abertos	Baixo	Alto
Média aritmética do desvio-padrão do lead-time dos armazéns abertos	Baixo	Alto

Nota-se no quadro acima que há diversos parâmetros que caracterizam as políticas de alocação de estoques e que poderiam ser usados como variáveis de decisão na determinação da adequabilidade de uma política. Entretanto, uma análise com tantas opções para as variáveis de decisão seria muito penosa, ou até mesmo inviável, na prática. Nesse ponto os resultados da regressão logística se mostram especialmente importantes, pois apresentam uma priorização das variáveis de decisão. Como apresentado no Quadro 22, as variáveis que têm o maior impacto na probabilidade de ocorrência das políticas são, em ordem crescente de influência, o valor dos produtos (custo de manutenção de estoques), a amplitude dos *lead-times* dos possíveis armazéns e os próprios *lead-times* dos mesmos. Além disso, a regressão logística também mostrou que o aumento no valor das três variáveis aumenta a probabilidade de ocorrência da política de centralização total. Com base nessas informações, os gestores podem utilizar o método mostrado na Figura 14 como ponto de partida na análise da adequação de uma política ou para tomar a decisão em relação à política a ser adotada na reorganização das redes que gerenciam. Assim, altos custos de manutenção de estoques combinados com grande amplitude dos *lead-times*, ou altos *lead-times*, favoreceriam a política de centralização total. No outro extremo, baixos custos de manutenção de estoques combinados com pequena amplitude dos *lead-times*, ou baixos *lead-times*, favoreceriam a política mista. Subseqüentemente a essa primeira abordagem, os gestores podem analisar mais profundamente a adequação da política pretendida à luz das demais variáveis mostradas no Quadro 23.

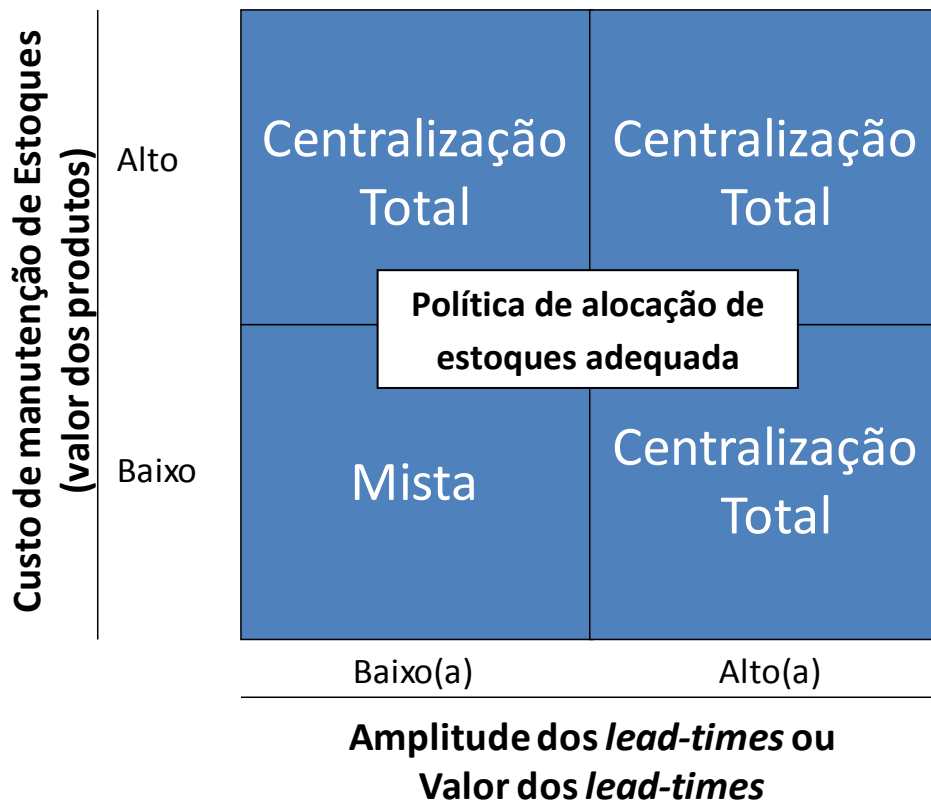


Figura 14 - Método para se determinar, em função dos parâmetros de entrada que têm maior influência na probabilidade de ocorrência das políticas, a adequação de uma determinada política de alocação de estoques.

Caso uma reorganização seja necessária, o Quadro 23 também fornece ao gestor outra importante informação para guiar a decisão de qual armazém utilizar. Nota-se que caso a política de centralização total deva ser adotada, o armazém aberto deve ser aquele que apresente menores valores de *lead-time* e de seu desvio-padrão. Já a política mista, por sua vez, abre espaço para abertura de armazéns com valores mais altos para as duas variáveis. Entretanto, no caso da política mista, faz-se necessário o uso do modelo apresentado neste estudo, juntamente com um *software* que permita a sua resolução, para que se saiba com precisão quais armazéns devem ser abertos e quais mercados alocar a tais armazéns.

Finalmente, os gestores também podem utilizar a caracterização das políticas observadas em termos dos componentes de custo da rede, obtidas pelos testes de Kruskal-Wallis e de mediana, sumarizada no Quadro 24. Tais informações são interessantes para que os gestores possam ter uma referência ao comparar os diversos componentes de custo da rede, nivelando suas expectativas antes de adotarem uma ou outra política.

Quadro 24 - Comportamento dos custos da rede em função da política de alocação de estoques observada.

Componente de Custo	Política	
	Centralização Total	Mista
Custo total de ressuprimento	Menor	Maior
Custo total de distribuição	Maior	Menor
Custo total de transporte (ressuprimento e distribuição)	Menor	Maior
Custo total de estoque de ciclo e colocação de pedidos	Menor	Maior
Custo total de estoque de segurança	Menor	Maior
Custo de total de estoques	Menor	Maior
Custo total da rede (transporte e estoques)	Menor	Maior

A análise delineada acima pode ser aplicada, a título de exemplo dentro do escopo do presente estudo, a algumas categorias reais de produtos. No caso de equipamentos eletrônicos de alta tecnologia para exames clínicos (como tomógrafos computadorizados e máquinas de ultrassonografia), equipamentos industriais de grande porte (como máquinas operatrizes e ferramentas, equipamentos e peças de reposição para mineração e petróleo e gás, turbinas para geração de energia hidroelétrica ou térmica), equipamentos para aviação (turbinas e motores), ferrovias (motores, peças de reposição) a política mais adequada seria a centralização total. Isso se deve ao fato dos produtos citados apresentarem valores mais altos, e conseqüentemente, maiores custos de manutenção de estoques. Além disso, a concentração da produção de tais produtos em determinadas áreas geográficas de um país ou do mundo acarreta naturalmente uma ampla faixa de *lead-times* de ressuprimento entre fábricas e possíveis armazéns, e provavelmente altos *lead-times*. Isso dependeria, em primeiro lugar, da distância entre a fábrica e a região, ou país, que albergaria o possível armazém, considerando-se que não há restrições de ordem política para a abertura de armazéns em diferentes regiões do mundo. Em segundo lugar, o nível de serviço do transporte disponível nas diversas regiões onde um armazém pode ser localizado pode variar bastante, contribuindo ainda mais para aumentar a amplitude dos *lead-times* de ressuprimento.

Entretanto, há algumas classes de produtos que, apesar de apresentarem altos custos de manutenção de estoques por terem altos valores, podem ter a política mista como mais adequada. Essa particularidade é apresentada por medicamentos tais como quimioterápicos, antibióticos utilizados no tratamento contra bactérias resistentes e pacientes imunodeprimidos (pacientes sem defesas no organismo decorrentes de quimioterapias ou tratamentos necessário a transplantes de órgãos e medula) e antifúngicos também para pacientes imunodeprimidos. Para esses medicamentos, a política mista pode ser a mais

adequada, através da utilização do *cross-filling*. Devido à gravidade da enfermidade, os pacientes não podem esperar por um tempo longo quando os medicamentos se fazem necessários. Assim, em uma rede de hospitais, uma maior quantidade dos mesmos poderia ser mantida na unidade que apresentasse a maior demanda. A partir deste local, os medicamentos poderiam ser fornecidos às demais unidades com demandas mais pontuais, e com estoques mais reduzidos dos mesmos, através de transporte *premium* se e quando necessário.

A política mista também seria a mais adequada para combustíveis derivados de petróleo ou etanol, bebidas alcoólicas e não-alcoólicas, alimentos perecíveis e materiais de construção civil (cimento, tubos e conexões, perfis metálicos e de alumínio). Isso, pois primeiramente os produtos citados apresentam valores mais baixos, e conseqüentemente, custos mais baixos de manutenção de estoques. Além disso, por necessidade de maior disponibilidade de tais produtos junto aos clientes, sob pena das empresas que os comercializam perderem *market share* devido à grande competição, tais produtos podem favorecer os sistemas independentes, com armazéns dedicados em algum grau a determinados mercados chave. Adicionalmente, redes de lojas de departamento ou livrarias que possuam vários pontos de estoque e cujos produtos são comprados por impulso podem se valer da política mista, explorando o *cross-filling* para evitar *stock-outs* e aumentar a disponibilidade dos produtos, incrementando a venda por impulso através de uma maior disponibilidade de produtos em suas prateleiras.

7 Conclusões

Este estudo abordou o problema de localização de armazéns e alocação de estoques através de um enfoque de programação matemática não-linear. Foram considerados simultaneamente os estoques de ciclo e de segurança, que muitas vezes são desconsiderados nesse tipo de problema. Por meio da incorporação do Efeito de Consolidação a um problema de localização de armazéns, foi considerada a premissa do *cross-filling*, ou seja, de que os mercados poderiam ser servidos por mais de um armazém, diferentemente da tradicional abordagem onde cada armazém serve um mercado específico. Análises de sensibilidade e tratamento estatístico dos resultados foram usados para caracterizar a ocorrência de diferentes políticas de alocação de estoques em função dos parâmetros de entrada do problema, no intuito de se obterem *insights* gerenciais. Esses são os maiores diferenciais do estudo na sua proposta de expandir o conhecimento científico da área estudada.

A primeira conclusão que se pode tirar do estudo é que o algoritmo *LGO* foi eficaz na otimização dos custos da rede. Na análise de sensibilidade, 10.000 cenários aleatórios foram gerados, sendo que o algoritmo *LGO*, presente no *software* AIMMS, otimizou todos eles. Por meio da utilização do algoritmo foi possível atingir os objetivos da pesquisa de se determinarem quantos armazéns devem ser abertos na rede, quais são as suas localizações, quais mercados, e em qual proporção, devem ser alocados a um determinado armazém e quais são os níveis ótimos de estoque de ciclo e de segurança em cada armazém.

Analisando-se as freqüências de ocorrência das políticas de alocação de estoques nas análises de sensibilidade, foi primeiramente possível concluir que, em redes mais complexas e com os parâmetros de entrada utilizados no problema, predominam políticas para reduzir os custos de manutenção de estoques e de ressuprimento dos armazéns comparativamente às políticas para reduzir os custos de distribuição. Especificamente, a política de sistemas independentes, que é aquela que proporciona os menores custos de distribuição segundo a literatura, não foi observada e a política de centralização total, que é aquela que minimiza os custos de estoques e de ressuprimento, foi a mais observada. Isso mostra que, ao menos com os parâmetros de entrada utilizados no presente estudo, o agrupamento de demanda (*demand pooling*), que é o tipo de agrupamento promovido pelas centralizações, parece apresentar benefícios mais substanciais do que o agrupamento da demanda no *lead-time* (*lead-time demand pooling*), que é o tipo de agrupamento promovido pelo *cross-filling*.

Além disso, como a política de sistemas independentes se caracteriza pela ausência de mitigação de risco no que diz respeito aos estoques, seja no âmbito da demanda ou da demanda no *lead-time*, o fato da mesma praticamente não ter sido observada como uma política isolada permite concluir que as soluções ótimas contemplam alguma técnica de mitigação de risco de manutenção de estoques, em maior ou menor grau.

O estudo permitiu ainda concluir, uma vez que a política de *cross-filling* total não foi observada, que em redes mais complexas os ganhos obtidos em termos de redução dos custos dos estoques de segurança quando se emprega o *cross-filling* total não são suficientes para compensar os prejuízos ocorridos em termos dos custos dos estoques de ciclo, dos custos de ressuprimento dos armazéns e dos custos de distribuição para os mercados. Isso faz com que tal política não possibilite a obtenção de resultados ótimos, pelo menos com os parâmetros de entrada utilizados nesta pesquisa.

Isso, contudo, não quer dizer que as políticas dos sistemas independentes e de *cross-filling* não tenham importância nos problemas de localização de armazéns e de alocação de estoques. As mesmas foram observadas, em combinação com sub-consolidações, em partes da rede de alguns cenários otimizados onde a política mista foi adotada.

As conclusões em relação à caracterização das políticas observadas em termos dos parâmetros de entrada são trazidas no Quadro 23. Foram mostrados no Quadro os parâmetros que apresentavam diferença significativa de mediana e que englobavam a totalidade, ou grande parte, dos componentes do conjunto ao qual o mesmo pertencia (por exemplo, os *lead-times* dos cinco armazéns apresentaram diferenças significativas de mediana e foram incluídos no quadro). Assim, os *lead-times* de ressuprimento dos armazéns, custo de manutenção de estoques nos armazéns (também interpretado com o valor dos produtos), custo de colocação de pedidos no armazéns, amplitude do *lead-time* (LT_{Max}/LT_{Min}), média aritmética do desvio-padrão da demanda dos 5 mercados, média aritmética do *lead-time* de ressuprimento dos 5 armazéns, média aritmética do custo de manutenção de estoques dos 5 armazéns e média aritmética do custo de colocação de pedidos dos 5 armazéns apresentaram valores altos para a política de centralização total. Já na política mista tais parâmetros apresentaram valores mais baixos. Essas conclusões são interessantes para que gestores possam analisar, ao menos preliminarmente, qual é a política mais adequada para a rede que gerenciam e guiar uma reorganização que se faça necessária em função das características dos parâmetros citados. Além disso, o gestor pode ter uma referência ao comparar os custos totais da rede obtidos ao se adotar uma determinada política, como mostra o Quadro 24.

