

PROPOSTA DE UMA SISTEMÁTICA DE ANÁLISE PARA A LOCALIZAÇÃO DE DEPÓSITOS

Renata Albergaria de Mello Bandeira

Luis Antonio Lindau

Francisco José Kliemann

Laboratório de Sistemas de Transportes - LASTRAN

Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção - PPGE

Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS

RESUMO

Este trabalho trata de um problema de modelagem de redes de distribuição, que consiste em determinar a quantidade e a localização de centros de distribuição, bem como o estabelecimento da capacidade nominal, alocação de clientes e de fornecedores e determinação de quais famílias de produtos devem ser estocadas em cada depósito, de forma a minimizar a soma dos custos de armazenagem e de transporte. É exposta uma sistemática de análise para a localização de depósitos, onde são listadas as principais etapas a serem seguidas. Ainda, são apresentados dois modelos estratégicos, baseados em técnicas matemáticas distintas, que são aplicados à localização de multi-depósitos em uma cadeia com multi-produtos. São propostos um algoritmo de otimização, baseado em programação linear inteira-mista, e um modelo de localização no plano aplicado a múltiplas instalações, capazes de analisar toda a cadeia logística.

ABSTRACT

This paper deals with the problem of modeling a distribution network that comprises selecting the quantity and location of warehouses, as well as determining their capacities and setting the transportation flow between facilities, either from plants to warehouse or warehouse to retailer, as to minimize the total inventory and transportation costs. It introduces a methodological framework that presents the main stages to be followed in location analysis. Two strategic models, based on distinct mathematical techniques are proposed as tools to optimize the configuration of the logistics network in a multi-product and multi-warehouse chain. The paper also proposes an optimization algorithm based on mixed-integer linear programming and a model for plan location applied to multi-plans capable of analyzing the whole logistics chain.

1. INTRODUÇÃO

A economia mundial está sofrendo grandes transformações devido à globalização. Para sobreviver à nova ordem econômica, as empresas precisam adaptar-se à atual realidade, na qual o sucesso de uma organização individual está relacionado com sua habilidade em competir, desempenhando diferentes papéis nas cadeias de suprimentos dinâmicas. Assim, o gerenciamento da cadeia de suprimentos tornou-se uma iniciativa estratégica para as organizações que pretendem aumentar seu potencial competitivo (Ching, 1999).

O desempenho das atividades de suprimentos e de distribuição depende da otimização da rede logística, que é alcançada através da análise estratégica da localização das instalações. Uma vez definida a quantidade e posicionamento das instalações em uma rede logística, toda a operação de transporte e distribuição dos produtos estará condicionada a esta configuração. Desta forma, as decisões sobre instalações influenciam o desempenho e eficiência da cadeia de suprimentos, a rentabilidade da empresa e definem a estrutura física do sistema logístico.

Muitas pesquisas acadêmicas têm sido desenvolvidas para a otimização do processo logístico da cadeia de suprimentos, com o objetivo de alcançar a performance desejada por meio da minimização de custos e do atendimento dos níveis de serviço desejados (Sabri e Beamon, 2000). No entanto, este é um processo complexo que enfrenta uma série de desafios. O principal problema associado ao desempenho da cadeia se refere ao *trade off* entre os níveis de serviços e o custo logístico total (Ludwig, 2002). Dentre o conjunto de decisões que

influenciam a configuração e o desempenho da cadeia de suprimentos, a localização de depósitos ocupa uma posição relevante, uma vez que limita os custos e os níveis de serviços a serem alcançados e envolve altos investimentos.

A estratégia da localização de instalações é uma das responsabilidades básicas da gerência de logística, sendo que, entre as decisões de localização, aquelas referentes aos depósitos são as mais frequentes (Bowersox e Closs, 2001). O objetivo deste trabalho é fornecer uma ferramenta que auxilie os gerentes de logística a solucionar as principais questões envolvidas na análise da localização de depósitos, tais como: (i) determinação do número adequado de depósitos; (ii) escolha da localização de cada depósito; (iii) determinação do tamanho e estrutura requerida para cada depósito; (iv) estabelecimento da capacidade nominal de cada depósito; e (v) alocação dos clientes e fábricas a cada um dos diferentes depósitos. Para isto, serão analisadas as técnicas matemáticas referenciadas na literatura, e proposta uma sistemática de análise para o problema da localização de depósitos. Serão apresentados dois modelos para a localização de depósitos em cadeias logísticas, sendo que cada modelo foi desenvolvido com base em técnicas matemáticas distintas.

2. ESTRATÉGIA DA LOCALIZAÇÃO DE DEPÓSITOS

A fixação da quantidade de armazéns, sua localização e capacidade determinam os meios através dos quais os produtos chegam ao mercado, definindo a estrutura física do sistema logístico. Uma crença comum em diversos negócios, conhecida como o paradigma da presença local, é de que a empresa deve possuir muitos armazéns locais para oferecer níveis de serviços adequados (Bowersox e Closs, 2001). Em geral, o número de instalações a serem construídas é inversamente proporcional ao tempo de resposta desejado pelos clientes. Empresas cujos clientes necessitam de rapidez na resposta precisam estar perto deles, de modo que devem possuir seu estoque pulverizado em diversas instalações de pequena capacidade (Chopra e Meindl, 2003). Contudo, avanços nos serviços de transporte e na tecnologia da informação tornaram as datas de entrega mais confiáveis e previsíveis, possibilitaram a redução do tempo de transmissão e processamento de informações, além do monitoramento e rastreamento de carregamentos. Estes fatores, associados aos custos crescentes de estoques, têm contribuído para a redução do número necessário de armazéns e para a mudança de percepção do tradicional paradigma da presença local.

