

# 1 Introdução

No mundo atual, com uma maior abertura dos mercados nacionais e uma concorrência cada vez mais global, torna-se extremamente importante uma visão mais integrada, holística na gestão da cadeia logística de suprimentos, a fim de agregar o máximo de valor ao produto até chegar ao cliente final, minimizando os riscos e incertezas inerentes ao processo.

Nos últimos anos, esta visão integrada da cadeia logística de suprimentos tem sido bastante disseminada. Sistemas de informação são utilizados pelas organizações para gerir melhor suas redes logísticas, a fim de ter um maior controle sobre os produtos que fluem pelas redes em que as organizações estão inseridas.

Segundo Christopher (1997), uma forma de gerar uma economia significativa (redução de custo, compressão do tempo e melhoria do serviço ao cliente) é planejar a rede logística de forma que o seu desempenho seja o melhor possível, criando, assim, uma vantagem competitiva em relação às redes logísticas de seus concorrentes. Segundo Simchi-Levi et al. (2003, p.30) em 1997, as empresas americanas gastaram cerca de 10% do Produto Interno Bruto (PIB) em atividades relacionadas com suprimentos. Dependendo do setor abordado, este valor pode exceder em muito.

Portanto, é necessário configurar a rede logística e otimizá-la conforme o cenário que se quer avaliar. Após terem sido coletadas as informações necessárias para o planejamento da rede, a análise para encontrar a melhor configuração da rede é muito complexa. Este tipo de problema costuma ser geralmente abordado por modelagem matemática e pelo uso de computadores.

Dependendo do formato da rede e do escopo do problema que estiver sendo analisado, pode ser usado um determinado modelo particular. Um caso específico, mas muito comum, é quando a rede é composta por vários tipos de instalações (fornecedores, fábricas, centros de distribuição e clientes) e a capacidade de

fornecimento é limitada para os vários tipos de produtos que fluem na rede (Daskin, Snyder e Berger, 2005).

## 1.1 Motivação e Contribuição do Estudo

Garey e Johnson (1979) definem que quando os valores dos fluxos dos produtos e suas capacidades de fornecimento possuem valores inteiros, o tipo de problema é de difícil solução, pois está dentro de uma classe denominada NP-Completo. Caso a rede seja complexa, do tipo multi-fluxo inteiro com muitos produtos fluindo entre fornecedores, plantas, armazéns e mercados de forma que a combinação de opções de fluxo seja extremamente grande, é possível que o algoritmo não forneça uma solução ótima em um intervalo de tempo razoável.

Uma série de modelos matemáticos foi desenvolvida na década de 60, entre os quais, aqueles que abordavam problemas estáticos de localização de instalações sem restrição de capacidade. Um das formulações precursoras foi a que tratava do problema de localização de uma única fábrica abordada por Kuehn e Hamburger (1963) e Belinski (1965) *apud* Galvão (1993). Os modelos formulados, a partir desta época, tornaram-se cada vez mais abrangentes e complexos, a ponto de incluir em cada novo estudo, novas abordagens de problemas existentes com a inclusão, ao longo do tempo, de variáveis pertinentes ao sistema e que afetam a tomada de decisão. Para que os modelos possam representar melhor o sistema abordado, têm sido desenvolvidos e aperfeiçoados novos algoritmos, permitindo a convergência mais rápida para uma solução, seja ela a solução ótima global ou não.

O desafio, portanto, das modelagens atuais e futuras, é incorporar um maior número de variáveis de decisão aos modelos, a fim de que se possa avaliar o impacto de umas sobre as outras, de forma integrada e flexível. Como exemplo, pode-se citar decisões de localização de armazéns, que, pela análise de “trade-off”, impactariam os custos de transporte e armazenagem, pois quanto maior o número de armazéns cobrindo o mercado menor é o custo de transporte e maior é o custo fixo de instalações e de manutenção de estoques (armazenagem).