Finalmente, as conclusões obtidas através dos resultados da regressão logística permitiram o desenvolvimento de uma priorização das variáveis que se mostraram significativas nos testes de Kruskal-Wallis e mediana. A regressão mostrou que as variáveis que tem maior impacto na probabilidade de ocorrência da política de centralização total, em relação à probabilidade de ocorrência da política mista, são os custos de manutenção de estoques (valor dos produtos), a amplitude dos *lead-times* dos possíveis armazéns e os *lead-times* dos mesmos. Tais informações possibilitaram o desenvolvimento de um método, mostrado na Figura 14, para auxiliar os gestores na abordagem inicial da determinação da política de alocação de estoques mais adequada à rede que gerenciam. Como o método é um guia para uma abordagem inicial, os gestores devem utilizar as informações mostradas no Quadro 23 para aprofundar a análise do problema. Caso a reorganização seja necessária, há ainda informações no Quadro 23 que auxiliam os gestores na escolha de qual armazém abrir em termos de *lead-time* de

ressuprimento e desvio-padrão do *lead-time* de ressuprimento. Caso a política de centralização seja a mais adequada para a rede, armazéns com baixos *lead-times* e desvios-padrão do *lead-time* devem ser escolhidos. Já a política mista abre espaço para a abertura de armazéns com maiores *lead-times* e desvios-padrão do *lead-time*, sendo que é necessário se utilizar o modelo apresentado neste estudo, junto com um software que permita sua otimização, para determinar com precisão quais são esses armazéns.

Uma última observação se faz válida ao fim da seção que traz as conclusões da presente pesquisa. Os estudos aqui realizadas no intuito de fornecer *insights* gerenciais em relação à caracterização das políticas de alocação de estoques, e seus resultados, são úteis na realização de análises preliminares e menos aprofundadas. Essa observação é especialmente válida quando não se tem acesso a ferramentas mais elaboradas e avançadas, como o modelo apresentado neste estudo e um *software* de otimização como o AIMMS. Ainda assim, elas dão um bom direcionamento para que se tomem decisões gerenciais que podem levar a custos totais mais baixos. Entretanto, como o custo mínimo da rede é uma função dos *trade-offs* entre todos os parâmetros de entrada mostrados no Quadro 25 do Anexo 3, somente a resolução de um modelo de otimização, como o que foi proposto nesta pesquisa, pode indicar qual é a configuração ótima da rede que proporciona o custo total mínimo, principalmente no caso onde a política adequada para a rede seja a política mista.

7.1 Limitações

O presente estudo abordou alguns aspectos pouco explorados do problema de localização de instalações e de alocação de estoques. Ainda assim é importante se delimitar mais explicitamente a sua abrangência.

Em primeiro lugar, o modelo apresentado se focou nos aspectos matemáticos dos *trade-offs* entre as variáveis de entrada. Assim, ele não leva em consideração fatores fiscais, de *marketing*, de estratégia competitiva, de riscos naturais. Por exemplo, a necessidade de fornecer aos consumidores um melhor e mais rápido acesso aos produtos como uma estratégia de ganho de *market share*, ou de defesa do mesmo em caso de ataque competitivo, poderia favorecer descentralizações que seriam utilizadas no intuito de fornecer aos consumidores um melhor acesso aos produtos ou melhor coleta de informações em relação a padrões de consumo, mesmo que o modelo de otimização não apresentasse esse resultado

como solução ótima. Adicionalmente, centralização demasiada, mesmo que sugerida pelo modelo como solução ótima, poderia levar a problemas trabalhistas com sindicatos fortes, graves perdas devidas a calamidades naturais ou falta de customização do serviço prestado ao clientes. Finalmente, sistemas fiscais com particularidades como o ICMS brasileiro poderiam contradizer as soluções ótimas dos modelos de otimização, caso tais particularidades não fossem levadas em conta.

Em seguida, no que diz respeito às análises de sensibilidades, é importante salientar que todas as variáveis geradas aleatoriamente não apresentaram tendências ou levaram em conta sazonalidade de suas séries diárias. Isso quer dizer que as análises de sensibilidades trataram a condição de operação de redes em mercados consolidados e sem fortes ataques competitivos, com características de demanda dos mercados e de operação dos fornecedores bem conhecidas, bem documentadas e sem variações bruscas.

Outra particularidade do estudo é que o efeito do nível de serviço ao cliente, traduzido pelo fator de segurança em relação aos *stock-outs*, não foi avaliado. Isso, pois tal fator de segurança apresentou o mesmo valor em todas as análises.

Além disso, nota-se que a política dos sistemas independentes pode apresentar diversas sub-configurações em termos de como os estoques são alocados (cf. Anexo 1). Entretanto, as análises realizadas não contemplaram a exploração de tais sub-configurações, tratando as quatro principais políticas de alocação de estoques (Centralização Total, Mista, Sistemas Independentes e *Cross-filling* total).

Finalmente, as análises de sensibilidade utilizaram um conjunto de dados com valores máximos e mínimos dos parâmetros de entrada do problema bem determinados. Dessa maneira, as conclusões do estudo não podem ser estendidas a qualquer faixa de limites máximo e mínimo de tais parâmetros. O uso das descobertas feitas neste estudo em situações práticas onde os limites dos parâmetros de entrada do problema estejam dentro das faixas aqui utilizadas, ou bem próximos a elas, não trará problemas.

7.2 Sugestões para Estudos Futuros

Alguns estudos adicionais podem ser realizados seguindo a linha da presente dissertação. O primeiro deles é variar, na análise de sensibilidade, o número de armazéns e mercados para avaliar a influência do tamanho da rede na frequência de ocorrência das políticas e nas suas caracterizações em função dos parâmetros de entrada do problema. Ainda na análise de sensibilidade, a criação de grupos que representam situações reais, através da estratificação dos dados de entrada, poderia ser interessante.

Um estudo poderia incorporar aspectos fiscais (impostos) ao modelo apresentado para, em seguida, avaliar a influência de tais aspectos na ocorrência das políticas de alocação de estoques e suas caracterizações em termos dos parâmetros de entrada do novo problema.

Além disso, um estudo que utilizasse, para cada um dos parâmetros de entrada, uma faixa mais ampla delimitada pelos valores máximo e mínimo dos mesmos, poderia favorecer a observação das políticas *cross-filling* total e sistemas independentes. Isso ajudaria a melhor compreender a adequabilidade de tais políticas a situações práticas.

Finalmente, um estudo que melhor caracterizasse a política mista, explorando as sub-configurações de rede apresentadas pela mesma, pode mostrar com melhor clareza a adequabilidade dessa política às características de demanda dos mercados, operação dos armazéns e tipos de produto (em termos de seus custos).

8 Referências Bibliográficas

AMBROSINO, D; SCUTELLÀ, M. G. **Distribution Network Design: New Problems and Related Models.** European Journal of Operational Research, v. 165, p. 610-624, 2005.

BALLOU, R. H. **DISPLAN: A Multiproduct Plant/Warehouse Location Model with Nonlinear Inventory Costs.** Journal of Operations Management, v. 5, nº 1, p. 75-80, 1984.

_____. **Unresolved Issues in Supply Chain Network Design.** EUA: Information System Frontiers, 2001.

_____. **Business Logistics / Supply Chain Management: Planning, Organizing and Controlling the Supply Chain.** 5th Edition. Upper Saddle River, N.J.: Pearson Prentice Hall, 2004.

_____. **Expressing Inventory Control Policy in the Turnover Curve.** Journal of Business Logistics, v. 26, nº 2, p. 143-164, 2005.

_____; BURNETAS, A. **Planning Multiple Location Inventories.** Journal of Business Logistics, v. 24, nº 2, p. 65-89, 2003.

BOWERSOX, D. J.; CLOSS, D. J. **Logística Empresarial: O Processo de Integração da Cadeia de Suprimento.** São Paulo: Atlas, 2001.

BRANDEAU, M. L.; CHIU, S. S. **An Overview of Representative Problems in Location Research.** Management Science, v. 35, nº 6, p. 645-674, 1989.

CHURCH, R.L.; REVELLE, C.S. **The Maximal Covering Location Problem.** Papers of the Regional Science Association, v. 32, p. 101-118, 1974.

CROXTON, K. L.; ZINN, W. **Inventory Considerations in Network Design.** Journal of Business Logistics, v. 26, p. 149-168, 2005.

DAS, C.; TYAGI, R. **Role of inventory and Transportation Costs in Determining the Optimal Degree of Centralization.** Transportation Research Part E, v. 33, p. 171-179, 1997.

DAVARIZ, R. C. **Procedimento para Análise de Rede Logística**. Rio de Janeiro: IME, 2006. 133 p. Dissertação (Mestrado) – Instituto Militar de Engenharia, 2006.

ELZINGA J.; HEARN, D. W. **The Minimum Covering Sphere Problem**. *Management Science*, v. 19, p. 96-104, 1972.

EVERS, P. T. **Expanding the Square Root Law: An Analysis of Both Safety and Cycle Stocks**. *Logistics and Transportation Review*, v. 3, nº 1, p. 1-20, 1995.

_____ **Filling Customers Orders from Multiple Locations: A Comparison of Pooling Methods**. *Journal of Business Logistics*, v. 20, nº 1, p. 121-139, 1999.

_____ ; BEIER, F. J. **The Portfolio Effect and Multiple Consolidation Points: A Critical Assessment of the Square Root Law**. *Journal of Business Logistics*, v. 14, nº 2, p. 109-125, 1993.

_____ **Operational Aspects of Inventory Consolidation Decision Making**. *Journal of Business Logistics*, v. 19, nº 1, p. 173-189, 1998.

FARLEY, A. M. **Vertex Centers of Trees**. *Transportation Science*, v. 16, p. 265-280, 1982.

FIGUEIREDO, K. F. (Org.); FLEURY, P. F. (Org.); WANKE, P. F. (Org.). **Logística e o Gerenciamento da Cadeia de Suprimento: Planejamento do Fluxo de Produtos e de Recursos**. São Paulo: Editora Atlas, 2003.

FLEURY, P. F. (Org.); WANKE, P. F. (Org.); FIGUEIREDO, K. F. (Org.). **Logística Empresarial: A Perspectiva Brasileira**. São Paulo: Editora Atlas, 2000.

GARFINKEL, R. S.; NEEBE, A. W.; RAO, M. R. **The m-Center Problem: Minimax Facility Location**. *Management Science*, v. 23, p. 1133-1142, 1977.

GEOFFRION, A. M.; POWERS, R. F. **Twenty Years of Strategic Distribution System Design: An Evolutionary Perspective**. *Interfaces*, v. 25, nº 5, p. 105-127, 1995.

HAKIMI, S. L. **Optimum Locations of Switching Centers and the Absolute Centers and Medians of a Graph.** Operations Research, v. 10, p. 450-459, 1964.

HALFIN, S. **On Finding the Absolute and Vertex Centers of a Tree with Distances.** Transportation Science, v. 8, p. 75-77, 1974.

HAIR, J. F.; BABIN B.; ANDERSON, R. E.; TATHAM, R. L.; BLACK, W. C. **Multivariate Data Analysis.** 6th Edition. Upper Saddle River: Prentice-Hall, 2006.

HARRIS, F. W. **How Many Parts to Make at Once.** Factory, the Magazine of Management, v. 10, nº 2, p. 135-136; 152, 1913.

HEDETNIEMI S. M.; COCKAYNE E. J.; HEDETNIEMI S. T. **Linear Algorithms for Finding the Jordan Center and the Path Center of a Tree.** Transportation Science, v. 15, p. 98-114, 1981.

HO, R. **Handbook of Univariate and Multivariate Data Analysis and Interpretation with SPSS.** Boca Raton: Chapman & Hall / CRC, 2006.

JAYARAMAN, V. **Transportation, Facility Location and Inventory Issues in Distribution Network Design.** International Journal of Operations & Production Management, v. 18, p. 471-494, 1998.

_____ ; PIRKUL, H. **Planning and Coordination of Production and Distribution Facilities for Multiple Commodities.** European Journal of Operational Research, v. 133, p. 394-408, 2001.

JORGE, C. M. M. **Planejamento de Redes Logísticas Via Simulação: Analisando Fatores Determinantes das Decisões de Localização e Centralização da Distribuição.** Rio de Janeiro: UFRJ, 2008. 135p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2008.

KARIV, O.; HAKIMI S. L. **An Algorithmic Approach to Network Location Problems. Part 1. The P-Centers.** SIAM J., Appl. Math., v. 37, p. 539-560, 1979.

LACERDA, L. **Considerações Sobre o Estudo de Localização de Instalações**. In: FLEURY, P. F. (Org); WANKE, P. (Org); FIGUEIREDO, K. F. (Org). **Logística Empresarial: A Perspectiva Brasileira**. São Paulo: Atlas, 2000.

LANDAU, S.; EVERITT, B. S. **A Handbook of Statistical Analysis Using SPSS**. Boca Raton: Chapman & Hall / CRC Press LLC, 2004.

LEE, H. L.; NAHMIAS, S. **Single-Product, single-location models**. In: GRAVES, S. C.; KAHN, A.H.G.; ZIPKIN, P.H. (Eds.) **Logistics of Production and Inventory**. Amsterdam: North-Holland, 1993.

LEECH, N. L.; BARRETT K. C.; MORGAN, G. A. **SPSS for Intermediate Statistics: Use and Interpretation**, 2nd Edition. New Jersey: Lawrence Erlbaum Associates, Publisher, 2005.

MAHMOUD, M. M. **Optimal Inventory Consolidation Schemes: A Portfolio Effect Analysis**. *Journal of Business Logistics*, v. 13, n° 1, p. 193-214, 1992.

MAISTER, D. H. **Centralization of Inventories and the "Square Root Law"**. *International Journal of Physical Distribution & Materials Management*, v. 6, n° 3, p. 124-134, 1976.

MINIEKA, E. **The m-Center Problem**. *SIAM Rev.*, v. 12, p. 138-139, 1970.

MIRANDA, P. A.; GARRIDO, R. A. **Incorporating Inventory Control Decisions into a Strategic Distribution Network Design Model with Stochastic Demand**. *Transportation Research Part E*, v. 40, p. 183-296, 2004.

