

MODELO PARA LOCALIZAÇÃO DE INSTALAÇÕES EM ESCALA GLOBAL ENVOLVENDO QUATRO ELOS DA CADEIA LOGÍSTICA

Ricardo Hamad

Programa de Mestrado em Engenharia de Sistemas Logísticos
Escola Politécnica da Universidade de São Paulo

Nicolau D. Fares Gualda

Departamento de Engenharia de Transportes,
Escola Politécnica da Universidade de São Paulo

RESUMO

A localização de fábricas e/ou centros de distribuição é um problema de grande complexidade, principalmente para empresas com operações internacionais. Na literatura mundial são poucos os modelos desenvolvidos que tratam da localização de instalações em escala global. Este trabalho propõe um modelo de Programação Linear Inteira Mista que soluciona o problema minimizando os custos logísticos (custos fixos, custos de transferência, custos de distribuição, impostos não recuperáveis, estoques, *take-or-pay*, matéria-prima e custos de agregação de valor e transbordo). Como principais contribuições do modelo citam-se a inclusão de vários elos da cadeia, o cálculo pioneiro para carregamento dos estoques e o tratamento dado aos custos tipo *take-or-pay*. O modelo foi aplicado com sucesso em um caso real de uma indústria do segmento químico. São ainda sugeridas extensões do modelo para tratar benefícios fiscais como o *drawback* e adaptações para o uso em outros tipos de indústria.

ABSTRACT

The location of both factories and distribution centers has always been a problem of great complexity, mainly for companies with global operations. In the literature, there are a few models for facilities location in a global scale. This work proposes a Mixed Integer Linear Programming model that solves the problem minimizing the total logistic cost (fixed, transfer and distribution costs, non recoverable duties, carrying, take-or-pay, raw material, added value and handling costs). As main contributions of the proposed model are the inclusion of several links in the chain, the pioneer carrying cost calculation and the treatment given to the take-or-pay costs. The model was successfully applied in a real case of a chemical industry. Some extensions of the model are suggested: the treatment of fiscal benefits such as drawback and adaptations for use in other types of industry.

1. INTRODUÇÃO

Foram diversas as fases de mudança e foco das empresas desde a revolução industrial (redução de custos, aumento da demanda, qualidade do produto, qualidade do serviço, redução dos tempos, uso da Internet), mas uma coisa permeou por todas elas: a globalização como fator vital para a manutenção da competitividade das empresas. Ballou (1998) considera que o fator mais importante de uma cadeia logística em escala global é a localização de fábricas e armazéns. Em 1992, Fawcett e Vellanga apontavam que mais de 75% das maiores companhias americanas já possuíam fábricas fora dos EUA. Com o crescimento da globalização, estima-se que esse percentual deva ser mais de 90%, atualmente. A dificuldade maior em otimizar a localização de fábricas reside na enorme quantidade de variáveis envolvidas e de *trade-offs* (trocas) que devem ser consideradas. O enfoque sistêmico proposto por Churchman (1969) nos orienta que a melhor estratégia para a resolução destes tipos de problema é sua análise de uma forma holística, com uma conseqüente decomposição das diversas variáveis que compõem o sistema para facilitar a sua resolução. Ballou (1998) apresenta detalhadamente os *trade-offs* envolvidos em uma cadeia de suprimento e a dificuldade em conciliar-se estratégias conflitantes, tais como estoques, decisões de transportes e localização de fábricas e depósitos.

Nas últimas décadas, muito tem sido estudado e vários modelos têm sido desenvolvidos para localização de centros de distribuição, tanto no exterior (Geoffrion e Graves, 1974; Geoffrion