As decisões de localização de centros de distribuição são influenciadas por fatores macroeconômicos, políticos, estratégicos, tecnológicos, competitivos, logísticos, operacionais e de infra-estrutura (Chopra e Meindl, 2003). Hoffman (2005) afirma que, nos Estados Unidos, o custo de instalação de um depósito pode apresentar grande variabilidade de acordo com o local escolhido devido a diferenças no custo da mão-de-obra empregada na construção do empreendimento. Contudo, Gentry (2003) considera que a infra-estrutura de transporte e a disponibilidade de mão de obra são os fatores mais relevantes para o processo de localização de depósitos.

Muitas empresas têm desenvolvido estudos de localização de seus depósitos a fim de buscar maior competitividade, seja pelo aumento da eficiência na operação de sua cadeia logística ou pelo aumento do nível de serviço oferecido. Através da análise de sua estratégia de distribuição, a empresa National Semiconductor decidiu fechar seis de seus depósitos localizados em diferentes países e substituí-los por um único centro de distribuição em Singapura, a partir do qual seus produtos (*microchips*) seriam transportados pelo modal aéreo.

Com isto, a empresa reduziu seus custos de distribuição em 2,5%, diminuiu seu tempo de entrega em 47% e ampliou suas vendas em 34%, em um intervalo de dois anos (Simchi-Levi et al., 2000). Em um projeto semelhante, a LPC, fabricante de produtos Danone, reestruturou seu processo de distribuição, fechando depósitos e racionalizando rotas de armazenamento e entregas, de modo que conseguiu dobrar o volume comercializado, reduzir o custo com o transporte e o tempo médio de viagem e descarga no cliente (Ching, 1999).

Os altos custos envolvidos na abertura e fechamento de depósitos fazem com que a decisão de localização não seja facilmente reversível, de forma que a importância do processo de análise de localização torna-se crítico. Este tipo de análise visa determinar: (i) quantos centros de distribuição a empresa deve operar; (ii) onde eles devem estar localizados; (iii) quais clientes devem ser supridos por cada centro; (iv) quais fornecedores deverão atendê-lo; (v) que linhas de produto devem ser estocadas em cada centro, e (vi) qual deve ser a capacidade de cada depósito. Em um estudo de localização de depósitos, busca-se minimizar o custo logístico total para um determinado nível de serviço. Contudo, é importante ressaltar que existem outras estratégias disponíveis para a localização de depósitos. Segundo Bowersox e Closs (2001), são três as principais estratégias alternativas: maximização do serviço, maximização da vantagem competitiva e alocação mínima de ativos. Neste trabalho será dada maior ênfase para a estratégia de menor custo.

3. SISTEMÁTICA PARA A LOCALIZAÇÃO DE DEPÓSITOS

A seguir são apresentadas as principais etapas que devem ser seguidas em um projeto de localização de depósitos. Este método baseia-se no esquema proposto por Plunkett (2003) e procura em doze passos apresentar uma sistemática para guiar a análise de localização.

1. **Identificação do Problema:** Deve-se entender o problema e seu escopo de forma detalhada. É preciso levantar qual a rede logística atual, as instalações existentes e o fluxo de produtos. O problema deve ser analisado e estruturado de modo que possa definir os objetivos do estudo e as restrições básicas deste processo.
2. **Definição da Equipe Envolvida no Projeto:** A equipe deve ser formada por membros que tenham um conhecimento extensivo do negócio e que estejam altamente motivados e envolvidos no projeto. Os membros escolhidos devem ter experiência na área ou então devem ser guiados por um especialista no assunto. A equipe deve ter acesso a todos os dados necessários, além de ter poder para realizar as decisões necessárias.
3. **Coleta de Dados:** Esta etapa pode ocorrer simultaneamente com os passos 4 e 6. Haverá a necessidade de coleta de dados numéricos e qualitativos, sendo que a maior parte destes dados podem ser obtida nos registros da própria empresa. Em geral, é necessária uma investigação trabalhosa para coletá-los, pois, na maioria das empresas, estes dados não são estruturados, já que não existem sistemas de informação voltados para sua geração (Lacerda, 2004).
4. **Agregação de dados:** Devido ao grande volume de dados envolvidos, é necessário o processo de agregação de dados sobre produtos, mercados, fornecedores, suposições de custos e performance. Clientes e mercados são frequentemente agregados por local e tipo, tamanho, frequência dos pedidos, taxas de crescimento e serviços logísticos especiais (Bowersox e Closs, 2001). Os produtos são agregados em famílias, de acordo com sua semelhança, características de distribuição, locais de produção e canais de distribuição similares. Outro dado indispensável para este tipo de análise são os fretes de suprimentos

e de entregas de mercadorias, que devem ser estabelecidos para cada volume de carga e para cada modalidade de transporte entre centros de distribuição e mercados.