NAHMIAS, S. **Production and Operations Analysis**. 4th Edition. New York: McGraw-Hill, 2001.

NOZICK, L. K. e TURNQUIST, M. A. **Inventory, Transportation, Service Quality and the Location of Distribution Centers**. *European Journal of Operational Research*, v. 129, p. 362-371, 2001.

OWEN, S. H.; DASKIN, M. S. **Strategic Facility Location: A Review**. *European Journal of Operational Research*, v. 111, n° 1, p. 423-447, 1998.

SHARMA, S. **Applied Multivariate Techniques**. New York: John Wiley & Sons, 1996.

SILVA, M. V. **Localização de Estoques na Rede de Distribuição de Uma Empresa do Setor Siderúrgico**. Belo Horizonte: UFMG, 2006. 156 p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal De Minas Gerais, 2006.

TALLON, W. J. **The Impact of Inventory Centralization on Aggregate Safety Stock: The Variable Supply Lead Time Case**. Journal of Business Logistics, v. 14, nº 1, p. 185-203, 1993.

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

TYAGI, R.; DAS, C. **Extension of the Square Root Law for Safety Stocks to Demands with Unequal Variances**. Journal of Business Logistics, v. 19, nº 2, p. 197-203, 1998.

WANKE, P. F. **Aspectos Fundamentais do Problema de Localização de Instalações em Redes Logísticas**. Revista Tecnológica, São Paulo, 01 mar. 2001.

_____ **Gestão de Estoques na Cadeia de Suprimentos: decisões e modelos quantitativos**. São Paulo: Atlas, 2008.

_____ **Consolidation Effects and Inventory Portfolios**. Transportation Research. Part E, v. 45, p. 107-124, 2009.

_____; SALIBY E. **Consolidation Effects: Whether and How Inventory Should Be Pooled**. Forthcoming Paper: Transportation Research, Part E (2009), doi: 10.1016/j.tre.2009.01.006.

_____; ZINN, W. **Strategic Logistics Decision Making**. International Journal of Physical Distribution & Logistics Management, v. 34, nº 6, p. 466-478, 2004.

ZINN, W.; LEVY, M.; BOWERSOX, D. J. **Measuring the Effect of Inventory Centralization/Decentralization on Aggregate Safety Stock: “The Square Root Law” Revisited**. Journal of Business Logistics, v 10, p. 1-14, 1989.

ANEXOS

Anexo 1 – Sub-Configurações da Política Mista

Uma sub-centralização acontece quando um armazém serve ao menos dois mercados e ao menos um deles tem sua demanda atendida na totalidade pelo armazém. Já o *cross-filling* acontece quando um mercado é servido por mais de um armazém. Finalmente, o sistema independente acontece quando um mercado é servido exclusivamente por um único armazém.

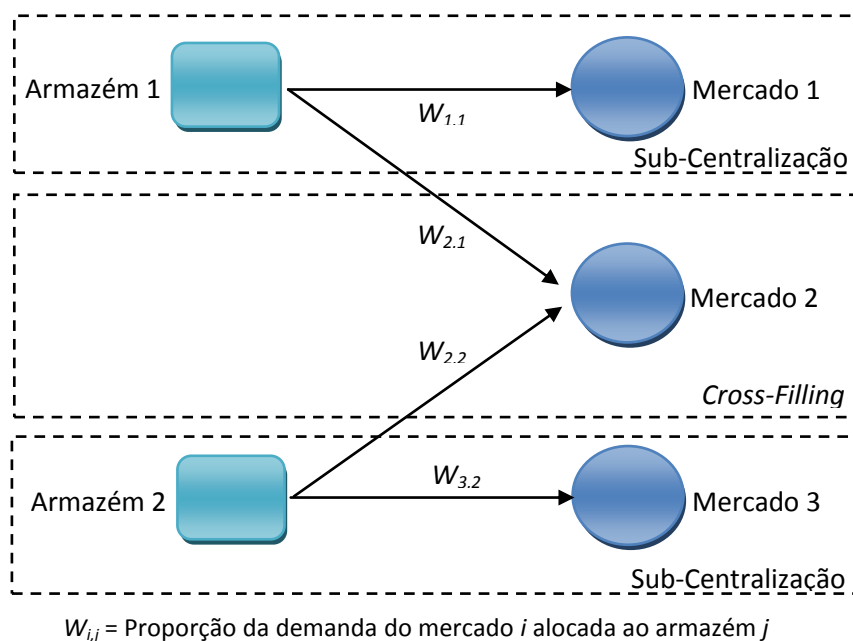
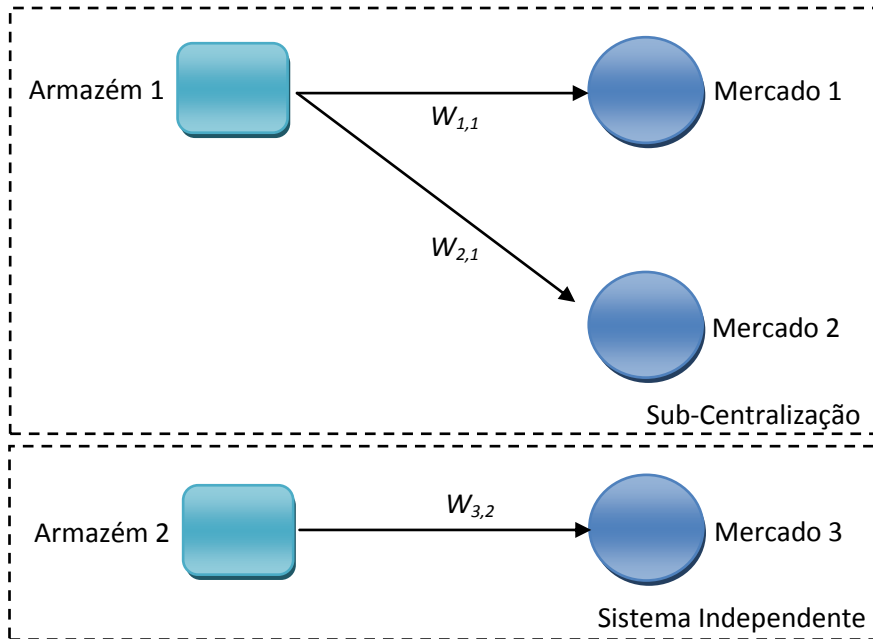
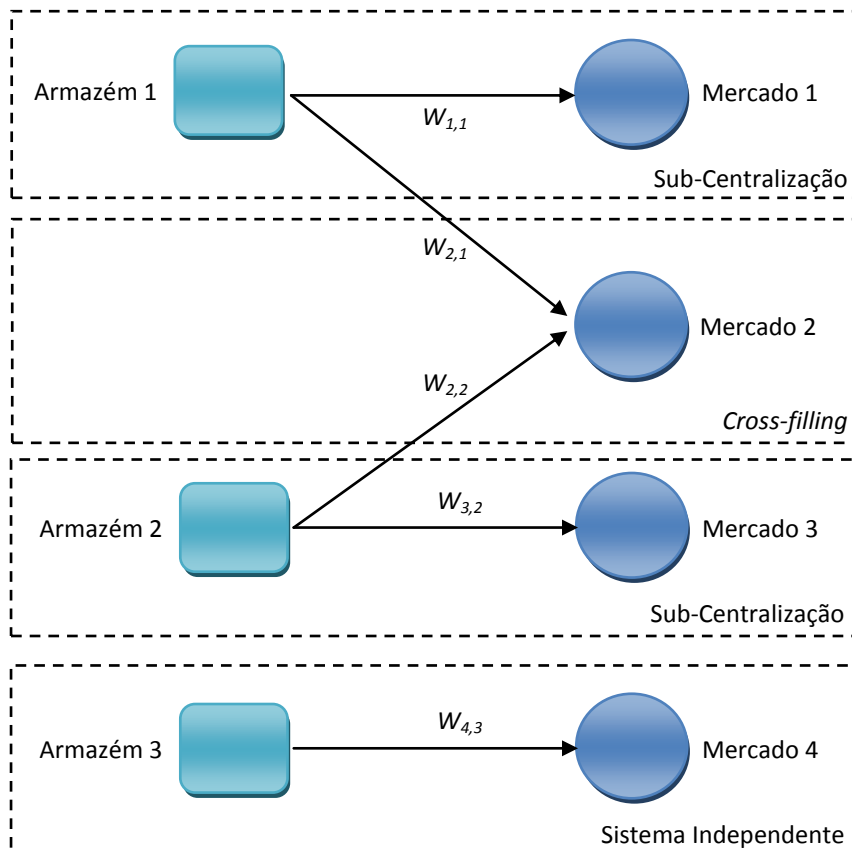


Figura 15 - Sub-configuração da política mista mostrando a combinação de *cross-filling* e sub-centralização.



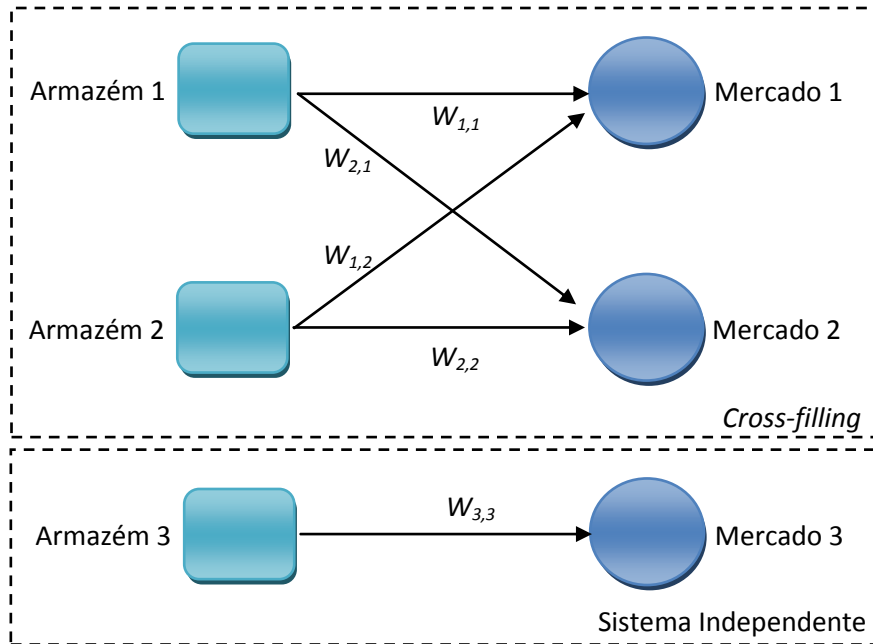
$W_{i,j}$ = Proporção da demanda do mercado i alocada ao armazém j

Figura 16- Sub-configuração da política mista mostrando a combinação de sub-centralização e sistema independente.



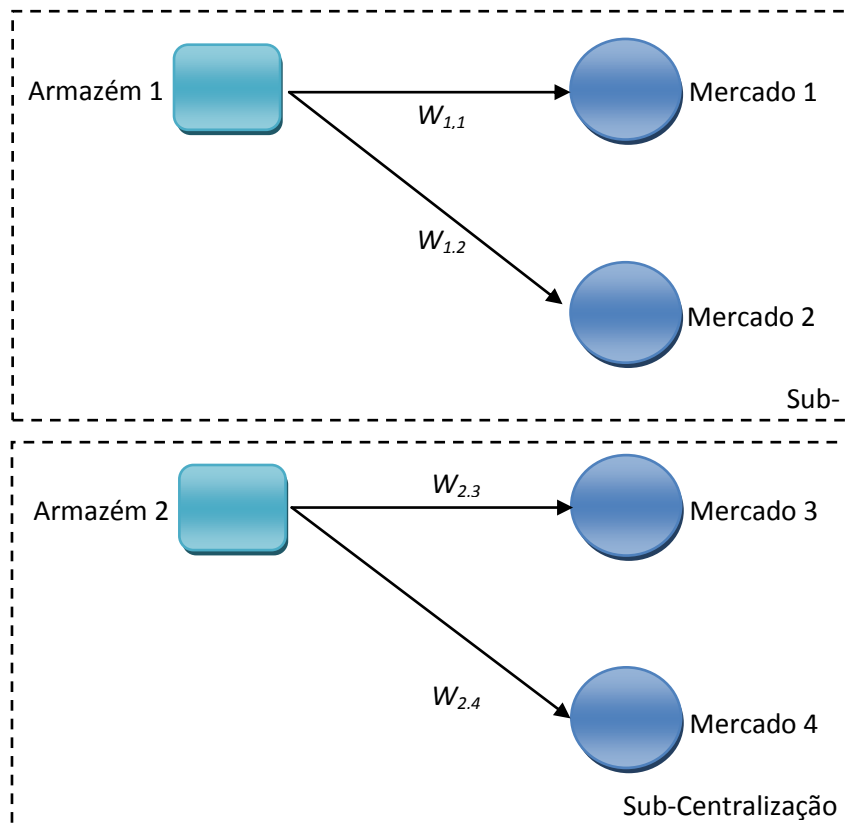
$W_{i,j}$ = Proporção da demanda do mercado i alocada ao armazém j

Figura 17 - Sub-configuração da política mista mostrando a combinação de sistema independente, *cross-filling* e sub-centralização.



W_{ij} = Proporção da demanda do mercado i alocada ao armazém j

Figura 18- Sub-configuração da política mista mostrando a combinação de *cross-filling* e sistema independente.



W_{ij} = Proporção da demanda do mercado j alocada ao armazém i

Figura 19 - Sub-configuração da política mista mostrando a combinação de sub-centralizações.