e Powers, 1976; Geoffrion, 1987/1988; Love *et al.*, 1988; Jamal e Sundar, 1997/1998; Macdonald e Taylor, 1992; Stoop e Wiers, 1996; Syam, 2000; Ramamurti, 2001), como no Brasil (Medina, 1996; Lacerda, 1999; Martos, 2000; Yoshizaki, 2002; Brito, 2004; Vallim, 2004). Ferramentas de otimização usando programação linear inteira mista (PLIM) são as que têm apresentado melhores resultados para resolução dos modelos de localização conforme atestam Love *et al.* (1988), Ballou (1998), Lacerda (1999), Smits (2001) e Bhutta (2004). Dentre os modelos de localização mais comuns, encontram-se aqueles com foco na decisão de localização de centros de distribuição em escala regional. Modelos construídos para solução de problemas que envolvem localização de fábricas e depósitos em escala global que possam atender empresas multinacionais são menos freqüentes e todos eles simplificam o problema para uma cadeia de valor de, no máximo, três elos (centro produtor, centro de transbordo e centro consumidor).

Este trabalho propõe a solução para o problema de localização de unidades industriais próprias, fornecedores e armazéns em escala global, usando um modelo de PLIM que considera vários elos na cadeia, bem como os vários fatores que influenciam a decisão. A revisão bibliográfica, apresentada no item 2, inclui um comparativo qualitativo entre o modelo em foco e vários outros encontrados na literatura. O modelo proposto apresentado no item 3 foi aplicado com sucesso em um caso real de um problema de localização de uma corporação multinacional do ramo químico que fornece produtos de alto valor agregado (item 4). O modelo mostrou ser de fácil utilização, tempo de processamento muito rápido e bastante útil para ajuda na tomada de decisões de localização de fábricas ou depósitos em escala global. A conclusão final deste estudo e recomendações para futuros desdobramentos e complementações deste estudo são apresentadas no item 5.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

As possíveis aplicações para os modelos de localização são muito amplas e os primeiros trabalhos encontrados na literatura nos remetem à década de 60: Kuehn e Hamburger (1963), Efroymson e Ray (1966) e Spielberg (1969). A maioria dos modelos contempla propostas para resolução dos problemas localizados nos níveis estratégico e tático. Dos trabalhos analisados, percebe-se uma clara tendência para a modelagem de problemas envolvendo poucos elos na cadeia e, principalmente, soluções para o problema de localização de CDs através da minimização de custos ou maximização de lucros. Em nenhum modelo analisado foi verificada a preocupação com outros componentes da cadeia de valor como, por exemplo, a maximização do nível de serviço (minimização do *lead-time* de entrega e aumento na precisão de entrega, por exemplo) ou maximização do giro de estoque. Apesar de relativamente recente, a preocupação com o nível de serviço já tem feito parte dos modelos, mas apenas como condição de restrição e não como objetivo principal dos modelos. Com a crescente necessidade de atendimento da demanda com qualidade aceitável e dentro de tempos e precisão de entrega melhores do que a concorrência, imagina-se que esta preocupação deverá tornar-se mais recorrente em modelos a serem desenvolvidos no futuro.

Outra variável que vem crescendo em importância em trabalhos de localização é a referente ao impacto dos impostos na configuração final da malha logística. São vários os trabalhos no Brasil e no exterior que abordam o tema e incluem esse tipo de parâmetro na proposta de solução (Yoshizaki, 2002; Brito, 2004; Pantalena, 2004). Nos problemas de localização de instalações em escala mundial, particularmente, verificou-se a inclusão de alguns outros

fatores que afetam a tomada de decisão, tais como, flutuação das taxas de câmbio, os custos do capital empregado, flutuação das taxas de juros e instabilidade política dos países.