Em trabalho recente realizado por Melo, Nickel e Saldanha da Gama (2008) foi feita uma revisão dos trabalhos publicados sobre localização de instalações no contexto de gerenciamento de cadeias de suprimento da última década. Neste trabalho, considerou-se a existência de uma classificação da estrutura de apresentação de cadeias de suprimentos, focando principalmente o número de produtos, a natureza do horizonte de planejamento (um ou vários períodos) e o tipo de dados do problema (determinístico ou estocástico). Esta classificação é apresentada na Tabela 1, onde se pode ter uma idéia do número de trabalhos publicados que atendem a classificação definida<sup>1</sup>.

De acordo com a classificação da Tabela 1, pode-se afirmar que o presente trabalho propõe uma nova formulação para o problema de projeto de redes logísticas, de forma que seja integrado e flexível, abrangendo três camadas, perpassando por fábricas e armazéns até o cliente final. O problema é definido para um único período de localização de múltiplos tipos, considerando multi-produtos com composição diferenciada de matérias-primas, capacidade de instalação e de modo de transporte com custos fixos e variáveis de localização e alocação. Segundo Melo, Nickel e Saldanha da Gama (2008), a literatura classifica o tipo de modelo de acordo com a sua abrangência em relação às decisões típicas da cadeia de suprimentos, como capacidade, estoques, compras, produção, roteirização e a escolha de modos de transportes.

A capacidade por exemplo, diz respeito ao tamanho de capacidade que uma instalação potencial deve ter para ser incluída na rede, e não na escolha de uma instalação baseada em sua capacidade fixa. A decisão, que é usualmente e fortemente associada com decisões de capacidade, diz respeito à escolha de equipamento e/ou tecnologia, que de fato, impacta em sua extensão de fornecimento, produção ou armazenamento. Isso pode ser observado nos trabalhos de Dogan e Goetschalckx (1999), Ulstein, *et al.* (2006) e Verter e Dasci (2002) *apud* Melo, Nickel e Saldanha da Gama (2008).

Estoques, como variável de decisão, pode ser interpretada como determinar os pontos de estocagem e o nível de manutenção de estoque em cada um desses pontos, associada às decisões de localização. Os trabalhos de Daskin, Snyder e

---

<sup>1</sup> A relação dos trabalhos identificados na Tabela 3, podem ser consultados no Anexo 1.

Berger (2005) e Daskin, Coullard e Shen (2002) *apud* Melo, Nickel e Saldanha da Gama (2008)

Compras reflete qualquer decisão referente a escolha do produto de um fornecedor, ou seja, além de definir qual produto é adquirido, o modelo deve definir quem o fornece. Dos trabalhos que abordam a variável de decisão compras atrelada a decisão de localização de instalações está o de Cordeau, Pasin e Solomon (2006) e o de Wilhem et al. (2005).

Produção, roteirização e modos de transportes, como variáveis de decisão, referem-se respectivamente a escolha de qual instalação deve produzir um determinado produto, qual rota deve ser feita para entrega desses produtos e qual o melhor modo de transporte para sua entrega.

O modelo a ser proposto é o resultado dos trabalhos de Cordeau, Pasin e Solomon (2006) e de Miranda e Garrido (2004), que recomendam respectivamente estudos futuros com a inclusão de demanda estocástica e o desenvolvimento de modelos mais complexos.

No mesmo trabalho de Melo, Nickel e Saldanha da Gama (2008), foram catalogados os trabalhos publicados na última década conforme as variáveis de decisão abordadas em cada um. Neste levantamento as variáveis foram agrupadas em variáveis de capacidades, estoques, aquisição, produção, roteirização e modos de transportes. Os trabalhos e suas variáveis de decisão abordadas podem ser vistas na Tabela 2.

Tabela 1 – Identificação dos trabalhos publicados com relação à estrutura da cadeia de suprimentos, considerando o número de mercadorias, horizonte de planejamento e os tipos de dados do modelo.