Anexo 2 – Código para a Otimização e Simulação Escrito na Linguagem do Software AIMMS 3.8

MAIN MODEL Main_InstalaArmazem

SECTION EntradaDados

PROCEDURE

identifier : DadosIniciais

body :

! Inicializa os conjuntos

empty Armazens;

empty Consumid;

empty Analises;

empty IndColExcel;

! Le o arquivo com os dados de entrada

read from file "DadosEntrada002.txt" !5 armazéns e 5 mercados, usado na pesquisa

ENDPROCEDURE ;

ENDSECTION EntradaDados ;

SECTION SaidaDados

DECLARATION SECTION

SET:

identifier : IndColExcel

index : co ;

ELEMENT PARAMETER:

identifier : Prim

range : Armazens ;

PARAMETER:

identifier : Indice ;

PARAMETER:

identifier : Cont ;

PARAMETER:

identifier : Cont2 ;

PARAMETER:

identifier : ContCol ;

PARAMETER:

identifier : ContLin ;

STRING PARAMETER:

identifier : Info ;

STRING PARAMETER:

identifier : EndCel ;

STRING PARAMETER:

identifier : StrColuna ;

FILE:

identif ier : Resultados2
 name : "Resultados2.txt"
 device : disk ;

FILE:

identif ier : Resultados3
 name : "Resultados3.txt"
 device : disk ;

FILE:

identif ier : EntReplica
 name : "EntReplica.txt"
 device : disk ;

ENDSECTION ;

PROCEDURE

identif ier : EscreveSaidaPersonal

body :

put Resultados2;

put "Acompanhamento da analise", //;

put @16, ",", "SituacaoAnalise":<35, ",", "CustoTotRede":<15, ",", "CustoTotTransp":<15, ",", "CustoTotEstCiclo":<15, ",",
 "CustoTotEstSeg":<15, /;

for (a) do

put a:<16, @16, ",", SituaAnaliseReg(a):<35, ",", CustoTotReg(a):<15:2, ",", CustoTotTranspReg(a):<15:2, ",",
 CustoTotEstCicloReg(a):<15:2, ",", CustoTotEstSegReg(a):<15:2;

put /;

endfor;

put //;

put @16, ",", "CustoTotRede":<15, ",", "Armaz01":<15, ",", "Armaz02":<15, /;

for (a) do

put a:<16, @16, ",", CustoTotReg(a):<15:5;

for (w) do

put " , ", sqrt(2*sum[c, DemandaReg(a,c)]*CustoColocPedidoReg(a,w)*CustoManutEstReg(a,w)):<15:5;

endfor;

put /;

endfor;

put //;

put @16, "Alocacao dos mercados aos armazens":<, /;

for (a) do

put /;

put @16, ",", a:<15. /;

put @16;

for (c) do

put " , ", c:<15;

endfor;

put /;

for (w) do

put w:<15, @16;

for (c) do

put " , ", YReg(a,w,c):<15:5;

endfor;

put /;

endfor;

endfor;

put //;

```

put @16, "Quantidade Transportada ou Estoque Total":<, /;
for (a) do
  put /;
  put @16, ",", a:<15. /;
  put @16;
  for (c) do
    put ",", c:<15;
  endfor;
  put ",", "Total":<15;
  put /;
  for (w) do
    put w:<15, @16;
    for (c) do
      put ",", TransporteReg(a,w,c):<15:5;
    endfor;
    put ",", sum[c,TransporteReg(a,w,c)]:<15:5;
    put /;
  endfor;
endfor;
put //;

put @16, "Custo Unitario de Manutencao de Estoques nos Armazens":<, /;
put @16;
for (w) do
  put ",", w:<15;
endfor;
put /;
for (a) do
  put a:<15, @16;
  for (w) do
    put ",", CustoManutEstReg(a,w):<15:5;
  endfor;
  put /;
endfor;
put //;

put @16, "Custo de colocacao de pedidos":<, /;
put @16;
for (w) do
  put ",", w:<15;
endfor;
put /;
for (a) do
  put a:<15, @16;
  for (w) do
    put ",", CustoColocPedidoReg(a,w):<15:5;
  endfor;
  put /;
endfor;
put //;

put @16, "Lead Time de Ressuprimento dos Armazens":<, /;
put @16;
for (w) do
  put ",", w:<15;
endfor;
put /;
for (a) do
  put a:<15, @16;
  for (w) do
    put ",", LTReg(a,w):<15:5;
  endfor;
endfor;

```

```

    put /;
endfor;
put //;

put @16, "Desvio Padrao do LT de Ressuprimento dos Armazens":<, /;
put @16;
for (w) do
    put ", " , w:<15;
endfor;
put /;
for (a) do
    put a:<15, @16;
    for (w) do
        put ", " , DesvPadLTReg(a,w):<15:5;
    endfor;
    put /;
endfor;
put //;

put @16, "LEC":<, /;
put @16;
for (w) do
    put ", " , w:<15;
endfor;
put /;
for (a) do
    put a:<15, @16;
    for (w) do
        put ", " , LECReg(a,w):<15:5;
    endfor;
    put /;
endfor;
put //;

put @16, "Numero de Ressuprimentos":<, /;
put @16;
for (w) do
    put ", " , w:<15;
endfor;
put /;
for (a) do
    put a:<15, @16;
    for (w) do
        put ", " , NumRessupReg(a,w):<15:5;
    endfor;
    put /;
endfor;
put //;

put @16, "Estoque de Seguranca nos Armazens":<, /;
put @16;
for (w) do
    put ", " , w:<15;
endfor;
put /;
for (a) do
    put a:<15, @16;
    for (w) do
        put ", " , EstoqSegReg(a,w):<15:5;
    endfor;
    put /;
endfor;

```

```

put //;

put @16, "Demanda Agregada nos Armazens":<, /;
put @16;
for (w) do
  put ", " , w:<15;
endfor;
put /;
for (a) do
  put a:<15, @16;
  for (w) do
    put ", " , DemandaAgregReg(a,w):<15:5;
  endfor;
  put /;
endfor;
put //;

put @16, "Desvio padrao da demanda agregada em cada armazem durante o LT":<, /;
put @16;
for (w) do
  put ", " , w:<15;
endfor;
put /;
for (a) do
  put a:<15, @16;
  for (w) do
    put ", " , DesvPadDemLTAggregReg(a,w):<15:5;
  endfor;
  put /;
endfor;
put //;

put @16, "Variancia demanda agregada em cada armazem":<, /;
put @16;
for (w) do
  put ", " , w:<15;
endfor;
put /;
for (a) do
  put a:<15, @16;
  for (w) do
    put ", " , VarDemAgregReg(a,w):<15:5;
  endfor;
  put /;
endfor;
put //;

put @16, "Custos Unitarios de Transporte":<;
for (a) do
  put /;
  put @16, " , " , a:<15. /;
  put @16;
  for (c) do
    put " , " , c:<15;
  endfor;
  put /;
  for (w) do
    put w:<15, @16;
    for (c) do
      put " , " , CustoUnitTranspReg(a,w,c):<15:5;
    endfor;
  put /;
endfor;

```

```

        endfor;
    endfor;
    put //;

    put @16, "Demanda individual dos mercados":<, /;
    put @16;
    for (c) do
        put ", " , c:<15;
    endfor;
    put /;
    for (a) do
        put a:<15, @16;
        for (c) do
            put ", " , DemandaReg(a,c):<15:5;
        endfor;
        put /;
    endfor;
    put //;

    put @16, "Desvio padrao da demanda individual dos mercados":<, /;
    put @16;
    for (c) do
        put ", " , c:<15;
    endfor;
    put /;
    for (a) do
        put a:<15, @16;
        for (c) do
            put ", " , DesvPadDemReg(a,c):<15:5;
        endfor;
        put /;
    endfor;
    put //;

    put @16, "Correlacao entre as demandas individuais dos mercados":<;
    for (a) do
        put /;
        put @16, " , " , a:<15. /;
        put @16;
        for (c) do
            put ", " , c:<15;
        endfor;
        put /;
        for (c) do
            put c:<15, @16;
            for (cc) do
                put ", " , CorrDemConsumReg(a,c,cc):<15:5;
            endfor;
            put /;
        endfor;
    endfor;
    put //;

    putclose Resultados2;

ENDPROCEDURE ;

PROCEDURE
    identifier : EscreveSaidaPersonal2
    body      :
        ! OBS: Para que a linha completa pudesse ser escrita no arquivo ASCII, foi necessario alterarem-se algumas
        ! configuracoes do AIMMS. Isso foi feito no menu <Settings/Project Options/AIMMS/Reporting/Listing formatting option>

```

```
! Foi alterada a opcao <Listing page width> para o valor maximo (32762)
put Resultados3;
```

```
! Entra com o titulo da coluna para o nome da iteracao
put FormatString("NumAnalise \t");
```

```
! Entra com o titulo da coluna para a demanda individual do mercado
Cont:=1;
for (c) do
    Info:=FormatString("DMerc%i", Cont);
    put formatString("%s\t",Info);
    Cont+=1;
endfor;
```

```
! Entra com o titulo da coluna para o desvio padraso da demanda individual do mercado
Cont:=1;
for (c) do
    Info:=FormatString("SDMerc%i", Cont);
    put formatString("%s\t",Info);
    Cont+=1;
endfor;
```

```
! Entra com o titulo da coluna para a correlacao entre os mercados
Cont:=1;
for (c) do
    Cont2:=1;
    For (cc) do
        if (Cont2>Cont) then
            Info:=FormatString("CorrMerc%i%i", Cont, Cont2);
            put formatString("%s\t",Info);
            Cont2+=1;
        endif;
    endfor;
    Cont+=1;
endfor;
```

```
! Entra com o titulo da coluna para para o lead time de ressuprimento dos armazens
Cont:=1;
for (w) do
    Info:=FormatString("LTArm%i", Cont);
    put formatString("%s\t",Info);
    Cont+=1;
endfor;
```

```
! Entra com o titulo da coluna para para desvio padrao do lead time de ressuprimento dos armazens
Cont:=1;
for (w) do
    Info:=FormatString("SLTArm%i", Cont);
    put formatString("%s\t",Info);
    Cont+=1;
endfor;
```

```
! Entra com o titulo da coluna para para o custo de transporte entre os armazens e mercados
Cont:=1;
for (w) do
    Cont2:=1;
    For (c) do
        Info:=FormatString("CustoTranspArm%iMerc%i", Cont, Cont2);
        put formatString("%s\t",Info);
        Cont2+=1;
    endfor;
    Cont+=1;
endfor;
```

endfor;

! Entra com o titulo da coluna para o fator de servico

Cont:=1;

for (w) do

Info:=FormatString("kArm%i", Cont);

put formatString("%s\t",Info);

Cont+=1;

endfor;

! Entra com o titulo da coluna para o custo de manutencao de estoques,

Cont:=1;

for (w) do

Info:=FormatString("CustoUnitEstoqArm%i", Cont);

put formatString("%s\t",Info);

Cont+=1;

endfor;

! Entra com o titulo da coluna para o custo de colocação de pedidos,

Cont:=1;

for (w) do

Info:=FormatString("CustoColocPedArm%i", Cont);

put formatString("%s\t",Info);

Cont+=1;

endfor;

! Entra com o titulo da coluna para, respectivamente,

! o custo de ressuprimento, a situacao da solucao da analise, o custo total de transporte, o custo total de estoque

! de segurancia e o custo total da analise

put FormatString("CustoRessup(S) \t SituacaoAnalise \t CustoTotTransp \t CustoTotEstCiclo \t CustoTotEstSeg \t
CustoTotRede \t");

! Entra com o titulo da coluna para a alocao dos mercados aos armazens

Cont:=1;

for (w) do

Cont2:=1;

For (c) do

Info:=FormatString("WArm%iMerc%i", Cont, Cont2);

put formatString("%s\t",Info);

Cont2+=1;

endfor;

Cont+=1;

endfor;

! Entra com o titulo da coluna para o LEC nos armazens

Cont:=1;

for (w) do

Info:=FormatString("LECArm%i", Cont);

put formatString("%s\t",Info);

Cont+=1;

endfor;

! Entra com o titulo da coluna para o número de ressuprimentos nos armazens

Cont:=1;

for (w) do

Info:=FormatString("NumRessupArm%i", Cont);

put formatString("%s\t",Info);

Cont+=1;

endfor;

! Entra com o titulo da coluna para o estoque de Ciclo nos armazens

Cont:=1;

```

for (w) do
    Info:=FormatString("EArm%i", Cont);
    put formatString("%s\t",Info);
    Cont+=1;
endfor;

! Entra com o titulo da coluna para o estoque de seguranca nos armazens
Cont:=1;
for (w) do
    Info:=FormatString("ESArm%i", Cont);
    put formatString("%s\t",Info);
    Cont+=1;
endfor;

! Entra com o titulo da coluna para a demanda agregada nos armazens
Cont:=1;
for (w) do
    Info:=FormatString("DemAgregArm%i", Cont);
    put formatString("%s\t",Info);
    Cont+=1;
endfor;

! Entra com o titulo da coluna para o desvio padrao durante o LT da demanda agregada nos armazens
Cont:=1;
for (w) do
    Info:=FormatString("SLTDemAgregArm%i", Cont);
    put formatString("%s\t",Info);
    Cont+=1;
endfor;

! Entra com o titulo da coluna para a quantidade total transportada
Cont:=1;
for (w) do
    Cont2:=1;
    For (c) do
        Info:=FormatString("QuantTranspArm%iMerc%i", Cont, Cont2);
        put formatString("%s\t",Info);
        Cont2+=1;
    endfor;
    Cont+=1;
endfor;
put /;

! Escreve os dados para cada analise
for (a) do

    ! Entra com o nome da iteracao
    put FormatString("%e\t",a);

    ! Entra com a demanda individual do mercado
    Cont:=1;
    for (c) do
        put FormatString("%n\t", DemandaReg(a,c));
        Cont+=1;
    endfor;

    ! Entra com o desvio padraso da demanda individual do mercado
    Cont:=1;
    for (c) do
        put FormatString("%n\t", DesvPadDemReg(a,c));
        Cont+=1;
    endfor;
endfor;