5. Tabulação de dados: A tabulação dos dados a serem utilizados na análise deve ser realizada com extremo cuidado, de forma a permitir a identificação de eventuais erros.
6. Escolha da Técnica de Solução: A escolha de uma técnica matemática como auxiliar no estudo de localização deve ser efetuada com base nos objetivos estipulados para o processo de análise, considerando-se as diversas restrições pertinentes (Leal, 1995). Deve-se analisar cuidadosamente a relação custo-benefício entre os métodos. De acordo com a precisão desejada, com as características da rede e com a análise a ser realizada (estática ou dinâmica), podem ser empregadas técnicas analíticas, de otimização, heurísticas ou de simulação. Segundo Simchi-Levi et al. (2000), para casos em que a dinâmica do sistema não é fundamental, devem ser utilizadas técnicas de otimização para modelar a cadeia logística. Os autores afirmam que, para quase todos os problemas de localização de depósitos, a programação linear inteira é a ferramenta mais indicada e que a heurística é utilizada tipicamente para casos que apresentem uma cadeia logística complexa. Ballou (2001) indica a simulação como método de escolha quando há elementos estocásticos no problema ou quando a descrição complexa da rede é essencial. O autor afirma que esta é a segunda técnica quantitativa mais usada para a análise de localização.
7. Escolha dos Potenciais Pontos de Localização de Depósitos: Antes de iniciar a modelagem, é necessária a escolha de potenciais pontos para a localização de depósitos, com base na rede existente, nos objetivos do estudo e em características qualitativas. Nesta etapa, podem ser utilizados modelos heurísticos ou metodologias de análise qualitativa. Uma metodologia qualitativa que normalmente é utilizada nesta etapa baseia-se no método *Delphi*, onde, em reuniões com especialistas, levanta-se uma lista de pontos a serem analisados e os principais atributos considerados. Em seguida, são atribuídos pesos a cada um destes fatores de acordo com sua importância. Os especialistas atribuem, então, notas a cada um destes atributos para todos os pontos levantados. Aqueles que obtiverem a melhor nota serão avaliados posteriormente por métodos quantitativos.
8. Construção do Modelo: Com base na escolha realizada na etapa 6, passa-se ao desenvolvimento do modelo que será a ferramenta para a análise da localização de depósitos. Caso a equipe envolvida no projeto opte pela utilização de um aplicativo comercial, esta etapa deverá ser substituída pela análise das ferramentas oferecidas no mercado e escolha de um *software* para a aplicação.
9. Calibração e Validação do Modelo: Tanto os modelos desenvolvidos quanto os *softwares* comerciais aplicados devem ser validados para verificar se os resultados correspondem satisfatoriamente à realidade. O processo de validação de um modelo se baseia na reconstrução da configuração atual da rede logística, de modo que seja possível a comparação entre o resultado da análise e os dados reais coletados. Esta etapa consiste na revisão das suposições e simplificações adotadas, identificação de eventuais erros na tabulação de dados ou no design do fluxo da cadeia (Simchi-Levi et al., 2000).
10. Análise de Sensibilidade e de Cenários: Antes de proceder com a aplicação do modelo ao caso estudado, devem ser definidos os experimentos e cenários que permitem avaliar a sensibilidade dos resultados gerados a mudanças nos diversos parâmetros de custos e volume considerados (Leal, 1995). A análise de sensibilidade é essencial devido ao comportamento dinâmico do mercado e das práticas operacionais das empresas.
11. Implementação: Durante a implantação do modelo, deve-se certificar de que as soluções encontradas serão aceitas pela alta administração da empresa e pelos demais funcionários.

- Em um projeto de re-estruturação da cadeia logística, a equipe envolvida pode encontrar barreiras organizacionais e culturais devido ao possível fechamento de antigas instalações.
12. **Análise dos resultados:** Os resultados devem ser minuciosamente analisados para evitar possíveis erros. Estes devem ser estruturados em forma de um relatório objetivo que apresente as principais suposições e simplificações assumidas e o relato do processo de coleta de dados e as dificuldades encontradas nesta etapa. O processo de agregação de dados e a escolha de cenários também devem ser explicados. Ainda, devem ser expostos os riscos envolvidos na análise de sensibilidade e as comparações entre as diferentes situações com o *status quo*.

4. MODELAGEM

A literatura reporta diversos artigos sobre o problema da localização e a modelagem de redes de distribuição, tais como Ballou (2001), Brandeau e Chiu (1989), Crainic e Laporte (1997), Jayraman (1998) e Tragantalerngsak et al. (2000). Contudo, um grande inconveniente encontrado na maioria destes estudos é que eles limitam a quantidade de depósitos a serem abertos a um número pré-fixado. Ainda, os níveis de capacidade para cada ponto potencial de localização são limitados a apenas um. O foco deste trabalho é apresentar o desenvolvimento de dois modelos estratégicos para a localização de depósitos à cadeia de suprimentos, baseados em diferentes técnicas matemáticas, nos quais os obstáculos citados serão superados, tratando assim o problema de localização de forma mais realista. Em uma fase posterior, a presente metodologia será aplicada a um estudo de caso no setor de suprimento industrial, de modo a permitir uma efetiva comparação entre as ferramentas propostas, através da análise dos resultados obtidos, e a estabelecer maiores conclusões em relação à sua eficiência, precisão, praticidade e aplicabilidade.