Dentre os modelos desenvolvidos para localização em escala global temos alguns trabalhos encontrados na literatura internacional, mas nenhum desenvolvido no Brasil. Dentre esses modelos podemos citar, em seqüência cronológica: Tong e Walter (1980), Haug (1985), Hodder e Jucker (1985), Allen (1991), Haug (1992), Bijayamada e Chakravarty (1994), Canel e Khumawla (1996), Kirca e Koksalan (1996), Min e Melachrinoudis (1996), Meijboom e Vos (1997), Mohamed (1999), Flipo (2001), Bhutta (2001), Hadjinicola e Kumar (2002), Verter (2002), Syam (2002) e Rios (2003). Todos esses autores levam em conta a demanda e restrições de capacidade na formulação de seus modelos. A maioria usa a Programação Linear (PL) como algoritmo para a solução do problema e apenas Verter (2002) propõe um algoritmo inédito. Kirca e Koksalan (1996) são os primeiros a incluírem a inflação como fator a ser considerado. São também pioneiros na integração do planejamento financeiro com o planejamento da produção. Bhutta (2001) é o que apresenta um dos modelos mais completos em termos de fatores considerados, mas limitado à solução para apenas dois elos da cadeia. Este mesmo autor em 2004 faz uma excelente revisão dos modelos globais usados para a decisão de localização de fábricas. Smits (2001) também faz uma excelente avaliação dos modelos para projetos de redes de distribuição e apresenta uma vasta revisão da literatura existente. Nesse trabalho são comparados 34 modelos de localização, incluindo o proposto pelo autor do estudo, que cria uma taxonomia a partir de 14 atributos diferentes. Gutierrez (1996) apresenta um modelo que contempla quatro elos na cadeia, mas é usado apenas para otimizar os volumes de produção e distribuição, e não para localização de instalações industriais ou depósitos. Bhutta *et al.* (2003) apresentam um modelo temporal para localização de instalações industriais em escala global que contempla um leque grande de variáveis importantes ligadas à globalização, tais como taxas de câmbio, custos de estoque, custos de instalação e desmobilização de fábricas. O modelo de Geoffrion, Graves (1974) é aplicado em um caso real por Geoffrion e Powers, em 1976. Esses mesmos autores posteriormente comentam em 1980 e 1995 sobre a evolução das técnicas e dos conceitos envolvendo localização de instalações. Os dois fazem um bom apanhado da evolução do conceito e das ferramentas que têm sido desenvolvidas para a solução do problema. Em 90% dos casos, segundo eles (dados de 1990), os modelos criados para a localização de instalações optam pela PLIM (Programação Linear Inteira Mista) como algoritmo de otimização. Outro trabalho que também avalia e apresenta métodos para solucionar o problema de localização é o de Love *et al.* (1988). Novamente comenta-se o crescimento ininterrupto dos estudos na área e da importância da PLIM para a resolução de questões desse tipo. Shapiro (2001), após uma apresentação dos vários modelos, também aponta a PLIM como a mais promissora para esse tipo de problemas, opinião compartilhada também por autores brasileiros: Lacerda (1999) e Wanke (2001).

No Brasil, foram várias as aplicações da PLIM no estudo de modelos de localização como, por exemplo, Medina (1996) - para dimensionamento de frota e localização de embarcações para atendimento de acidentes marítimos, Martos (2000) - projeto de redes logísticas com consideração de estoques e modais na indústria petroquímica, Nazar (2003) - para resolução do problema de planejamento de serviços no transporte intermodal que leva em conta o nível de serviço oferecido, e Brito (2004) - análise do impacto logístico de diferentes regimes aduaneiros no abastecimento de itens aeronáuticos. Considerações sobre os custos de carregamento dos estoques fazem parte do trabalho. Vallim (2004) apresenta um modelo para

localização de Centros de Distribuição cuja solução é obtida em duas fases: uma primeira análise estratégica que fornece a localização ótima através de PLIM e *Simulated Annealing* que é complementada com a definição da quantidade ótima de CDs a partir de parâmetros de custos de estoque e armazenagem.

3. O MODELO MATEMÁTICO

O modelo básico a ser adotado é o de Geoffrion e Graves (1974), que usa PLIM (Programação Linear Inteira Mista) para minimizar os custos fixos e variáveis de uma malha logística. O modelo recomenda a abertura ou fechamento de centros de distribuição a partir de uma lista de instalações pré-selecionadas. Apesar de manter a idéia básica e o algoritmo PLIM, esse modelo básico sofreu várias adaptações para o problema em foco:

- Inclusão de mais elos na cadeia tratada, o que torna a análise mais sistêmica,
- Possibilidade de consideração de fábricas ou CDs nos elos iniciais da cadeia, com conseqüente utilização de custos de transformação ou de custos de manuseio e transbordo,
- Eliminação das restrições envolvendo volumes mínimos de produção/manuseio e da restrição que obrigava apenas um elo produtor fornecendo para um elo consumidor,
- Segregação dos impostos e inclusão da taxa de câmbio para cálculo dos custos,
- Inclusão dos custos de estoque na função objetivo, que são calculados a partir do giro de estoque esperado,
- Inclusão de custos de *take-or-pay*, que são incorridos quando o consumo de matéria prima é menor do que o acordado com os fornecedores.