```



```

! Entra com a correlacao entre os mercados
Cont:=1;
for (c) do
  Cont2:=1;
  For (cc) do
    if (Cont2>Cont) then
      put FormatString("%n\t", CorrDemConsumReg(a,c,cc));
      Cont2+=1;
    endif;
  endfor;
  Cont+=1;
endfor;

! Entra com o lead time de ressuprimento dos armazens
Cont:=1;
for (w) do
  put FormatString("%n\t", LTReg(a,w));
  Cont+=1;
endfor;

! Entra com o desvio padrao do lead time de ressuprimento dos armazens
Cont:=1;
for (w) do
  put FormatString("%n\t", DesvPadLTReg(a,w));
  Cont+=1;
endfor;

! Entra com o custo de transporte entre os armazens e mercados
Cont:=1;
for (w) do
  Cont2:=1;
  For (c) do
    put FormatString("%n\t", CustoUnitTranspReg(a,w,c));
    Cont2+=1;
  endfor;
  Cont+=1;
endfor;

! Entra com o fator de servico
Cont:=1;
for (w) do
  put FormatString("%n\t", kReg(a,w));
  Cont+=1;
endfor;

! Entra com o custo de manutencao de estoques,
Cont:=1;
for (w) do
  put FormatString("%n\t", CustoManutEstReg(a,w));
  Cont+=1;
endfor;

! Entra com o custo de colocação de pedidos,
Cont:=1;
for (w) do
  put formatString("%n\t",CustoColocPedidoReg(a,w));
  Cont+=1;
endfor;

! Entra com, respectivamente, o custo de ressuprimento,

```

```

! a situacao da solucao da analise, o custo total de transporte, o custo total de estoque de ciclo
! o custo total de estoque de serguranca e o custo total da analise
put FormatString("%n\t", SReg(a));
put FormatString("%s\t", SituaAnaliseReg(a));
put FormatString("%n\t", CustoTotTranspReg(a));
put FormatString("%n\t", CustoTotEstCicloReg(a));
put FormatString("%n\t", CustoTotEstSegReg(a));
put FormatString("%n\t", CustoTotReg(a));

```

```

! Entra com a alocacao dos mercados aos armazens
Cont:=1;
for (w) do
  Cont2:=1;
  For (c) do
    put FormatString("%n\t", YReg(a,w,c));
    Cont2+=1;
  endfor;
  Cont+=1;
endfor;

```

```

! Entra com o LEC dos armazens
Cont:=1;
for (w) do
  put FormatString("%n\t", LECReg(a,w));
  Cont+=1;
endfor;

```

```

! Entra com o numero de ressuprimentos dos armazens
Cont:=1;
for (w) do
  put FormatString("%n\t", NumRessupReg(a,w));
  Cont+=1;
endfor;

```

```

! Entra com o estoque de ciclo nos armazens
Cont:=1;
for (w) do
  put FormatString("%n\t", EstoqCicloReg(a,w));
  Cont+=1;
endfor;

```

```

! Entra com o estoque de serguranca nos armazens
Cont:=1;
for (w) do
  put FormatString("%n\t", EstoqSegReg(a,w));
  Cont+=1;
endfor;

```

```

! Entra com a demanda agregada nos armazens
Cont:=1;
for (w) do
  put FormatString("%n\t", DemandaAgregReg(a,w));
  Cont+=1;
endfor;

```

```

! Entra com o desvio padrao durante o LT da demanda agregada nos armazens
Cont:=1;
for (w) do
  put FormatString("%n\t", DesvPadDemLTAggregReg(a,w));
  Cont+=1;
endfor;

```

```

! Entra com a quantidade total transportada
Cont:=1;
for (w) do
  Cont2:=1;
  For (c) do
    put FormatString("%n\t", TransporteReg(a,w,c));
    Cont2+=1;
  endfor;
  Cont+=1;
endfor;
put /;

endfor;

putclose Resultados3;

ENDPROCEDURE ;

PROCEDURE
identifier : EscreveEntradas
body      :
  put EntReplica;

  put "Analises:=data{", /;
  for (a) do
    if a=Last(Analises) then
      put @16, FormatString("%e", a), /;
    else
      put @16, FormatString("%e,", a), /;
    endif;
  endfor;
  put @16, "},"; //;

  put "COMPOSITE TABLE", /;
  put @16, "a", @37, "SReg", /;
  for (a) do
    put @16, FormatString("%e", a), @37, SReg(a):<20:15, /;
  endfor;
  put @16, "},"; //;

  put "COMPOSITE TABLE", /;
  put @16, "a", @37, "w", @58, "LReg", @79, "DesvPadLReg", @100, "kReg",
    @121, "CustoManutEstReg", @142, "CustoColocPedidoReg", /;
  for (a) do
    for (w) do
      put @16, FormatString("%e", a), @37, FormatString("%e", w),
        @58, LReg(a,w):<20:15, @79, DesvPadLReg(a,w):<20:15,
        @100, kReg(a,w):<20:15, @121,
        CustoManutEstReg(a,w):<20:15, @142,
        CustoColocPedidoReg(a,w):<20:15, /;
    endfor;
  endfor;
  put @16, "},"; //;

  put "COMPOSITE TABLE", /;
  put @16, "a", @37, "c", @58, "DemandaReg", @79, "DesvPadDemReg", /;
  for (a) do
    for (c) do
      put @16, FormatString("%e", a), @37, FormatString("%e", c),
        @58, DemandaReg(a,c):<20:15, @79, DesvPadDemReg(a,c):<20:15, /;
    endfor;
  endfor;

```

```

put @16, ";", //;

put "COMPOSITE TABLE", /;
put @16, "a", @37, "w", @58, "c", @79, "CustoUnitTranspReg", /;
for (a) do
  for (w) do
    for (c) do
      put @16, FormatString("%e", a), @37, FormatString("%e", w),
        @58, FormatString("%e", c), @79, CustoUnitTranspReg(a,w,c):<20:15, /;
    endfor;
  endfor;
endfor;
put @16, ";", //;

put "COMPOSITE TABLE", /;
put @16, "a", @37, "c", @58, "cc", @79, "CorrDemConsumReg", /;
for (a) do
  for (c) do
    for (cc) do
      put @16, FormatString("%e", a), @37, FormatString("%e", c),
        @58, FormatString("%e", cc), @79, CorrDemConsumReg(a,c,cc):<20:15, /;
    endfor;
  endfor;
endfor;
put @16, ";", //;

putclose EntReplica

ENDPROCEDURE ;

ENDSECTION SaidaDados ;

SECTION Simulacao

DECLARATION SECTION DeclarationLoopOtim

SET:
  identifier : LoopsOtim
  index      : o ;

ELEMENT PARAMETER:
  identifier : EsteLoop
  range      : LoopsOtim ;

ELEMENT PARAMETER:
  identifier : LoopMin
  range      : LoopsOtim ;

STRING PARAMETER:
  identifier : NomeLoop ;

PARAMETER:
  identifier : ContOtim ;

PARAMETER:
  identifier : ContOtimMax ;

PARAMETER:
  identifier : YLoop
  index domain : (o,w,c) ;

```

PARAMETER:

identif ier : DemandaAgregLoop
index domain : (o,w) ;

PARAMETER:

identif ier : VarDemAgregLoop
index domain : (o,w) ;

PARAMETER:

identif ier : DesvPadDemLTAgregLoop
index domain : (o,w) ;

PARAMETER:

identif ier : LECLoop
index domain : (o,w) ;

PARAMETER:

identif ier : EstoqCicloLoop
index domain : (o,w) ;

PARAMETER:

identif ier : EstoqSegLoop
index domain : (o,w) ;

PARAMETER:

identif ier : TransporteLoop
index domain : (o,w,c) ;

STRING PARAMETER:

identif ier : SituaAnaliseLoop
index domain : (o) ;

PARAMETER:

identif ier : CustototTranspLoop
index domain : (o) ;

PARAMETER:

identif ier : CustototEstCicloLoop
index domain : (o) ;

PARAMETER:

identif ier : CustototEstSegLoop
index domain : (o) ;

PARAMETER:

identif ier : CustototLoop
index domain : (o) ;

ENDSECTION ;

DECLARATION SECTION

SET:

identif ier : Analises
index : a ;

ELEMENT PARAMETER:

identif ier : EstaAnalise
range : Analises ;

STRING PARAMETER:

identif ier : Iterac
initial data : "" ;

STRING PARAMETER:

identif ier : Mensagem ;

PARAMETER:

identif ier : Percent ;

PARAMETER:

identif ier : NumAnalises ;

PARAMETER:

identif ier : SMin ;

PARAMETER:

identif ier : SMax ;

PARAMETER:

identif ier : MinCustoColocPedido
index domain : (w) ;

PARAMETER:

identif ier : MaxCustoColocPedido
index domain : (w) ;

PARAMETER:

identif ier : MinCustoManutEstoq
index domain : (w) ;

PARAMETER:

identif ier : MaxCustoManutEstoq
index domain : (w) ;

PARAMETER:

identif ier : MinLT
index domain : (w) ;

PARAMETER:

identif ier : MaxLT
index domain : (w) ;

PARAMETER:

identif ier : MinDesvPadLT
index domain : (w) ;

PARAMETER:

identif ier : MaxDesvPadLT
index domain : (w) ;

PARAMETER:

identif ier : MinCustoUnitTransp
index domain : (w,c) ;

PARAMETER:

identif ier : MaxCustoUnitTransp
index domain : (w,c) ;

PARAMETER:

identif ier : MinDemanda
index domain : (c) ;

PARAMETER:

identifiant : MaxDemanda
index domain : (c) ;

PARAMETER:

identifiant : MinDesvPadDem
index domain : (c) ;

PARAMETER:

identifiant : MaxDesvPadDem
index domain : (c) ;

PARAMETER:

identifiant : MinCorrDemConsum
index domain : (c,cc) ;

PARAMETER:

identifiant : MaxCorrDemConsum
index domain : (c,cc) ;

PARAMETER:

identifiant : CustocolocPedidoReg
index domain : (a,w) ;

PARAMETER:

identifiant : CustomanutEstReg
index domain : (a,w) ;

PARAMETER:

identifiant : kReg
index domain : (a,w) ;

PARAMETER:

identifiant : LTReg
index domain : (a,w) ;

PARAMETER:

identifiant : DesvPadLTReg
index domain : (a,w) ;

PARAMETER:

identifiant : CustounitTranspReg
index domain : (a,w,c) ;

PARAMETER:

identifiant : DemandaReg
index domain : (a,c) ;

PARAMETER:

identifiant : DesvPadDemReg
index domain : (a,c) ;

PARAMETER:

identifiant : CorrDemConsumReg
index domain : (a,c,cc) ;

PARAMETER:

identifiant : YReg
index domain : (a,w,c) ;

PARAMETER:

identifiant : DemandaAgregReg

index domain : (a,w) ;

PARAMETER:

identifi er : VarDemAgregReg

index domain : (a,w) ;

PARAMETER:

identifi er : DesvPadDemLTAggregReg

index domain : (a,w) ;

PARAMETER:

identifi er : LECReg

index domain : (a,w) ;

PARAMETER:

identifi er : NumRessupReg

index domain : (a,w) ;

PARAMETER:

identifi er : EstoqCicloReg

index domain : (a,w) ;

PARAMETER:

identifi er : EstoqSegReg

index domain : (a,w) ;

PARAMETER:

identifi er : TransporteReg

index domain : (a,w,c) ;

STRING PARAMETER:

identifi er : SituaAnaliseReg

index domain : (a) ;

PARAMETER:

identifi er : SReg

index domain : (a) ;

PARAMETER:

identifi er : CustototTranspReg

index domain : (a) ;

PARAMETER:

identifi er : CustototEstCicloReg

index domain : (a) ;

PARAMETER:

identifi er : CustototEstSegReg

index domain : (a) ;

PARAMETER:

identifi er : CustototReg

index domain : (a) ;

ENDSECTION ;

PROCEDURE

identifi er : Simula

body :

! Realiza as iteracoes da simulacao

while (LoopCount<=NumAnalises) do !Faz o loop ate que se atinja o numero de iteracoes desejado


```

! Mostra, na barra de status, qual a iteraçao está sendo rodada
Mensagem:=formatstring("Iteração Numero %n", LoopCount);
statusmessage(Mensagem);

! Mostra uma barra de evoluçao com a porcentagem das iteraçoes já rodadas
!Percent:=100*LoopCount/NumAnalises;
!dialogprogress("Porcentagem de iteraçoes realizadas", Percent);

if (TesteValida=0) then

    if (SorteiaColocPed=1) then
        ! Sorteia o custo de colocação de pedidos de cada armazem
        CustoColocPedido(w):=Uniform(MinCustoColocPedido(w),MaxCustoColocPedido(w));
    endif;

    if (SorteiaManutEstoq=1) then
        ! Sorteia o custo de manutenção de estoques de cada armazem
        CustoManutEstoq(w):=Uniform(MinCustoManutEstoq(w),MaxCustoManutEstoq(w));
    endif;

    ! Sorteia o LT de ressuprimento de cada armazem
    LT(w):=Uniform(MinLT(w),MaxLT(w));

    ! Sorteia o desvio padrao do LT de ressuprimento de cada armazem
    DesvPadLT(w):=Uniform(MinDesvPadLT(w),MaxDesvPadLT(w));

    ! Sorteia o custo unitario de transporte entre fábricas e armazéns
    S:=Uniform(SMin, SMax)*IncluiTransp;

    ! Sorteia o custo unitario de transporte entre cada armazem e mercado
    CustoUnitTransp(w,c):=Uniform(MinCustoUnitTransp(w,c), MaxCustoUnitTransp(w,c))*IncluiTransp;

    ! Sorteia a demanda de cada mercado
    Demanda(c):= Uniform(MinDemanda(c), MaxDemanda(c));

    ! Sorteia o desvio padrao da demanda de cada mercado
    DesvPadDem(c):=Uniform(MinDesvPadDem(c),MaxDesvPadDem(c));

    ! Sorteia a correlacao entre as demandas dos mercados
    CorrDemConsum((c,cc) | cc=c):=0;
    CorrDemConsum((c,cc) | cc>c):=Uniform(MinCorrDemConsum(c,cc),MaxCorrDemConsum(c,cc));
    CorrDemConsum((c,cc) | cc<c):=CorrDemConsum(cc,c)

endif;

ContOtim:=1;
while (ContOtim <= ContOtimMax) do

    ! Inicializa a varivel
    if (ContOtim=1) then
        Y(w,c):=0;
    else
        !Y(w,c):=Precision(Uniform(0,1), 2);
    endif;
    CustoTot:=0;

    ! Realiza a otimizacao
    !MinCustoTotPlan.CallbackAOA:='AOAVazia';
    solve MinCustoTotPlan;

    ! Da nome a iteracao da simulacao
    NomeLoop:=FormatString("Loop%i", ContOtim);