Optou-se por desenvolver um modelo de otimização, com base na programação linear inteira-mista, e um modelo de localização no plano aplicado a múltiplas instalações. Justifica-se a escolha pelo modelo de otimização devido a sua capacidade de garantir uma solução ótima para o problema de localização. Entre os modelos comerciais de localização, a abordagem da programação linear inteira é a metodologia mais utilizada (Ballou, 2001). As principais vantagens dos modelos de otimização de redes por programação linear inteira são a rapidez do tempo de solução e a melhora da capacidade dos custos fixos e variáveis para as instalações (Bowersox e Closs, 2001). Ainda, com a aplicação de decomposição às técnicas de resolução de programação linear inteira-mista, é possível a inclusão de múltiplas *commodities* no projeto do sistema logístico e a localização de múltiplos depósitos.

Por sua vez, o modelo de localização no plano necessita de uma quantidade menor de informações e apresenta uma eficiência computacional satisfatória mesmo pra problemas de grandes dimensões, que analisem toda a cadeia logística. Segundo Leal (1995), o baixo custo destes modelos em relação àqueles que tratam de conjuntos discretos para a localização tem determinado a sua ampla utilização na análise de problemas reais. Este modelo é capaz de determinar a localização de vários depósitos, contudo sua aplicação não garante que a solução encontrada seja a ótima global, como ocorre com a ferramenta de otimização. A escolha pela aplicação de um destes modelos para a análise de localização varia de acordo com a precisão necessária para os resultados, a disponibilidade de recursos financeiros e de tempo.

4.1 Modelo de Otimização

O objetivo deste modelo é determinar os locais de instalação de depósitos, de forma a se atender às diversas demandas, respeitando-se várias ofertas, e a minimizar os custos de transporte e implantação e operação de depósitos. O algoritmo proposto neste trabalho baseia-se na metodologia apresentada por Bramel e Simchi-Levi (1997) e por Amiri (2004).

A modelagem proposta por Bramel e Simchi-Levi (1997) é aplicada para a localização de multi-depósitos em uma cadeia com multi-commodities. Esta ferramenta analisa toda a cadeia logística, de modo que engloba o transporte de produtos da fábrica aos depósitos e destes às zonas de consumo, considerando o custo de transporte de cada produto em cada um destes percursos. A partir de uma lista de localizações potenciais para a instalação de depósitos, o algoritmo identifica quais depósitos deverão ser abertos para minimizar o custo total de transporte e de implantação e operação dos centros de distribuição. Contudo, o número de depósitos a serem instalados é pré-fixado. O modelo considera que o custo de instalação e operação de um depósito varia de acordo com sua localização e que cada zona de consumo pode ter sua demanda por determinado produto atendida apenas por um único depósito. Assim, as zonas de mercado podem ser abastecidas por diferentes centros de distribuição, porém cada centro fornecerá um produto distinto. Em relação ao abastecimento dos depósitos, estes podem ser realizados por diferentes fornecedores, inclusive para o mesmo produto.

No entanto, é importante ressaltar que o modelo proposto por Bramel e Simchi-Levi (1997) apresenta limitações quanto ao nível de capacidade para cada depósito e quanto ao número de depósitos a serem abertos. Conforme explicado, o número de depósitos a ser localizado por este algoritmo é pré-fixado por uma variável de entrada. Ainda, estabelece-se apenas uma capacidade (em volume) para cada depósito, ou seja, a análise limita-se a verificar se a instalação de um depósito com uma capacidade específica em um determinado local otimizará ou não a função-objetivo, de forma que um depósito com uma capacidade distinta naquele local poderia corresponder à outra solução ótima. Visando solucionar estas limitações, foram adotadas medidas propostas por Amiri (2004). O modelo apresentado por Amiri (2004) aplica-se a localização de múltiplas instalações, porém para uma única família de produtos. Este algoritmo baseia-se em considerações semelhantes às aquelas expostas por Bramel e Simchi-Levi (1997), porém não limita o número de instalações a serem localizadas e analisa a abertura de depósitos com diferentes capacidades em um mesmo local. Em seguida, serão expostas a modelagem adotada e as alterações feitas nos modelos originais.

4.1.1 Especificação do Modelo

O modelo a ser utilizado diz respeito à minimização de uma função-objetivo representativa dos custos considerados para a localização de centros de distribuição, sujeita a uma série de restrições físicas e comportamentais. O algoritmo desenvolvido é aplicado para a localização de multi-depósitos em uma cadeia com multi-produtos, sendo capaz de analisar toda a cadeia logística. A partir de uma lista de localizações potenciais para a instalação de depósitos, o algoritmo identifica a quantidade e quais depósitos deverão ser abertos de modo a minimizar o custo logístico total, analisando a abertura de depósitos com diferentes capacidades em um mesmo local. Considera-se o custo de transporte de cada produto dos pontos de fornecimento aos depósitos e destes às zonas de consumo, além do custo de instalação e operação de cada depósito variando de acordo com sua localização. Optou-se por restringir o abastecimento da demanda de cada zona de consumo por determinado produto por um único depósito, uma vez que isto é o que geralmente ocorre nas cadeias de distribuição. Porém, o abastecimento dos

depósitos pode ser realizado por diferentes fornecedores, inclusive para o mesmo produto. As principais variáveis e parâmetros utilizados neste modelo respeitam a seguinte nomenclatura:

Tabela 1. Variáveis do Modelo de Otimização

Variáveis	Definições
i	Índice de zona de consumo, $i=1, \dots, I$
j	Índice do depósito, $j=1, \dots, J$
l	Índice do fornecedor ou fábrica, $l=1, \dots, L$
k	Índice do tipo de produto, $k=1, \dots, K$
r	Índice do nível de capacidade disponível para os depósitos, $r=1, \dots, R$
Variáveis de Entrada (Valores fixados)	
D_{ijk}	Custo unitário de transporte do produto k do depósito j para a zona de consumo
C_{ljk}	Custo unitário de transporte do produto k do fornecedor ou fábrica l para o
F_{rj}	Custos fixos para o depósito j com nível de capacidade r (\$/período)
w_{ik}	Demanda média por produto k na zona de consumo i (unid/período)
q_{rj}	Capacidade de armazenagem do depósito j com nível de capacidade r (m^3)
s_k	Volume unitário do produto k (m^3)
V_{lk}	Capacidade de produção do fornecedor l de produto k (unid/período)
Variáveis de Saída (variáveis de decisão)	
U_{ljk}	Quantidade de produto k transportado da fábrica l para o depósito j (unid)
Z	Custo total (\$/período)
Variáveis Binárias (variáveis de decisão)	
Y_{rj}	1, se o depósito j com capacidade r está aberto; zero, caso contrário
X_{jik}	1, se a zona de consumo i recebe o produto k do depósito j; zero, caso contrário

4.1.2 Função Objetivo

Na função-objetivo, representada pela equação 1, tem-se a função custo considerada para o problema de localização de depósitos. Ela minimiza o custo total (Z) da cadeia de suprimentos e é solucionada por programação linear inteira com relaxação lagrangeana.

$$Z = \sum_{l=1}^L \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K C_{ljk} U_{ljk} + \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K D_{jik} w_{ik} X_{jik} + \sum_{j=1}^J \sum_{r=1}^R F_{rj} Y_{rj} \quad (1)$$

Entre os custos que compõem o custo total da cadeia de suprimentos incluem-se os custos fixos e variáveis, divididos em três componentes: (i) custos de transporte entre o ponto de fornecimento e depósito; (ii) custos de transporte entre depósito e zona de consumo; e (iii) custo fixo e variável de instalação e operação de depósitos.

4.1.3 Restrições

As equações 2 a 8, apresentadas a seguir, representam as restrições deste modelo.

$$\sum_{j=1}^J X_{jik} = 1 \quad \forall i, \forall k \quad (2)$$

$$\sum_{i=1}^I \sum_{k=1}^K s_k w_{ik} X_{jik} \leq \sum_{r=1}^R q_{rj} Y_{rj} \quad \forall j \quad (3)$$

$$\sum_{r=1}^R Y_{rj} \leq 1 \quad \forall j \quad (4)$$

$$\sum_{i=1}^I w_{ik} X_{jik} \leq \sum_{l=1}^L U_{ljk} \quad \forall j, \forall k \quad (5)$$

$$\sum_{j=1}^J U_{ljk} \leq v_{lk} \quad \forall l, \forall k \quad (6)$$

$$\forall i, \forall j, \forall k \quad (7)$$

$$U_{ljk} \geq 0 \quad \forall l, \forall j, \forall k \quad (8)$$

A equação 2 restringe o abastecimento da demanda de cada zona de consumo por determinado produto a um único depósito. A restrição representada pela equação 3 garante que a demanda das zonas de consumo seja inferior à capacidade dos depósitos abertos, enquanto a equação 4 permite que no máximo um nível de capacidade seja atribuído a cada depósito. A equação 5 assegura que a demanda por um tipo de produto k atendida por determinado depósito não ultrapasse a quantidade de produtos k fornecidos a este depósito. A equação 6 garante que a quantidade de produtos k distribuída pelo ponto de fornecimento seja inferior à sua capacidade. As restrições representadas pelas equações 7 e 8 apresentam as variáveis binárias e positivas, respectivamente.

4.1.4 Implementação Computacional

O processo de implementação computacional foi realizado em linguagem de otimização GAMS - *General Algebraic Modeling System* (Brooke et al., 1998), juntamente com o solver XA, através de programação linear inteira-mista com relaxação lagrangeana.

4.2 Modelo de Localização no Plano Aplicado a Múltiplas Instalações e Múltiplas Commodities

O modelo de localização selecionado concentra-se na minimização do custo logístico total do sistema de distribuição, conforme representado na equação 9, sendo que os custos considerados englobam o custo de manutenção de depósitos, o custo de estoque e os custos de transporte entre pontos de fornecimento, depósitos e zonas de consumo. O algoritmo proposto baseia-se no modelo apresentado por Eilon, Watson-Gandy e Christofides (1971), que foi customizado por Leal (1995) para a aplicação na cadeia de distribuição da Companhia Brasileira de Petróleo Ipiranga, a fim de analisar a localização das bases de combustíveis no Estado de São Paulo.