Os **parâmetros** do modelo são:

Dem_{ml} = demanda do produto **m** no mercado **l**

Cap_i = capacidade anual da fábrica **i**

Cap_j = capacidade anual da fábrica **j**

Cap_{km} = capacidade anual da fábrica **k** para o produto **m**

CusT_{ij} = custo unitário em \$/unidade padrão para transportar o princípio ativo ou matéria prima básica do centro produtor **i** para o centro produtor **j**

CusT_{jk} = custo unitário em \$/unidade padrão para transportar o produto intermediário do centro produtor **j** para o centro produtor **k**

CusD_{mkl} = custo unitário em \$/unidade padrão para distribuir o produto final **m** do centro produtor **k** para o mercado **l**

CusB_i = Custo unitário \$/Unidade padrão do princípio ativo fabricado na fábrica **i**

CusB_j = Custo unitário \$/Unidade padrão a ser agregado na fábrica **j** para transformar o princípio ativo ou matéria prima básica em produto intermediário

CusB_{km} = Custo unitário \$/Unidade padrão a ser agregado na fábrica **k** para transformar o produto intermediário no produto final **m**

CusFix_j = Custo fixo (\$/ano) na fábrica **j**. O custo fixo, indiretamente, representará também o investimento necessário já que a depreciação respectiva deverá fazer parte desse valor.

CusFix_k = Custo fixo (\$/ano) na fábrica **k**. Vale a mesma observação comentada para o parâmetro acima.

CusTOP_i = Custo *Take-Or-Pay* (\$/unidade padrão) das fábricas que fornecem o princípio ativo. Este custo se aplica quando a capacidade está subutilizada o que impede o consumo da matéria prima acordada com os fornecedores.

Tax_{ij} = Taxas e impostos (em %) não recuperáveis para transferir o princípio ativo da fábrica *i* para a fábrica *j*

Tax_{jk} = Taxas e impostos (em %) não recuperáveis para transferir o produto intermediário da fábrica *j* para a fábrica *k*

Tax_{mkl} = Taxas e impostos (em %) não recuperáveis para transferir o produto acabado *m* da fábrica *k* para o mercado *l*

PrecPA_{ij} = Preço de transferência unitário (\$/unidade padrão) do princípio ativo fabricado na fábrica *i* e enviado para a fábrica *j*

PrecPI_{jk} = Preço de transferência unitário (\$/unidade padrão) do produto intermediário fabricado na fábrica *j* e enviado para a fábrica ou depósito *k*

PrecPF_{mkl} = Preço de venda unitário (\$/unidade padrão) do produto final *m* fabricado/manuseado na fábrica/depósito *k* e enviado para o mercado *l*

DOH_j = *Days-On-Hand* (cobertura de estoque) da fábrica *j* considerando a eficácia no gerenciamento de estoque esperada, que pode ser estimada a partir de fatores como volumes de matéria-prima em trânsito esperados, flexibilidade da unidade produtiva, e sazonalidade da demanda do elo seguinte da cadeia. DOH_j no modelo proposto é calculado a partir do estoque médio e das entradas do princípio ativo.