			Um único período		Múltiplos períodos	
			Determinístico	Estocástico	Determinístico	Estocástico
Uma camada	Localização em uma camada	Um único produto	[52] [56] [59] [61] [70]	[12] [32] [51] [53] [55]	[34] [39]	
		Múltiplos produtos	[11] [38] [64]		[18] [21] [62]	
Duas camadas	Localização em uma camada	Um único produto	[2] [10] [16] [17] [35] [36] [45] [50] [67]	[14] [22] [29] [40] [41] [54] [63]		[1]
		Múltiplos produtos	[25] [65] [69]		[9]	
	Localização em duas camadas	Um único produto	[28]			
		Múltiplos produtos	[5] [24] [27] [44] [58]	[19]	[20] [57] [66]	
Maior ou igual a três camadas	Localização em uma camada	Um único produto	[42]			
		Múltiplos produtos	[15]			
	Localização em duas camadas	Um único produto	[3] [8] [33]			
		Múltiplos produtos	[23] [30]	[32] [46]	[26]	
	Localização em três ou mais camadas	Um único produto			[4] [60]	
		Múltiplos produtos	[13] [43] [47] [68] [71]	[48] [49]	[37]	

Fonte: Adaptado de Melo, Nickel e Saldanha da Gama (pp. 4, 2008).

Voltando ao modelo proposto e comparando com a classificação da Tabela 2, afirma-se que a formulação a ser proposta neste trabalho aborda decisões de estoques, compras, produção e escolha de modos de transporte. Comparando o modelo a ser proposto com os trabalhos publicados e relacionados pela classificação feita pelos mesmos autores referidos anteriormente, somente cerca de cinco trabalhos conseguem abranger três e quatro tipos de decisões típicas da cadeia de suprimentos.

Dentre aqueles trabalhos que abordam três tipos de decisões estão o de Guillén et al. (2005) e o de Vila et al. (2006) apud Melo, Nickel e Saldanha da Gama (2008), que abordam decisões de capacidade, estoques e produção. O de Jang et al. (2002) apud Melo, Nickel e Saldanha da Gama (2008) e o de Cordeau, Pasin e Solomon (2006) com decisões referentes a compras, produção e modos de transporte.

Somente dois trabalhos consideram quatro tipos de decisões: os de Wilhelm et al. (2005) que aborda decisões de estoques, compras, produção e modos de transporte, e o de Melo, Nickel e Saldanha (2006), com decisões de capacidade,

estoques, compras e produção. Os dois trabalhos desenvolvem modelos dinâmicos de programação inteira mista (MIP) de cadeias de suprimento.

O modelo a ser desenvolvido ao final deste trabalho considera às variáveis de decisão de cadeias de suprimento da literatura, considerando o levantamento bibliográfico feito por Melo e Nickel (2008). A partir disso, pode-se afirmar que ele é original e contribui por abordar quatro tipos de decisões, como o modelo proposto por Wilhelm et al. (2005), sendo que neste caso o modelo é para um único período e de programação não linear inteira mista (MILP).

Além de ser baseado nos trabalhos de Cordeau, Pasin e Solomon (2006) e de Miranda e Garrido (2004), o modelo a ser proposto inova também por abordar questões relacionadas à classificação ABC do produto. Dependendo da classificação que o produto pertence, é definida uma disponibilidade (nível de serviço) em função da classe pertencente a cada produto para os clientes atendidos, a quantidade de estoque de segurança e, portanto, os custos de armazenagem podem aumentar consideravelmente.

No modelo a ser proposto em questão, os produtos distribuídos a partir dos armazéns terão sua classificação em produtos *A*, *B* e *C*, cada um com uma disponibilidade diferente, ou seja, quanto maior a classificação do produto ( $A > B > C$ ), maior a sua disponibilidade. Isto vai refletir na quantidade estocada de cada item em cada armazém, bem como nos custos atrelados ao mesmo. A vantagem da classificação ABC é dar maior robustez a capacidade de atendimento daqueles produtos que geram maior lucratividade a empresa.