$$CT = \sum_{i=1}^m (CV(v_i) + CF) + \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^m (t_1 + k_1) v_{1ij} d_{1ij} + \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (t_2 + k_2) v_{2ij} d_{2ij} + E(m) \quad (9)$$

em que k: número de fábricas;
m, n: número de depósitos;
n: número de clientes;
CV(v_i): custo variável de manutenção do depósito;
CF: custo fixo de manutenção do depósito;
t₁: custo de transporte por unidade de volume e distância entre fábricas e depósitos;
k₁, k₂: constantes proporcionais à velocidade do meio de transporte empregado para a transferência de produtos, e ao custo de oportunidade/obsolescência/perda de estoque por unidade de volume;
t₂: custo de transporte por unidade de volume e distância entre depósitos e clientes;
v_{1ij}: volume total de produtos transportados entre a fábrica i e o depósito j;
v_{2ij}: volume total de produtos transportados entre o depósito i e o cliente j;
d_{1ij}: distância entre a fábrica i e o depósito j;

d_{2ij} : distância entre o depósito i e o cliente j ;

$E(m)$: custo de estoque como função apenas do número m de depósitos do sistema;

Os pontos ideais para a localização dos depósitos são obtidos através da derivação parcial da equação 9 em relação às coordenadas do depósito (x_i e y_i). As formulações utilizadas para a determinação da localização ótima de depósitos são obtidas igualando as derivadas parciais a zero e resolvendo estas equações para x_i e y_i .

$$x_i = \frac{\left[\sum_{j=1}^K \left(\frac{(t_1 + k_1)v_{1ij}fx_j}{d_{1ji}} \right) + \sum_{j=1}^n \left(\frac{(t_2 + k_2)v_{2ij}cx_j}{d_{2ij}} \right) \right]}{\left[\sum_{j=1}^K \left(\frac{(t_1 + k_1)v_{1ij}}{d_{1ji}} \right) + \sum_{j=1}^n \left(\frac{(t_2 + k_2)v_{2ij}}{d_{2ij}} \right) \right]} \quad (10)$$

$$y_i = \frac{\left[\sum_{j=1}^K \left(\frac{(t_1 + k_1)v_{1ij}fy_j}{d_{1ji}} \right) + \sum_{j=1}^n \left(\frac{(t_2 + k_2)v_{2ij}cy_j}{d_{2ij}} \right) \right]}{\left[\sum_{j=1}^K \left(\frac{(t_1 + k_1)v_{1ij}}{d_{1ji}} \right) + \sum_{j=1}^n \left(\frac{(t_2 + k_2)v_{2ij}}{d_{2ij}} \right) \right]} \quad (11)$$

A partir de uma lista de localizações potenciais para a instalação de depósitos, utiliza-se o método iterativo para o cálculo das coordenadas da nova localização para os diversos depósitos. Inicialmente, aloca-se cada depósito à fábrica (ponto de suprimento) mais próxima e cada zona de consumo é alocada ao depósito de menor custo de suprimento, sendo considerados apenas os custos de transferência e de entrega. Calcula-se, então, um novo vetor de coordenadas para a localização de depósitos através das equações 10 e 11. Leal (1995) descreve que, a partir da segunda iteração, o critério de alocação dos clientes aos depósitos passa a considerar também os custos de operação de depósitos. Segundo o autor, o volume total transferido para cada depósito na iteração anterior é utilizado para calcular o custo marginal de operação, que somado ao custo marginal de suprimento de cada cliente constitui o novo critério de alocação. Em cada iteração, as coordenadas dos depósitos (x_i , y_i) são recalculadas até que nenhuma redução adicional no valor da função objetivo seja obtida.

A fim de determinar o número de depósitos para qual o custo logístico total será mínimo, o modelo desconsidera o depósito com menor volume de transferências e recalcula um novo vetor de coordenadas para a localização de depósitos através do método iterativo descrito. Em seguida, compara-se a função custo total da solução para $k-1$ depósitos à solução para k depósitos. Caso o custo para $k-1$ depósitos seja superior, tem-se que k é o número ótimo de depósitos e que o vetor de coordenadas obtidas para $n=k$ é a localização ideal dos depósitos. Em relação à eficácia do modelo, Leal (1995) ressalva que a função-objetivo é uma função convexa com diversos pontos de mínimo, de modo que a aplicação do modelo pode levar à seleção de um mínimo local, dependendo da localização inicial dos depósitos. Para evitar este problema, deve-se aplicar o modelo repetidas vezes com diferentes conjuntos iniciais. Ainda, o autor ressalta que o tamanho do conjunto inicial de pontos potenciais para a localização de depósitos deve ser no mínimo três vezes superior ao número ótimo de depósitos para que a solução convirja para o mínimo global do problema.

4.2.1 Especificação do Modelo

O algoritmo desenvolvido baseia-se nos modelos apresentados por Eilon, Watson-Gandy e Christofides (1971) e por Leal (1995). Porém, alterações foram necessárias para localizar multi-depósitos em uma cadeia com multi-produtos. O modelo original considerava o custo fixo de operação de depósitos como uma constante, independente do local onde o centro de distribuição fosse instalado. Apesar dos custos fixos de operação de depósitos, que incluem gastos com aluguel, depreciação, taxas e seguros, serem independentes do nível de atividade do depósito específico, este tende a variar de acordo com a localização do centro de distribuição, já que a valorização imobiliária, alíquotas de imposto e prêmios de seguro são diferentes entre regiões distintas. Por isto, adaptou-se o programa para que fossem consideradas estas diferenças regionais, permitindo a entrada de custos fixos de instalação distintos para cada local. Ainda, o modelo original era aplicado a uma única família de produtos. Foram necessárias alterações em seu algoritmo de modo a adaptá-lo para que o usuário pudesse entrar com as demandas por diferentes produtos das zonas de consumo. Desenvolveu-se, então, uma *procedure* que permite a leitura destes dados e os transforma em uma demanda equivalente em unidade de volume (m^3).