O estoque médio na fábrica *j* (**IM_j**) é dado por:

$$\mathbf{IM}_j = \mathbf{DOH}_j \times \sum_i (\mathbf{Trns}_{ij} \times \mathbf{CusB}_i) / 365 \quad (1)$$

onde **DOH_k** = *Days-On-Hand* (cobertura de estoque) da fábrica ou depósito *k* considerando a eficácia no gerenciamento de estoque esperada. A observação comentada acima vale também para o cálculo do DOH da fábrica ou depósito *k*. O estoque médio em *k* (**IM_k**) é dado por:

$$\mathbf{IM}_k = \mathbf{DOH}_k \times \sum_k \{ \mathbf{Trns}_{jk} \times [\sum_i (\mathbf{CusB}_i)/2 + \mathbf{CusB}_j] \} / 365 \quad (2)$$

Importante perceber que, no caso do cálculo do estoque para a fábrica/depósito *k*, foi necessário usar o valor do COGS unitário do Produto Intermediário (PI) a partir da somatória do valor do princípio ativo que chegou na fábrica *j* adicionado ao custo agregado gerado nesse elo. O valor do princípio ativo foi aproximado por uma média dos custos de cada fábrica *i*, o que é possível considerando-se a hipótese de que a diferença de custo entre as fábricas não é muito diferente. Caso os custos sejam muito diversos, essa premissa não pode ser considerada e o modelo precisaria ser modificado.

CC = Custo de carregar o estoque em % do valor do estoque que é dado por:

$$\mathbf{CC} = \mathbf{CF} + \mathbf{CM} \quad (3)$$

em que **CF**: custo de oportunidade financeira (em % do valor do estoque);

CM: custo envolvido com o armazenamento do material (em % do valor do estoque)

O Custo de oportunidade financeira (ou custo de capital) é a taxa de desconto para os fluxos de caixa dos ativos, descontado o imposto de renda. A forma de cálculo do custo de capital normalmente utilizada pelas empresas baseia-se na metodologia WACC (*Weighted Average Cost of Capital*), que leva em conta os custos do Patrimônio Líquido e os custos do Passivo da

empresa descontados do imposto de renda. O Custo de Armazenamento combina uma série de outros custos associados à manutenção física dos estoques (Ballou, 1998).

As **Variáveis** do modelo são:

Trns_{ij} = volume do princípio ativo a ser transferido da fábrica **i** para a fábrica **j**

Trns_{jk} = volume do princípio ativo a ser transferido da fábrica **j** para a fábrica **k**

Dstr_{mkl} = volume do produto **m** a ser distribuído da fábrica **k** para o mercado **l**

Z_j = assume valor 1 se a fábrica **j** for aberta ou 0 em caso contrário

Z_f = assume valor 1 se a fábrica **f** for aberta ou 0 em caso contrário

Função Objetivo:

min *CT*

$$CT = \sum_i \sum_j ((CusT_{ij} + Cusb_i) \times Trns_{ij}) \longrightarrow (1)$$

$$+ \sum_i \sum_j (PrecPA_{ij} \times Tax_{ij} \times Trns_{ij}) \longrightarrow (2)$$

$$+ \sum_j \sum_k ((CusT_{jk} + Cusb_j) \times Trns_{jk}) \longrightarrow (3)$$

$$+ \sum_j \sum_k (PrecPI_{jk} \times Tax_{jk} \times Trns_{jk}) \longrightarrow (4)$$

$$+ \sum_m \sum_k \sum_l \{ [CustD_{mkl} + Cusb_{mk}] \times Dstr_{mkl} \} \longrightarrow (5)$$

$$+ \left\{ \sum_m \sum_k \sum_l [(PrecPF_{mkl} \times Tax_{mkl}) \times Dstr_{mkl}] \right\} \longrightarrow (6)$$

$$+ \sum_j (CusFix_j \times Z_j) + \sum_k (CusFix_k \times Z_k) \longrightarrow (7)$$

$$+ \sum_i \sum_j (Cusb_i \times Trns_{ij}) \times DOH_j \div 365 \times CC \longrightarrow (8)$$

$$+ \sum_j \sum_k ((\sum_i^n Cusb_i / n) + Cusb_j) \times Trns_{jk} \times DOH_k \div 365 \times CC \longrightarrow (9) \quad (4)$$

$$+ \sum_i \left(CusTOP_i \times (Cap_i - \sum_j Trns_{ij}) \right) \longrightarrow (10)$$

(4.1) – Custo de transferência das fábricas **i** para as fábricas **j**;

(4.2) – Custo referente aos impostos e taxas não recuperáveis que incidem na transferência do princípio ativo ou matéria-prima básica das fábricas **i** para as fábricas **j**;