Tabela 2 – Decisões de Redes Logísticas baseadas em decisões de localização e alocação<sup>2</sup>

Artigo	Capacidade	Estoques	Compras	Produção	Roteamento	Modos de Transporte
Aghezzaf (2005) [1]	√	√				
Aksen and Altinkemer (2008) [2]					√	
Ambrosino and Scutellá (2005) [4]		√			√	
Amiri (2006) [5]	√					
Avittathur et al. (2005) [6]		√				
Barahona and Jensen (1998) [7]		√				
Carlsson and Rönnqvist (2005) [10]						√
Chakravarty (2005) [11]				√		
Chan et al. (2001) [12]					√	
Cordeau et al. (2006) [13]			√	√		√
Daskin et al. (2002) [14]		√				
Dogan and Goetschalckx (1999) [15]		√		√		
Erlebacher and Meller (2000) [16]		√				
Eskigun et al. (2005) [17]						√
Fleischmann et al. (2006) [18]	√			√		
Guillén et al. (2005) [19]	√	√		√		
Hinojosa et al. (2008) [20]		√	√			
Hugo and Pistikopoulos [2005] [21]	√			√		
Hwang (2002) [22]					√	
Jang et al. (2002) [23]		√	√	√		
Jayaraman and Pirkul (2001) [24]				√		
Jayaraman et al. (1999) [25]		√		√		
Ko and Evans (2007) [26]	√					
Kouvelis and Rosenblatt (2002) [27]	√					
Levén and Segerstedt (2004) [28]	√	√				
Lieckens and Vandaele (2007) [29]	√	√				
Lin et al. (2006) [30]		√				
Lowe et al. (2002) [32]	√			√		
Ma and Davidrajuh (2005) [33]		√			√	
Melachrinoudis and Min (2000) [34]	√					
Melachrinoudis and Min (2007) [35]				√		
Melachrinoudis et al. (2005) [36]	√			√		
Melo et al. (2006) [37]	√	√	√	√		
Min and Melachrinoudis (1999) [38]		√				
Min et al. (2006) [39]		√				
Miranda and Garrido (2004) [40]		√				
Miranda and Garrido (2008) [41]		√				
Nozick and Turnquist (1998) [42]		√				
Pirkul and Jayaraman (1998) [44]				√		
Romeijn et al. (2007) [45]		√				
Sabri and Beamon (2000) [46]				√		
Schultmann et al. (2003) [50]	√					
Shen and Qi (2007) [51]		√				
Shen (2006) [52]		√				
Shen et al. (2003) [53]		√				
Shu et al. (2005) [54]		√				
Snyder et al. (2007) [55]		√				
Sourirajan et al. (2007) [56]		√				
Srivastava (2008) [57]	√					
Syam (2002) [58]		√				
Teo and Shu (2004) [59]		√	√			
Tuzun and Burke (1998) [61]					√	
Ulstein et al. (2006) [62]	√					
Van Ommeren et al. (2006) [63]	√	√				
Verter and Dasci (2002) [64]				√		
Vila et al. (2006) [66]	√	√		√		
Wang et al. (2007) [67]		√				
Wilhelm et al. (2005) [68]		√	√	√		√
Wouda et al. (2002) [69]				√		
Wu et al. (2002) [70]					√	
Yan et al. (2003) [71]			√	√		

FONTE: Adaptado de Melo, Nickel e Saldanha da Gama (2008)

<sup>2</sup> As referências bibliográficas dos trabalhos contidos na Tabela 2 encontram-se no anexo 1.

## 1.2 Objetivos e Delimitação do Estudo

O presente trabalho tem por objetivo propor uma formulação matemática para o problema de projeto de redes logísticas que seja integrado e flexível de modo a abranger desde o fornecedor até o consumidor final, perpassando por fábricas e armazéns, com a inclusão de restrições referentes à capacidade das instalações, produção, modo de transportes e estoques.