```

```

! Cria o elemento correspondente a iteracao da simulacao
EsteLoop:=StringToElement(LoopsOtim, NomeLoop);
if (not EsteLoop) then !Se o elemento nao existe, o cria
    SetElementAdd(LoopsOtim, EsteLoop, NomeLoop);
endif;

! Registro das variveis do Loop

!Registra o Status da Solucao Encontrada
switch MinCustoTotPlan.ProgramStatus do
    'Optimal':
        SituaAnaliseLoop(EsteLoop):="Solved: Optimal";
    'LocallyOptimal':
        SituaAnaliseLoop(EsteLoop):="Solved: LocallyOptimal";
    'Unbounded':
        SituaAnaliseLoop(EsteLoop):="Infeasible: Unbounded";
    'Infeasible':
        SituaAnaliseLoop(EsteLoop):="Infeasible: Infeasible";
    'IntegerInfeasible':
        SituaAnaliseLoop(EsteLoop):="Infeasible: IntegerInfeasible";
    'LocallyInfeasible':
        SituaAnaliseLoop(EsteLoop):="Infeasible: LocallyInfeasible";
    'IntermediateInfeasible':
        SituaAnaliseLoop(EsteLoop):="Interrupted: IntermediateInfeasible";
    'IntermediateNonInteger':
        SituaAnaliseLoop(EsteLoop):="Interrupted: IntermediateNonInteger";
    'IntermediateNonOptimal':
        SituaAnaliseLoop(EsteLoop):="Interrupted: IntermediateNonOptimal";
    default:
        SituaAnaliseLoop(EsteLoop):="Not solved";
endswitch;

! Registra a alocao dos mercados aos armazens
YLoop(EsteLoop,w,c):=Y(w,c);

! Registra a demanda agregada da cada armazem
DemandaAgregLoop(EsteLoop,w):=sum[c,Demanda(c)*Y(w,c)];

! Registra a variancia da demanda agregada da cada armazem
VarDemAgregLoop(EsteLoop,w):=sum[ c, sqr(Y(w,c)) * sqr(DesvPadDem(c)) ] +
2 * sum[ c, sum[ cc | cc > c, Y(w,c) * Y(w,cc) * CorrDemConsum(c,cc) * DesvPadDem(c) * DesvPadDem(cc) ] ];

! Registra o desvio padrao da demanda agregada durante o LT
DesvPadDemLTAggregLoop(EsteLoop,w):=sqrt( LT(w) * sum[ c, sqr(Y(w,c)) * sqr(DesvPadDem(c)) ] +
2 * LT(w) * sum[ c, sum[ cc | cc > c, Y(w,c) * Y(w,cc) * CorrDemConsum(c,cc) * DesvPadDem(c) * DesvPadDem(cc) ] ]
+ sqr(DesvPadLT(w)) * sqr(sum[ c, Demanda(c)*Y(w,c) ] ) );

! Registra o LEC
LECLoop(EsteLoop,w):=sqrt(2*sum[c,Demanda(c)*Y(w,c)]*CustoColocPedido(w)/CustoManutEstoq(w))*IncluiEstCiclo;

! Registra o Estoque de ciclo
EstoqCicloLoop(EsteLoop,w):=LECLoop(EsteLoop,w)/2;

! Registra o Estoque de Seguranca
EstoqSegLoop(EsteLoop,w):=k(w)*sqrt( LT(w) * sum[ c, sqr(Y(w,c)) * sqr(DesvPadDem(c)) ] +
2 * LT(w) * sum[ c, sum[ cc | cc > c, Y(w,c) * Y(w,cc) * CorrDemConsum(c,cc) * DesvPadDem(c) * DesvPadDem(cc) ] ]
+ sqr(DesvPadLT(w)) * sqr(sum[ c, Demanda(c)*Y(w,c) ] ) );

! Registra a quantidade transportada de cada armazem a cada mercado
TransporteLoop(EsteLoop,w,c):=Demanda(c)*Y(w,c);

```

```

! Registra o custo total de transporte
CustoTotTranspLoop(EsteLoop):=(sum[(w,c), S*LT(w)*Demanda(c)*Y(w,c)] +
    sum[(w,c), CustoUnitTransp(w,c)*Demanda(c)*Y(w,c)]);

! Registra o custo total dos estoques de ciclo
CustoTotEstCicloLoop(EsteLoop):=sum[w , sqrt( 2 * sum[c,Demanda(c)*Y(w,c)] * CustoColocPedido(w) *
CustoManutEstoq(w) ) ]*IncluiEstCiclo;

! Registra o custo total dos estoques de segurança
CustoTotEstSegLoop(EsteLoop):=sum[w, CustoManutEstoq(w)*k(w)*sqrt( LT(w) * sum[ c, sqrt(Y(w,c)) *
sqr(DesvPadDem(c)) ] +
2 * LT(w) * sum[ c, sum[ cc | cc > c, Y(w,c) * Y(w,cc) * CorrDemConsum(c,cc) * DesvPadDem(c) * DesvPadDem(cc) ] ]
+ sqr(DesvPadLT(w)) * sqr(sum[ c, Demanda(c)*Y(w,c) ] ) );

! Registra o custo total da rede
CustoTotLoop(EsteLoop):=CustoTot;

! Fim do registro das variveis do loop

ContOtim+=1;

endwhile;

! Determina o loop onde ocorreu o minimo
LoopMin:=ArgMin[ o, CustoTotLoop(o) ];

! Da nome a iteracao da simulacao
if (LoopCount<10) then
    Iterac:=FormatString("Analise0000%i", LoopCount);
elseif ((LoopCount>=10) and (LoopCount<100)) then
    Iterac:=FormatString("Analise000%i", LoopCount);
elseif ((LoopCount>=100) and (LoopCount<1000)) then
    Iterac:=FormatString("Analise00%i", LoopCount);
elseif ((LoopCount>=1000) and (LoopCount<10000)) then
    Iterac:=FormatString("Analise0%i", LoopCount);
else
    Iterac:=FormatString("Analise%i", LoopCount);
endif;

! Cria o elemento correspondente a iteracao da simulacao
EstaAnalise:=StringToElement(Analises, Iterac);
if (not EstaAnalise) then !Se o elemento nao existe, o cria
    SetElementAdd(Analises, EstaAnalise, Iterac);
endif;

! Registrto dos dados de entrada

! Registra o fator de serviço de pedidos de cada armazem
kReg(EstaAnalise,w):=k(w);

! Registra o custo de colocacao de pedidos de cada armazem
CustoColocPedidoReg(EstaAnalise,w):=CustoColocPedido(w);

! Registra o custo unitario de manutencao de estoques de cada armazem
CustoManutEstReg(EstaAnalise,w):=CustoManutEstoq(w);

! Registra o LT de ressuprimento de cada armazem
LTReg(EstaAnalise,w):=LT(w);

! Registra o desvio padrao do LT de ressuprimento de cada armazem
DesvPadLTReg(EstaAnalise,w):=DesvPadLT(w);

```

```

! Registra o custo diário de ressuprimento
SReg(EstaAnalise):=S;

! Registra todos os custos unitarios de transporte utilizados na iteracao
CustoUnitTranspReg(EstaAnalise, w,c):=CustoUnitTransp(w,c);

! Registra todas as demandas utilizadas na iteracao
DemandaReg(EstaAnalise,c):=Demanda(c);

! Registra o desvio padrao da demanda de cada mercado
DesvPadDemReg(EstaAnalise,c):=DesvPadDem(c);

! Registra a correlacao entre as demandas dos mercados
CorrDemConsumReg(EstaAnalise,c,cc):=CorrDemConsum(c,cc);

! Fim do registrto dos dados de entrada

! Registro das variveis do problema

!Registra o Status da Solucao Encontrada
SituaAnaliseReg(EstaAnalise):=SituaAnaliseLoop(LoopMin);

! Registra a alocao dos mercados aos armazens
YReg(EstaAnalise,w,c):=YLoop(LoopMin,w,c);

! Registra a demanda agregada da cada armazem
DemandaAgregReg(EstaAnalise,w):=DemandaAgregLoop(LoopMin,w);

! Registra a variancia da demanda agregada da cada armazem
VarDemAgregReg(EstaAnalise,w):=VarDemAgregLoop(LoopMin,w);

! Registra o desvio padrao da demanda agregada durante o LT
DesvPadDemLTAggregReg(EstaAnalise,w):=DesvPadDemLTAggregLoop(LoopMin,w);

! Registra o LEC
LECReg(EstaAnalise,w):=LECLoop(LoopMin,w);

! Registra o núemro de ressuprimentos
NumRessupReg((EstaAnalise,w) | LECReg(EstaAnalise,w)<>0):=DemandaAgregReg(EstaAnalise,w)/LECReg(EstaAnalise,w);

! Registra o Estoque de Ciclo
EstoqCicloReg(EstaAnalise,w):=EstoqCicloLoop(LoopMin,w);

! Registra o Estoque de Seguranca
EstoqSegReg(EstaAnalise,w):=EstoqSegLoop(LoopMin,w);

! Registra a quantidade transportada de cada armazem a cada mercado
TransporteReg(EstaAnalise,w,c):=TransporteLoop(LoopMin,w,c);

! Registra o custo total de transporte
CustoTotTranspReg(EstaAnalise):=CustoTotTranspLoop(LoopMin);

! Registra o custo total dos estoques de ciclo
CustoTotEstCicloReg(EstaAnalise):=CustoTotEstCicloLoop(LoopMin);

! Registra o custo total dos estoques de ciclo
CustoTotEstSegReg(EstaAnalise):=CustoTotEstSegLoop(LoopMin);

! Registra o custo total da rede
CustoTotReg(EstaAnalise):=CustoTotLoop(LoopMin);

```

```
! Fim do registro das variaveis do problema

endwhile;

ENDPROCEDURE ;

PROCEDURE
  identifier : AOAVAzia

ENDPROCEDURE ;

ENDESECTION Simulacao ;

SECTION Otimizacao

DECLARATION SECTION

SET:
  identifier : Armazens
  index     : w ;

SET:
  identifier : Consumid
  indices   : c, cc ;

PARAMETER:
  identifier : TesteValida ;

PARAMETER:
  identifier : IncluiEstCiclo ;

PARAMETER:
  identifier : IncluiTransp ;

PARAMETER:
  identifier : SorteiaColocPed ;

PARAMETER:
  identifier : SorteiaManutEstoque ;

PARAMETER:
  identifier : S ;

PARAMETER:
  identifier : CustoColocPedido
  index domain : (w) ;

PARAMETER:
  identifier : CustoManutEstoque
  index domain : (w) ;

PARAMETER:
  identifier : LT
  index domain : (w) ;

PARAMETER:
  identifier : DesvPadLT
  index domain : (w) ;

PARAMETER:
  identifier : k
```

index domain : (w) ;

PARAMETER:

identifi er : CustoUnitTransp

index domain : (w,c) ;

PARAMETER:

identifi er : Demanda

index domain : (c) ;

PARAMETER:

identifi er : DesvPadDem

index domain : (c) ;

PARAMETER:

identifi er : CorrDemConsum

index domain : (c,cc) ;

VARIABLE:

identifi er : Y

index domain : (w,c)

text : "Variável que armazena a proporção da demanda do consumidor c atendida pelo armazém w "

range : [0, 1] ;

VARIABLE:

identifi er : CustoTot

definition : (sum[w , sqrt(2 * sum[c,Demanda(c)*Y(w,c)] * CustoColocPedido(w) * CustoManutEstoq(w))]*IncluiEstCiclo
+ (sum[w, CustoManutEstoq(w)*k(w)*sqrt(LT(w) * sum[c, sqrt(Y(w,c)) * sqrt(DesvPadDem(c))] +
2 * LT(w) * sum[c, sum[cc| cc > c, Y(w,c) * Y(w,cc) * CorrDemConsum(c,cc) * DesvPadDem(c) *
DesvPadDem(cc)]]
+ sqrt(DesvPadLT(w)) * sqrt(sum[c, Demanda(c)*Y(w,c)]]))
+ (sum[(w,c), S*LT(w)*Demanda(c)*Y(w,c)] +
sum[(w,c), CustoUnitTransp(w,c)*Demanda(c)*Y(w,c)]) ;

CONSTRAINT:

identifi er : RestricAlocArmazConsum

index domain : (c)

text : "Garante que a demanda dos consumidores sera atendida"

definition : sum[w,Y(w,c)]=1 ;

MATHEMATICAL PROGRAM:

identifi er : MinCustoTotPlan

objective : CustoTot

direction : minimize

type : NLP ;

ENDSECTION ;

ENDSECTION Otimizacao ;

PROCEDURE

identifi er : MainInitialization

body :

! Chama o procedimento que le o arquivo com os dados de entrada

DadosIniciais

ENDPROCEDURE ;

PROCEDURE

identifi er : MainExecution

body :

! Chama o procedimento que le o arquivo com os dados de entrada

MainInitialization;

```
! Chama o procedimento que realiza a simulacao
Simula;
! Chama o procedimento que escreve o arquivo .txt com as saidas
EscreveSaidaPersonal;
! Chama o procedimento que escreve o arquivo .txt com as saidas para análise estatística
EscreveSaidaPersonal2;
! Chama o procedimento que escreve a planilha EXCEL com as saidas
!EscreveSaidaExcel;
! Chama o procedimento que escreve o arquivo .txt com as entradas para replicação
EscreveEntradas

ENDPROCEDURE ;

PROCEDURE
identifier : MainTermination
body :
if ( CaseSaveAll( confirm:2 ) = 1 ) then
return 1;
else
return 0;
endif ;

ENDPROCEDURE ;

ENDMODEL Main_InstalaArmazem ;
```

Anexo 3 – Variáveis Utilizadas nas Análises de Sensibilidade e nas Análises Estatísticas

Quadro 25 - Descrição dos parâmetros de entrada usadas no modelo de localização e nas análises de sensibilidade como variáveis primárias.