(4.3) – Custo de transferência das fábricas **j** para as fábricas ou depósitos **k**;

(4.4) – Custo referente aos impostos e taxas não recuperáveis que incidem na transferência do produto intermediário das fábricas **j** para as fábricas ou depósitos **k**;

(4.5) – Custo de transferência dos produtos **m** das fábricas ou depósitos **k** para os mercados **l**;

(4.6) – Custo referente aos impostos e taxas não recuperáveis que incidem na venda dos produtos **m** das fábricas ou depósitos **k** para os mercados **l**;

(4.7) – Total dos custos fixos da(s) fábrica(s) ou depósito(s) indicados para serem abertos;

(4.8) – Custo para carregar-se o estoque (*carrying cost*) nas fábricas **j**;

(4.9) – Custo de carregamento do estoque nas fábricas ou depósitos **k**;

(4.10) – Custo incorrido quando a produção da fábrica que fornece o princípio ativo é menor do que a sua capacidade. Em alguns contratos com fornecedores dedicados esse custo se aplica, pois o consumo de matéria-prima é menor do que o acordado, o que leva ao pagamento de um prêmio devido à não aquisição dos volumes acertados em contrato.

As **Restrições** do modelo seguem abaixo:

Atender à demanda prevista:

$$Dem_{ml} \leq \sum_k Dstr_{mkl} \quad \forall l, m. \quad (5)$$

Capacidade produtiva do princípio ativo na fábrica i :

$$\sum_j Trns_{ij} \leq Cap_i \quad \forall i. \quad (6)$$

Capacidade produtiva do produto intermediário na fábrica j :

$$\sum_k Trns_{jk} \leq Cap_j \times Z_j \quad \forall j. \quad (7)$$

Capacidade do produto m na fábrica ou depósito k a ser enviada para o mercado l :

$$\sum_l Dstr_{mkl} \leq Cap_{mk} \times Z_k \quad \forall m, k. \quad (8)$$

Balanco do princípio ativo na fábrica j :

$$\sum_i Trns_{ij} = \sum_k Trns_{jk} \quad \forall j. \quad (9)$$

Balanco do produto intermediário na fábrica ou depósito k :

$$\sum_j Trns_{jk} = \sum_l \sum_m Dstr_{mkl} \quad \forall k. \quad (10)$$

Não negatividade:

$$Trns_{ij} \geq 0 \quad \forall i, j.; \quad Trns_{jk} \geq 0 \quad \forall j, k.; \quad Dstr_{mkl} \geq 0 \quad \forall m, k, l. \quad (11)$$

Variáveis binárias:

$$Z_j = \begin{cases} 1, & \text{se a fábrica } j \text{ for aberta} \\ 0, & \text{em caso contrário} \end{cases} \quad \forall j$$

$$Z_k = \begin{cases} 1, & \text{se a fábrica ou depósito } k \text{ for aberto} \\ 0, & \text{em caso contrário} \end{cases} \quad \forall k \quad (12)$$

4. APLICAÇÃO

O modelo foi aplicado a um problema de uma empresa multinacional do segmento químico que fornece produtos de alto valor agregado para analisar a melhor combinação de fábricas e mercados que minimizem os custos logísticos do principal produto de seu portfólio. Para o caso em questão teremos um total de dimensões conforme segue:

- Fábricas i : $n = 2$, uma no Brasil e outra nos EUA
- Fábricas j : $o = 6$, duas no Brasil, duas nos EUA, uma na Argentina e outra na Europa
- Fábricas k : $p = 10$, duas no Brasil, duas nos EUA, uma na Europa e três na Ásia
- Mercados l : $q = 47$, espalhados por mesoregiões dentro de macroregiões globais divididas de acordo com as áreas geográficas de negócio da empresa: Brasil, América Latina Sul, América Latina Norte, América do Norte, Ásia/Pacífico, Europa e África.