O programa desenvolvido busca, a partir de uma lista de pontos potenciais para a localização de depósitos, determinar o número e a localização dos centros de distribuição que minimizem o custo logístico total. Contudo, por não ser um modelo de otimização, este não garante que a solução encontrada seja o ponto de mínimo, podendo ser um mínimo local. Em síntese, o algoritmo proposto segue doze passos: (i) cálculo do número mínimo de depósitos para atender a demanda total dos clientes (razão entre demanda total dos clientes e a capacidade máxima dos depósitos); (ii) ordenação dos clientes (segundo maior demanda); (iii) alocação dos fornecedores a depósitos segundo menor distância; (iv) alocação dos clientes a depósitos segundo menor distância; (v) cálculo do custo inicial; (vi) processo iterativo para minimização; (vii) realocação de clientes e fornecedores a depósitos; (viii) cálculo dos custos da configuração; (ix) redução do número de depósitos; (x) repetição do processo iterativo, realocação dos clientes e fornecedores e cálculo dos custos logísticos totais; (xi) comparação entre os valores de custos logísticos; e (xii) determinação do número e localização dos depósitos com o menor custo logístico, de acordo com o critério de parada estabelecido.

4.2.2 Restrições

Os números de depósitos e de clientes no sistema estão restritos a 250 devido à capacidade da linguagem de programação utilizada. Ainda, o algoritmo apresenta restrições quanto ao critério de alocação de zonas de consumo aos depósitos. Cada zona de consumo deve ser alocada ao depósito com menor custo marginal total e que possua capacidade ociosa suficiente para atender a demanda da zona de consumo. Assim, os clientes são alocados por ordem de volume demandado. Contudo, esta restrição é em relação à capacidade do depósito para o volume equivalente (m^3), não sendo considerada uma capacidade distinta para os diferentes produtos. Além disto, não há restrições quanto à capacidade dos fornecedores, sendo considerado que estes têm capacidade infinita. Outra restrição estabelecida no algoritmo refere-se ao número ideal de instalações, que deve ser obtido através da comparação do custo ótimo para cada número fixo de depósitos dentro da faixa desejada. O modelo de solução é adaptado para prosseguir o processamento após o ponto mínimo, quando a curva passa a crescer com a redução do número de depósitos.

4.2.3 Implementação Computacional

O processo de implementação computacional foi realizado em linguagem de programação Turbo Pascal 7.0 com entradas e saídas sob forma de arquivo texto. Também foi incluída uma saída adicional no vídeo, com o número de iterações, de depósitos e o custo total, para facilitar o acompanhamento do processamento.

5. CONCLUSÕES

Este trabalho procurou apresentar uma sistemática de análise para o problema da localização de depósitos. Esta é uma das mais importantes decisões logísticas pois influencia de forma decisiva a composição de custos logísticos e o nível de serviços da operação. Pretende-se fornecer aos profissionais de logística uma ferramenta capaz de auxiliá-los a solucionar as principais questões envolvidas na análise de localização de depósitos.

A metodologia expõe, de forma objetiva, as doze principais etapas que devem ser seguidas em um projeto de otimização da rede logística. Ressalta-se que os seis primeiros passos – identificação do problema, definição da equipe envolvida no projeto, coleta, agregação e tabulação de dados e escolha da técnica de solução - podem ser agrupados em uma fase de planejamento. A análise em si inicia-se a partir da sétima etapa, onde são escolhidos os potenciais pontos de localização de depósitos. Esta prossegue com a construção, calibração e validação do modelo, além da análise de sensibilidade e cenários. Desta forma, os passos 7 a 10 poderiam ser agrupados em uma fase de análise inicial, que seria seguida pela fase de implementação- passo 11- e pela análise final dos resultados. Apesar da importância de todas as etapas apresentadas, deve-se frisar a relevância da fase de planejamento. Cerca de 2/3 do tempo despendido em análises de localização são gastos na aquisição e preparação dos dados, uma vez que, na maioria das empresas, estes não são estruturados, pois não existem sistemas de informação voltados para sua geração (Lacerda, 2004).

Propõem-se dois modelos para análise de localização de multi-depósitos em cadeias com multi-produtos. O modelo de programação linear inteira-mista permite encontrar uma solução ótima para o problema, sendo analisada toda a cadeia logística. Porém, para sua aplicação, é necessária a aquisição de um pacote especializado de otimização. Desta forma, desenvolveu-se também um modelo de localização no plano aplicado a multi-instalações. Esta ferramenta foi implementada em linguagem Pascal 7.0 e necessita de uma menor quantidade de informações. Sua utilização é simples e barata, não sendo necessária a compra de nenhum *software*. Contudo, esta ferramenta não é um sistema de otimização, de modo que não garante que a solução encontrada seja a ótima global. A escolha pela aplicação de um destes modelos para a análise de localização varia de acordo com a precisão desejada para os resultados, com as características da rede e com a disponibilidade de recursos financeiros e de tempo.