Variável	Descrição da Variável
DMerc1 (D_{b_1})	Demanda do mercado 1
DMerc2 (D_{b_2})	Demanda do mercado 2
DMerc3 (D_{b_3})	Demanda do mercado 3
DMerc4 (D_{b_4})	Demanda do mercado 4
DMerc5 (D_{b_5})	Demanda do mercado 5
SDMerc1 ($\sigma_{D_{b_1}}$)	Desvio-padrão da demanda do mercado 1
SDMerc2 ($\sigma_{D_{b_2}}$)	Desvio-padrão da demanda do mercado 2
SDMerc3 ($\sigma_{D_{b_3}}$)	Desvio-padrão da demanda do mercado 3
SDMerc4 ($\sigma_{D_{b_4}}$)	Desvio-padrão da demanda do mercado 4
SDMerc5 ($\sigma_{D_{b_5}}$)	Desvio-padrão da demanda do mercado 5
CorrDemMerc1Merc2 (ρ_{12})	Correlação entre as demandas dos mercados 1 e 2
CorrDemMerc1Merc3 (ρ_{13})	Correlação entre as demandas dos mercados 1 e 3
CorrDemMerc1Merc4 (ρ_{14})	Correlação entre as demandas dos mercados 1 e 4
CorrDemMerc1Merc5 (ρ_{15})	Correlação entre as demandas dos mercados 1 e 5
CorrDemMerc2Merc3 (ρ_{23})	Correlação entre as demandas dos mercados 2 e 3
CorrDemMerc2Merc4 (ρ_{24})	Correlação entre as demandas dos mercados 2 e 4
CorrDemMerc2Merc5 (ρ_{25})	Correlação entre as demandas dos mercados 2 e 5
CorrDemMerc3Merc4 (ρ_{34})	Correlação entre as demandas dos mercados 3 e 4
CorrDemMerc3Merc5 (ρ_{35})	Correlação entre as demandas dos mercados 3 e 5
CorrDemMerc4Merc5 (ρ_{45})	Correlação entre as demandas dos mercados 4 e 5
LTArm1 (L_{a_1})	<i>Lead-time</i> de ressuprimento do armazém 1
LTArm2 (L_{a_2})	<i>Lead-time</i> de ressuprimento do armazém 2
LTArm3 (L_{a_3})	<i>Lead-time</i> de ressuprimento do armazém 3
LTArm4 (L_{a_4})	<i>Lead-time</i> de ressuprimento do armazém 4
LTArm5 (L_{a_5})	<i>Lead-time</i> de ressuprimento do armazém 5
SLTArm1 ($\sigma_{L_{a_1}}$)	Desvio-padrão do <i>lead-time</i> de ressuprimento do armazém 1
SLTArm2 ($\sigma_{L_{a_2}}$)	Desvio-padrão do <i>lead-time</i> de ressuprimento do armazém 2
SLTArm3 ($\sigma_{L_{a_3}}$)	Desvio-padrão do <i>lead-time</i> de ressuprimento do armazém 3
SLTArm4 ($\sigma_{L_{a_4}}$)	Desvio-padrão do <i>lead-time</i> de ressuprimento do armazém 4

Variável	Descrição da Variável
SLTArm5 ($\sigma_{L_{a5}}$)	Desvio-padrão do <i>lead-time</i> de ressuprimento do armazém 5
CustoTranspArm1Merc1 (T_{11})	Custo unitário de transporte entre o armazém 1 e o mercado 1
CustoTranspArm1Merc2 (T_{21})	Custo unitário de transporte entre o armazém 1 e o mercado 2
CustoTranspArm1Merc3 (T_{31})	Custo unitário de transporte entre o armazém 1 e o mercado 3
CustoTranspArm1Merc4 (T_{41})	Custo unitário de transporte entre o armazém 1 e o mercado 4
CustoTranspArm1Merc5 (T_{51})	Custo unitário de transporte entre o armazém 1 e o mercado 5
CustoTranspArm2Merc1 (T_{12})	Custo unitário de transporte entre o armazém 2 e o mercado 1
CustoTranspArm2Merc2 (T_{22})	Custo unitário de transporte entre o armazém 2 e o mercado 2
CustoTranspArm2Merc3 (T_{32})	Custo unitário de transporte entre o armazém 2 e o mercado 3
CustoTranspArm2Merc4 (T_{42})	Custo unitário de transporte entre o armazém 2 e o mercado 4
CustoTranspArm2Merc5 (T_{52})	Custo unitário de transporte entre o armazém 2 e o mercado 5
CustoTranspArm3Merc1 (T_{13})	Custo unitário de transporte entre o armazém 3 e o mercado 1
CustoTranspArm3Merc2 (T_{23})	Custo unitário de transporte entre o armazém 3 e o mercado 2
CustoTranspArm3Merc3 (T_{33})	Custo unitário de transporte entre o armazém 3 e o mercado 3
CustoTranspArm3Merc4 (T_{43})	Custo unitário de transporte entre o armazém 3 e o mercado 4
CustoTranspArm3Merc5 (T_{53})	Custo unitário de transporte entre o armazém 3 e o mercado 5
CustoTranspArm4Merc1 (T_{14})	Custo unitário de transporte entre o armazém 4 e o mercado 1
CustoTranspArm4Merc2 (T_{24})	Custo unitário de transporte entre o armazém 4 e o mercado 2
CustoTranspArm4Merc3 (T_{34})	Custo unitário de transporte entre o armazém 4 e o mercado 3
CustoTranspArm4Merc4 (T_{44})	Custo unitário de transporte entre o armazém 4 e o mercado 4
CustoTranspArm4Merc5 (T_{54})	Custo unitário de transporte entre o armazém 4 e o mercado 5
CustoTranspArm5Merc1 (T_{15})	Custo unitário de transporte entre o armazém 5 e o mercado 1
CustoTranspArm5Merc2 (T_{25})	Custo unitário de transporte entre o armazém 5 e o mercado 2
CustoTranspArm5Merc3 (T_{35})	Custo unitário de transporte entre o armazém 5 e o mercado 3
CustoTranspArm5Merc4 (T_{45})	Custo unitário de transporte entre o armazém 5 e o mercado 4
CustoTranspArm5Merc5 (T_{55})	Custo unitário de transporte entre o armazém 5 e o mercado 5
kArm1 (k_1)	Fator de segurança do estoque no armazém 1
kArm2 (k_2)	Fator de segurança do estoque no armazém 2
kArm3 (k_3)	Fator de segurança do estoque no armazém 3
kArm4 (k_4)	Fator de segurança do estoque no armazém 4
kArm5 (k_5)	Fator de segurança do estoque no armazém 5
CustoUnitEstoqArm1 (C_{a_1})	Custo de manutenção de estoques no armazém 1
CustoUnitEstoqArm2 (C_{a_2})	Custo de manutenção de estoques no armazém 2
CustoUnitEstoqArm3 (C_{a_3})	Custo de manutenção de estoques no armazém 3

Variável	Descrição da Variável
CustoUnitEstoqArm4 (C_{a_4})	Custo de manutenção de estoques no armazém 4
CustoUnitEstoqArm5 (C_{a_5})	Custo de manutenção de estoques no armazém 5
CustoColocPedArm1 (A_{a_1})	Custo de colocação de pedidos no armazém 1
CustoColocPedArm2 (A_{a_2})	Custo de colocação de pedidos no armazém 2
CustoColocPedArm3 (A_{a_3})	Custo de colocação de pedidos no armazém 3
CustoColocPedArm4 (A_{a_4})	Custo de colocação de pedidos no armazém 4
CustoColocPedArm5 (A_{a_5})	Custo de colocação de pedidos no armazém 5
CustoRessup_S (S)	Custo unitário e diário de ressuprimento dos armazéns

Quadro 26 - Descrição dos parâmetros de saída obtidas pelo modelo de localização e usadas nas análises de sensibilidade como variáveis primárias.

Variável	Descrição da Variável
CustoRessup (CT_{Ressup})	Custo total de ressuprimento
CustoDist (CT_{Dist})	Custo total de distribuição
CustoTotTransp ($CT_{Ressup} + CT_{Dist}$)	Custo total de transporte (ressuprimento e distribuição)
CustoTotEstCiclo ($CT_{EC/CP}$)	Custo total de estoque de ciclo
CustoTotEstSeg (CT_{ES})	Custo total de estoque de segurança
CustoTotRede (CT_{Rede})	Custo total da rede (transporte e estoques)
LECArm1 (LEC_1)	Lote econômico de compra no armazém 1
LECArm2 (LEC_2)	Lote econômico de compra no armazém 2
LECArm3 (LEC_3)	Lote econômico de compra no armazém 3
LECArm4 (LEC_4)	Lote econômico de compra no armazém 4
LECArm5 (LEC_5)	Lote econômico de compra no armazém 5
NumRessupArm1 (NR_1)	Número de ressuprimentos no armazém 1
NumRessupArm2 (NR_2)	Número de ressuprimentos no armazém 2
NumRessupArm3 (NR_3)	Número de ressuprimentos no armazém 3
NumRessupArm4 (NR_4)	Número de ressuprimentos no armazém 4
NumRessupArm5 (NR_5)	Número de ressuprimentos no armazém 5
ECArm1 (EC_1)	Estoque de ciclo no armazém 1
ECArm2 (EC_2)	Estoque de ciclo no armazém 2
ECArm3 (EC_3)	Estoque de ciclo no armazém 3
ECArm4 (EC_4)	Estoque de ciclo no armazém 4
ECArm5 (EC_5)	Estoque de ciclo no armazém 5
ESArm1 (ES_1)	Estoque de segurança no armazém 1

Variável	Descrição da Variável
ESArm2 (ES_2)	Estoque de segurança no armazém 2
ESArm3 (ES_3)	Estoque de segurança no armazém 3
ESArm4 (ES_4)	Estoque de segurança no armazém 4
ESArm5 (ES_5)	Estoque de segurança no armazém 5
DemAgregArm1	Demanda total alocada ao armazém 1
DemAgregArm2	Demanda total alocada ao armazém 2
DemAgregArm3	Demanda total alocada ao armazém 3
DemAgregArm4	Demanda total alocada ao armazém 4
DemAgregArm5	Demanda total alocada ao armazém 5
SLTDemAgregArm1	Desvio-padrão da demanda total alocada ao armazém 1 durante o <i>lead-time</i>
SLTDemAgregArm2	Desvio-padrão da demanda total alocada ao armazém 2 durante o <i>lead-time</i>
SLTDemAgregArm3	Desvio-padrão da demanda total alocada ao armazém 3 durante o <i>lead-time</i>
SLTDemAgregArm4	Desvio-padrão da demanda total alocada ao armazém 4 durante o <i>lead-time</i>
SLTDemAgregArm5	Desvio-padrão da demanda total alocada ao armazém 5 durante o <i>lead-time</i>
WArm1Merc1Arred (W_{11})	Proporção da demanda do mercado 1 alocada ao armazém 1
WArm1Merc2Arred (W_{21})	Proporção da demanda do mercado 2 alocada ao armazém 1
WArm1Merc3Arred (W_{31})	Proporção da demanda do mercado 3 alocada ao armazém 1
WArm1Merc4Arred (W_{41})	Proporção da demanda do mercado 4 alocada ao armazém 1
WArm1Merc5Arred (W_{51})	Proporção da demanda do mercado 5 alocada ao armazém 1
WArm2Merc1Arred (W_{12})	Proporção da demanda do mercado 1 alocada ao armazém 2
WArm2Merc2Arred (W_{22})	Proporção da demanda do mercado 2 alocada ao armazém 2
WArm2Merc3Arred (W_{32})	Proporção da demanda do mercado 3 alocada ao armazém 2
WArm2Merc4Arred (W_{42})	Proporção da demanda do mercado 4 alocada ao armazém 2
WArm2Merc5Arred (W_{52})	Proporção da demanda do mercado 5 alocada ao armazém 2
WArm3Merc1Arred (W_{13})	Proporção da demanda do mercado 1 alocada ao armazém 3
WArm3Merc2Arred (W_{23})	Proporção da demanda do mercado 2 alocada ao armazém 3
WArm3Merc3Arred (W_{33})	Proporção da demanda do mercado 3 alocada ao armazém 3
WArm3Merc4Arred (W_{43})	Proporção da demanda do mercado 4 alocada ao armazém 3
WArm3Merc5Arred (W_{53})	Proporção da demanda do mercado 5 alocada ao armazém 3
WArm4Merc1Arred (W_{14})	Proporção da demanda do mercado 1 alocada ao armazém 4
WArm4Merc2Arred (W_{24})	Proporção da demanda do mercado 2 alocada ao armazém 4
WArm4Merc3Arred (W_{34})	Proporção da demanda do mercado 3 alocada ao armazém 4
WArm4Merc4Arred (W_{44})	Proporção da demanda do mercado 4 alocada ao armazém 4
WArm4Merc5Arred (W_{54})	Proporção da demanda do mercado 5 alocada ao armazém 4
WArm5Merc1Arred (W_{15})	Proporção da demanda do mercado 1 alocada ao armazém 5
WArm5Merc2Arred (W_{25})	Proporção da demanda do mercado 2 alocada ao armazém 5
WArm5Merc3Arred (W_{35})	Proporção da demanda do mercado 3 alocada ao armazém 5
WArm5Merc4Arred (W_{45})	Proporção da demanda do mercado 4 alocada ao armazém 5

Variável	Descrição da Variável
WArm5Merc5Arred (W_{55})	Proporção da demanda do mercado 5 alocada ao armazém 5

Quadro 27 - Variáveis secundárias usadas no tratamento estatístico dos resultados das análises de sensibilidade. O identificador *Entrada* na coluna *Fonte* indica que a variável secundária foi computada a partir de uma relação entre as variáveis de entrada. Ao contrário, o identificador *Saída* na coluna *Fonte* indica que a variável secundária foi computada a partir de uma relação entre as variáveis de saída.