Os dados de custos de distribuição foram levantados juntos aos profissionais de logística da empresa que trabalham em várias de suas subsidiárias espalhadas pelo mundo. Os dados de impostos/taxas foram coletados junto aos profissionais da área fiscal. No Brasil, várias análises foram feitas para que os impostos usados no modelo reflitam exatamente os valores não recuperáveis a serem incorridos sobre o produto a ser transferido entre fábricas e das fábricas para os mercados. O modelo, para este caso particular de aplicação, possui 1028 variáveis, 139 restrições e 16 variáveis inteiras, o que pode caracterizá-lo como um problema de tamanho médio. A unidade padrão de volume a ser usada no modelo é o *KEG*, que significa milhares de galões equivalentes do princípio ativo. No caso da empresa, a cadeia de suprimentos de interesse tem quatro elos, mas, para adaptar este modelo a mais de quatro elos, as modificações exigidas são relativamente pequenas.

Apesar do modelo ter sido aplicado para localização de fábricas, o último elo pode ser substituído por Centros de Distribuição, sem nenhum prejuízo para o modelo da forma que foi concebido. O conceito, as restrições, variáveis, função objetivo e demais componentes do modelo não precisam ser alterados. O único cuidado necessário para poder-se usar o modelo da forma que foi concebido é substituir os custos de transformação usados na aplicação pelos custos de manuseio e transbordo que são praticados nos Centros de Distribuição.

Impactos referentes a benefícios fiscais encontrados no Brasil, tais como *Drawback* (benefício aduaneiro federal), *FUNDAP* (benefício dado pelo governo do Espírito Santo), projeto *Desenvolve* (benefício oferecido pelo governo da Bahia), *Zona Franca de Manaus* e benefícios verificados em outros países (*Importação temporária na Argentina*, por exemplo, benefício similar ao nosso *Drawback*) foram incluídos parcialmente no modelo. Para adequar o modelo ao procedimento de *Drawback*, as variáveis **TRNS** *ij*, e **TRNS** *jk* e os parâmetros **Tax** *ij* e **Tax** *jk* deverão ser duplicados, de forma a admitir dois tipos de transferências dos produtos base e intermediários: aquelas que serão consumidas em produtos a serem vendidos localmente e aquelas que serão destinadas à produção de itens a serem exportados. Uma restrição adicional deverá ser considerada: a somatória de todas as variáveis **DSTR** *mkl* para os mercados *l* que ficam no exterior deverá ser maior ou igual à somatória das importações de princípio ativo e produto intermediário que podem ser beneficiadas pelo *Drawback*:

$$\sum_i Trns_{ij} + \sum_j Trns_{jk} \leq \sum_k Dstr_{mkl} \quad \forall \text{destinos } l \notin \text{Brasil e origens } i, j \notin \text{Brasil} \quad (13)$$

O modelo foi aplicado a um caso base que representa a atual configuração de instalações industriais da empresa. Os dados de demanda referem-se ao ano de 2004. O modelo apresentou resultados bastante interessantes e demonstrou ser bastante útil para a tomada de decisões na localização de instalações industriais e para a definição do modelo de suprimento da empresa. Além disso, o modelo possibilitou uma visão sistêmica bastante precisa dos custos logísticos incorridos pela empresa em sua cadeia de suprimento global, ajudando a perceber os custos mais e menos significativos na malha logística atual.

Importante comentar que a solução apresentada pelo modelo difere razoavelmente da malha logística atual da empresa. Nos custos logísticos, os impostos/taxas são mais representativos que os custos com transporte. Os custos para carregar o estoque, apesar de relativamente

pequenos (pouco mais de 2%), não são insignificantes e influenciam diretamente o resultado da localização das instalações.

Por ter uma participação grande no custo logístico total, os impostos influenciam fortemente a configuração final da malha logística global da empresa, também chamada de *Global Sourcing Model*. Percebe-se que, por se tratar de produtos de alto valor agregado, os impostos e taxas são mais representativos do que os custos de frete, o que faz com que as transferências e distribuições sejam atraídas pelas condições de menor imposto, em detrimento dos menores custos de frete.