É importante salientar que, para se realizar uma análise completa de canais de distribuição complexos, as técnicas de otimização requerem grandes intervalos de tempo de processamento. Os avanços obtidos com algoritmos de solução e a velocidade dos computadores possibilitaram um aumento substancial da capacidade de otimização de redes. Porém, dependendo da dimensão da cadeia, alguns problemas requerem a aplicação de heurísticas combinadas a técnicas de otimização. Recomenda-se, então, que a análise seja iniciada pelo modelo de localização no plano proposto. Assim, os pontos potenciais para a localização de depósitos seriam filtrados e o resultado encontrado nesta primeira análise alimentaria o algoritmo de otimização. Uma vez reduzido o volume de dados

de entrada, este problema poderia ser solucionado através do modelo de otimização com um menor tempo de processamento.

Os resultados encontrados através de metodologias quantitativas devem ser analisados detalhadamente, uma vez que os modelos são uma simplificação da realidade e seus resultados nem sempre representam a melhor solução para o problema real. As simplificações, previsões e suposições adotadas nestas análises nem sempre representam as situações reais com precisão. No entanto, são incontestáveis os benefícios trazidos pela análise estratégica das redes logísticas. Enfim, a modelagem é uma excelente ferramenta de apoio à decisão, que tende a indicar, dentro de um intervalo de confiança aceitável, a melhor solução a ser adotada.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AMIRI, Ali. Designing a Distribution Network in a Supply Chain System: Formulation and Efficient Solution Procedure. *European Journal of Operational Research*, Setembro 2004.
- BALLOU, Ronald H. *Gerenciamento da Cadeia de Suprimentos*. Porto Alegre: Bookman, 2001.
- BOWERSOX, Donald; CLOSS, David. *Logística Empresarial, o Processo de Integração da Cadeia de Suprimento*. São Paulo: Atlas, 2001.
- BRAMEL, Julien; SIMCHI-LEVI, David. *The Logic of Logistics*. Nova York: Springer, 1997.
- BRANDEAU, M.L.; CHIU, S.S. An overview of representative problems in location research. *Management Science*, v.35, n.6, p.645-674, 1989.
- BROOKE, Anthony, KENDRICK, David, MEERAUS, Alexander, RAMAN, Ramah. *GAMS: A User's Guide*. Washington: GAMS Development Corporation, 1998.
- CHING, H.Y. *Gestão de Estoques na Cadeia de Logística Integrada- Supply Chain*. São Paulo: Atlas, 1999.
- CHOPRA, Sunil; MEINDL, Peter. *Gerenciamento da Cadeia de Suprimentos: Estratégia, Planejamento e Operação*. São Paulo: Prentice Hall, 2003.
- CRAINIC, T.G e LAPORTE, G. Planning models for freight transportation. *European Journal of Operational Research*, v. 97, p. 409-438, 1997.
- GENTRY, Connie. Site Selection for DC: Transportation and Labor are more critical than real estate. *Chain Store Age*, Maio 2003
- HOFFMAN, William. Location, Location and More: Survey finds wide difference in DC costs. *Traffic World*, Fevereiro 2005.
- JAYRAMAN, V. An efficient heuristic procedure for practical-sized capacitated warehouse design and management. *Decision Sciences*, v. 29, p. 729-745, 1998.
- KOBAYASHI, Shun'ichi. *Renovação da Logística: Como Definir Estratégias de Distribuição Física Global*. São Paulo: Atlas, 2000.
- LACERDA, Leonardo. *Considerações sobre o Estudo de Localização de Instalações*. Dezembro 2004. Disponível em <www.cel.coppead.ufrj.br> Acesso em 06/12/2004.
- LEAL, Marcus. *Localização de Depósitos: Um Modelo de Análise Aplicado ao Setor de Distribuição de Combustíveis*. Dissertação (Mestrado em Administração). Rio de Janeiro: UFRJ, 1995.
- LUDWIG, Luciano Madruga. *Modelagem da Cadeia de Suprimentos da Água Mineral como o Modelo de Múltiplos Objetivos*. Dissertação (Mestrado em Administração). Porto Alegre: UFRGS, 2001.
- NOVAES, Antônio G. *Logística e Gerenciamento da Cadeia de Distribuição*. Rio de Janeiro: Campus, 2004.
- PLUNKETT, Kevin. Warehouse location: Christmas Conundrum. *Focus*, Dezembro 2003.
- SABRI, E.H.; BEAMON, B. A Multi-objective approach to simultaneous strategic and operational planning in supply chain design. *Omega - The International Journal of Management Science*, v. 28, p. 581-598, 2000.
- SIMCHI-LEVI, David; KAMINSKY, Philip; SIMCHI-LEVI, Edith. *Designing and Managing the Supply Chain: Concepts, Strategies, and Case Studies*. Nova York: McGraw-Hill, 2000.
- TRAGANTALERNGSAK, S.; HOLT, J.; RONNQVIST, M. An exact method of two-echelon, single-source, capacitated facility location problem. *European Journal of Operational Research*, v.123, p.473-489, 2000.

Renata Albergaria de Mello Bandeira (renata@producao.ufrgs.br)

Luis Antonio Lindau (lindau@producao.ufrgs.br)

Franciso José Kliemann (kliemann@producao.ufrgs.br)

PPGEP, Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Praça Argentina, 9 – Porto Alegre, RS, Brasil