Fonte (Variáveis de Entrada ou Saída)	Variável	Descrição da Variável
Entrada	DMaxDMin ($D_{b_i;\max} / D_{b_i;\min}$)	Relação entre as máxima e mínima demandas dos mercados
Entrada	SDMaxSDMin ($\sigma_{D_{b_i;\max}} / \sigma_{D_{b_i;\min}}$)	Relação entre os máximo e mínimo desvios-padrão da demandas dos mercados
Entrada	LTMaxLTMin ($L_{a_j;\max} / L_{a_j;\min}$)	Relação entre os máximo e mínimo <i>lead-times</i> de ressuprimento dos armazéns
Entrada	SLTMaxSLTMin ($\sigma_{L_{a_j;\max}} / \sigma_{L_{a_j;\min}}$)	Relação entre os máximo e mínimo desvios-padrão do <i>lead-time</i> de ressuprimento dos armazéns
Entrada	CEMaxCEMin ($C_{a_j;\max} / C_{a_j;\min}$)	Relação entre os máximo e mínimo custos de manutenção de estoques dos armazéns
Entrada	CPMaxCPMin ($A_{a_j;\max} / A_{a_j;\min}$)	Relação entre os máximo e mínimo custos de colocação de pedidos dos armazéns
Entrada	CPCE_Arm1 (A_{a_1} / C_{a_1})	Relação entre o custo unitário de colocação de pedido e o custo unitário de manutenção de estoques do armazém 1
Entrada	CPCE_Arm2 (A_{a_2} / C_{a_2})	Relação entre o custo unitário de colocação de pedido e o custo unitário de manutenção de estoques do armazém 2
Entrada	CPCE_Arm3 (A_{a_3} / C_{a_3})	Relação entre o custo unitário de colocação de pedido e o custo unitário de manutenção de estoques do armazém 3
Entrada	CPCE_Arm4 (A_{a_4} / C_{a_4})	Relação entre o custo unitário de colocação de pedido e o custo unitário de manutenção de estoques do armazém 4
Entrada	CPCE_Arm5 (A_{a_5} / C_{a_5})	Relação entre o custo unitário de colocação de pedido e o custo unitário de manutenção de estoques do armazém 5
Entrada	CPCEMaxCPCEMin ($(A_{a_j} / C_{a_j})_{\max} / (A_{a_j} / C_{a_j})_{\min}$)	Quociente das máxima e mínima relações entre o custo unitário de colocação de pedido e o custo unitário de manutenção de estoques dos armazéns
Entrada	SCEMin ($S / C_{a_j;\min}$)	Relação entre o custo unitário e diário de ressuprimento dos armazéns e o mínimo custo de manutenção de estoques dos armazéns
Entrada	SCEMax ($S / C_{a_j;\max}$)	Relação entre o custo unitário e diário de ressuprimento dos armazéns e o máximo custo de manutenção de estoques dos armazéns
Entrada	SCPMin ($S / A_{a_j;\min}$)	Relação entre o custo unitário e diário de ressuprimento dos armazéns e o mínimo custo de colocação de pedidos dos armazéns
Entrada	SCPMax ($S / A_{a_j;\max}$)	Relação entre o custo unitário e diário de ressuprimento dos armazéns e o máximo custo de colocação de pedidos dos armazéns
Entrada	SomaDs ($\sum D_{b_i}$)	Demanda total na rede (soma das demandas dos mercados)
Entrada	SomaCorr ($\sum \rho_{il}$)	Soma de todas as correlações entre as demandas dos mercados
Entrada	ABS_CorrDMaxCorrDMin ($ \rho_{il;\max} / \rho_{il;\min} $)	Valor absoluto da relação entre as máxima e mínima correlações das demandas dos mercados
Entrada	NumCorrDPos	Número de correlações entre as demandas dos

Fonte (Variáveis de Entrada ou Saída)	Variável	Descrição da Variável
		mercados que são positivas
Entrada	NumCorrDNeg	Número de correlações entre as demandas dos mercados que são negativas
Entrada	MedDemMerc ($\sum D_{b_i}/5$)	Média aritmética da demanda dos 5 mercados
Entrada	MedSDMerc ($\sum \sigma_{D_{b_i}}/5$)	Média aritmética do desvio-padrão da demanda dos 5 mercados
Entrada	MedCorrDem ($\sum \rho_{il}/5$)	Média aritmética da correlação entre as demandas dos 5 mercados
Entrada	MedLT ($\sum L_{a_j}/5$)	Média aritmética do <i>lead-time</i> de ressuprimento dos 5 armazéns
Entrada	MedSLT ($\sum \sigma_{L_{a_j}}/5$)	Média aritmética do desvio-padrão do <i>lead-time</i> de ressuprimento dos 5 armazéns
Entrada	MedCustoUnitEstoq ($\sum C_{a_j}/5$)	Média aritmética do custo de manutenção de estoques dos 5 armazéns
Entrada	MedCustoColocPed ($\sum A_{a_j}/5$)	Média aritmética do custo de colocação de pedidos dos 5 armazéns
Saída	LTMed	Média aritmética do <i>lead-time</i> dos armazéns abertos
Saída	SLTMed	Média aritmética do desvio-padrão do <i>lead-time</i> dos armazéns abertos
Saída	LECMed	Média aritmética do lote econômico de compra dos armazéns abertos
Saída	NumRessupMed	Média aritmética do número de ressuprimentos dos armazéns abertos
Saída	ECMed	Média aritmética do estoque de ciclo dos armazéns abertos
Saída	ESMed	Média aritmética do estoque de segurança dos armazéns abertos
Saída	DemAgregMed	Média aritmética da demanda alocada aos armazéns abertos
Saída	SLTDemAregMED	Média aritmética do desvio-padrão da demanda alocada aos armazéns abertos durante o <i>lead-time</i>

Anexo 4 - Histogramas para os Componentes de Custo da Rede

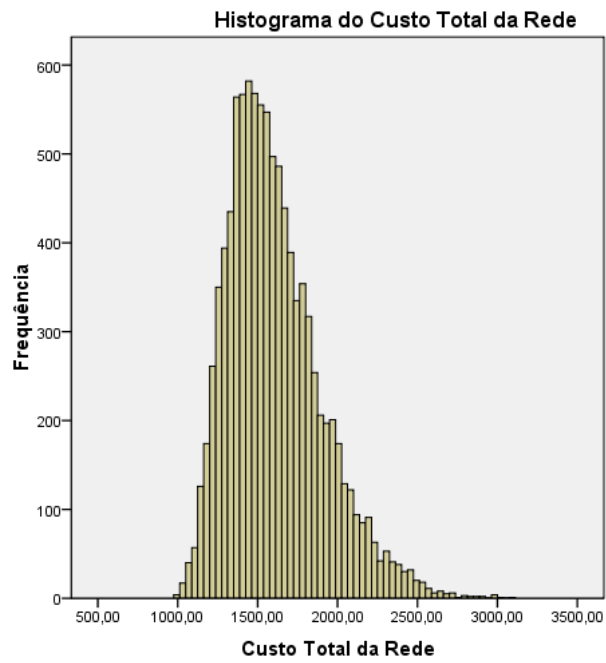


Figura 20 - Histograma do custo total da rede.

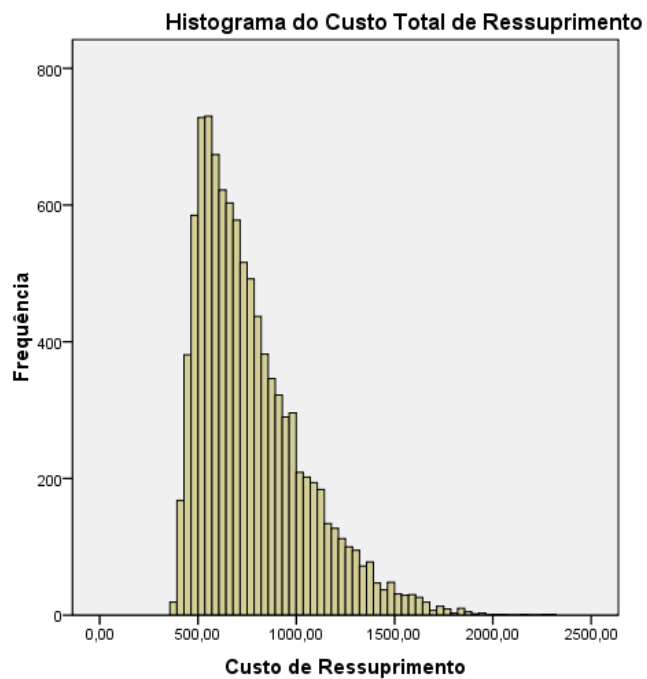


Figura 21 - Histograma do custo total de ressuprimento dos armazéns.

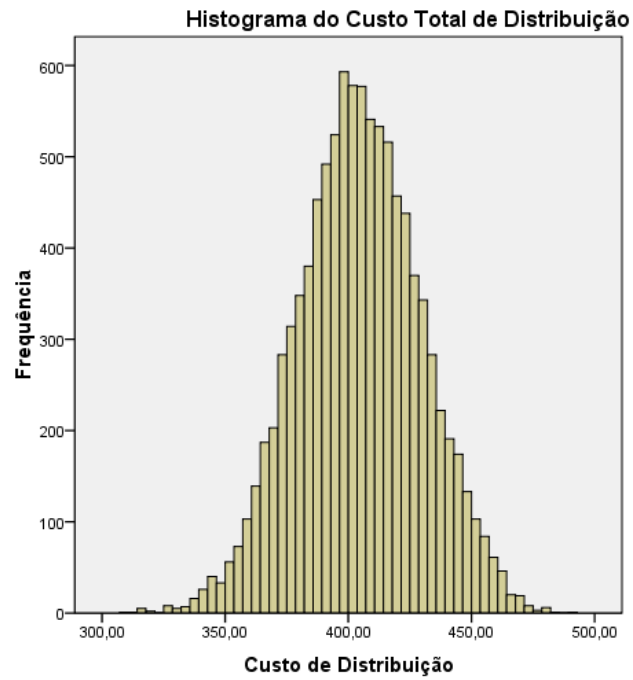


Figura 22 - Histograma do custo total de distribuição aos mercados.

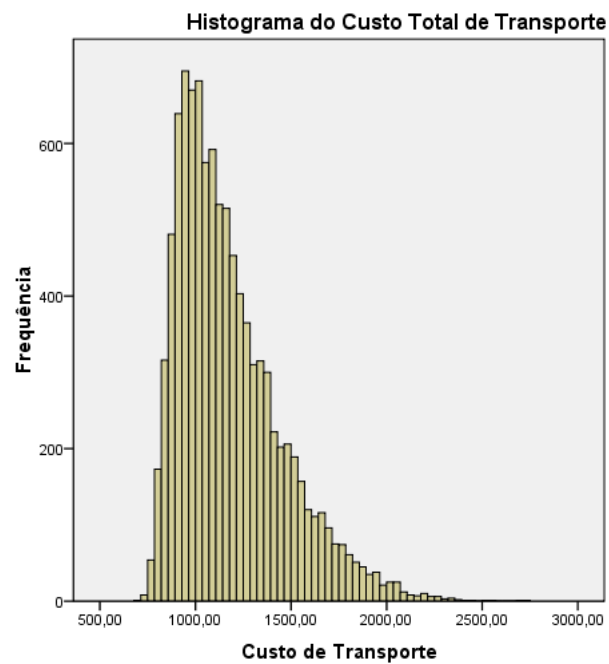


Figura 23 - Histograma do custo total transporte (ressuprimento e distribuição).

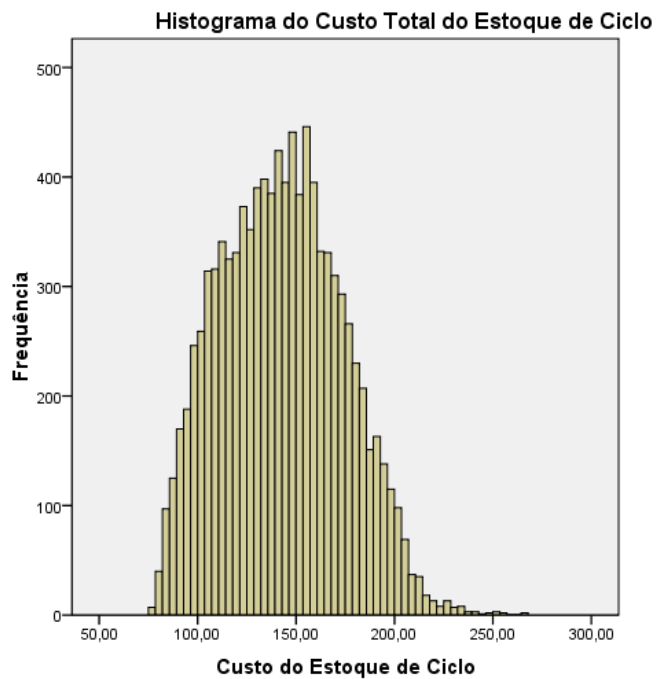


Figura 24 - Histograma do custo do estoque de ciclo.

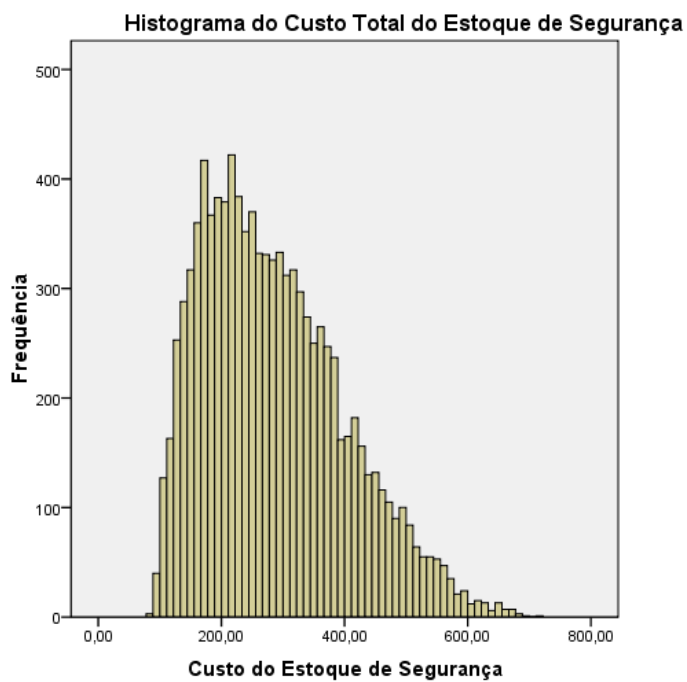


Figura 25 - Histograma do custo do estoque de segurança.

Livros Grátis

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

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

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

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

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