Dentre os objetivos específicos do trabalho estão:

- Desenvolver uma formulação matemática que represente um sistema logístico mais próximo do real, que abrange questões relacionadas à capacidade de instalações, modos de transporte, estoques, manufatura e custos fixos e variáveis relacionados aos mesmos, bem como aos produtos envolvidos;
- Implementar um algoritmo, a fim de que possa resolver uma categoria de problemas de configuração de redes logísticas como os descritos anteriormente;
- Avaliar o desempenho do algoritmo para diversas instâncias, que representem vários cenários definidos a priori.

A relevância deste trabalho está no modelo a ser desenvolvido, pois trata de um modelo de localização-alocação de instalações em três níveis (localização de fornecedores, plantas e armazéns) conjuntamente ou não, com alocação dos produtos respectivos a cada instalação designada em cada nível. Considera, ainda, alternativa de transportes entre cada par origem destino e custos de estoques envolvidos na alocação dos produtos nos armazéns. A análise de forma integrada de variáveis de decisão relacionadas a compras (seleção de fornecedores), produção, alternativas (modos) de transportes e estoques para um modelo formulado para um único período torna esse trabalho relevante (Melo, Nickel e Saldanha da Gama, 2008), contribuindo, portanto para o desenvolvimento do tema estudado.

Para atender ao desenvolvimento do estudo proposto, este trabalho está dividido em cinco capítulos. Neste primeiro capítulo é situado o problema a ser



proposto, dissertando, portanto, a importância do estudo, seus objetivos, delimitação e organização. No segundo capítulo é feita uma revisão da literatura sobre modelagem de cadeias de suprimentos e de estoques. Na seção de modelagem matemática de redes logísticas são apresentados os trabalhos que serviram de base para este estudo. No terceiro capítulo é apresentado o modelo proposto, mostrando a sua pertinência e originalidade. No quarto capítulo, o algoritmo de resolução do modelo proposto é apresentado e testado para diversas instâncias a serem contextualizadas. No quinto e último capítulo são feitas as considerações finais do trabalho realizado, bem como, contribuições e pesquisas futuras que podem ser desenvolvidas a partir deste estudo.

### **1.3 Organização do Estudo**

Com finalidade de alcançar os objetivos desta tese, são identificadas as seguintes etapas relevantes para este trabalho.

1. Desenhar esquematicamente a rede logística que se quer modelar, com as relações entre instalações, suas capacidades, restrições e custos fixos e variáveis, bem como lista de produtos finais e suas composições respectivas (compostos por insumos);
2. Criar um banco de dados com informações que fazem parte do modelo;
3. Gerar uma matriz de origem/destino para as instalações com suas distâncias respectivas;
4. Traduzir as informações coletadas em um problema matemático de Programação Não Linear Inteira Mista no software AIMMS;
5. Gerar alguns cenários para testar o modelo proposto, bem como o método de resolução;
6. Validar a solução do modelo;

7. Verificar os indicadores de desempenho (consumo de tempo, memória, etc.);
8. Estudar melhorias para aumentar a velocidade, utilizando para isso os indicadores supracitados;
9. Aplicar melhorias e testar o algoritmo de resolução para algumas instâncias reais, a fim de verificar o seu desempenho.
10. Definir sugestões para novas pesquisas.

Além disso, é necessário um aporte dos seguintes recursos:

- O Software AIMMS 3.8 para modelar e resolver o problema original;
- CPLEX 11.0 interligado ao AIMMS, com o intuito de determinar soluções de subproblemas de programação linear inteiro;
- O MINOS interligado ao AIMMS com a finalidade de determinar soluções dos subproblemas de programação não linear gerados;
- Desenvolver a rede logística a ser modelada usando alguns dados utilizados na dissertação de mestrado de Monteiro (2002), como localização das instalações, fretes, demanda, etc.