A título de exemplo, podemos citar os benefícios fiscais preconizados pelo Mercosul (acordo de cooperação comercial entre Brasil, Argentina, Paraguai e Uruguai), que institui alíquotas diferenciadas praticadas entre esses países. Devido a esse tratado de cooperação comercial, que permite alíquotas nulas ou bastante reduzidas, um produto acabado produzido na Argentina chega ao Sul do Brasil a um custo mais competitivo do que o mesmo produto manufaturado em São Paulo. Percebe-se também que alguns benefícios fiscais conseguidos pela empresa devido ao tipo de produto (isenção do IPI, redução da base para cálculo do ICMS e redução da alíquota do PIS/COFINS) também dão ganhos competitivos que justificam a manutenção de fábricas no Brasil.

Fürbringer (1996) apresenta uma ferramenta para ajudar na simulação de análises de sensibilidade e detalha métodos eficientes para essas análises. Alguns dos conselhos ali apresentados foram usados para a definição das análises de sensibilidade feitas neste estudo. Foram desenvolvidas quatro análises, todas elas relevantes para a tomada de decisão em um problema de localização de instalações em escala mundial:

- Variação da demanda
- Nível de serviço
- Impacto do Mercosul
- Implantação de uma fábrica de produtos intermediários e produtos acabados na Bahia

Foram analisadas várias alterações, tanto de redução como de aumento na demanda atual. Os fatores de alteração de demanda utilizados foram aplicados igualmente em todos os parâmetros **Dem_{ml}**, ou seja, sem considerações mercadológicas mais aprofundadas. Para efeitos da análise, considerou-se um aumento uniforme de capacidade em todas as fábricas conseguido através de melhoria de produtividade sem impacto nos custos fixos.

O resultado otimizado para a situação atual apresenta o maior custo unitário em relação às variações de demanda analisadas. A redução do custo para aumentos na demanda explica-se facilmente pelo melhor aproveitamento das fábricas instaladas e dos correspondentes custos fixos associados. A redução dos custos unitários para demandas menores pode ser explicada pelo melhor aproveitamento de fábricas que estão totalmente ocupadas no caso base e que, por oferecerem menores custos de produção, distribuição e administração de estoque, acabam levando esses custos mais baixos para novos mercados, em detrimento das instalações industriais menos competitivas. Os ganhos obtidos com essas alterações na malha acabam por superar as perdas pelo não aproveitamento da capacidade total instalada.

O produto intermediário produzido na Argentina, por não atingir os índices mínimos de industrialização exigidos para que as tarifas previstas pelo Mercosul sejam válidas, chegaria

ao Brasil mais caro do que o produzido aqui. Se esse índice de industrialização exigido pelo Mercosul fosse atingido, a alíquota seria reduzida a zero e a solução dada pelo modelo recomendaria o envio do produto intermediário para a fábrica de São Paulo, em detrimento do produto acabado para o Sul do Brasil.

Para levar-se em conta o nível de serviço, optou-se por uma penalização dos custos de frete nos casos em que o tempo de entrega (tempo entre a saída da fábrica de produto acabado e a chegada no mercado consumidor) excedesse cinco dias. Mesmo com um custo de frete 50% maior, não houve modificações nas fábricas sugeridas para abertura e foram poucas as modificações na malha logística de distribuição, ratificando a percepção de que os custos de frete não são muito representativos na configuração da malha logística da empresa. Caso o fator usado fosse 10 (custo de frete 10 vezes maior), a solução recomendaria uma fábrica de produtos acabados adicional na Ásia.

Para o caso base e as simulações, foi usado um computador Dell Latitude D600 com processador Intel® Pentium® de 1,6 GHz e 512 Mb de RAM, utilizando o sistema operacional Windows XP (Microsoft). O *software* usado para a resolução foi o “*Premium Solver Platform*”, fornecido pela *Frontline Systems, Inc*, que amplia a capacidade do Solver do MSExcel (Microsoft). O tempo de processamento é cerca de um segundo.

5. CONCLUSÕES

O problema de localização de instalações de uma forma otimizada é um dos desafios mais complexos na arte do gerenciamento de uma cadeia de suprimentos. Quando esse problema é levado para uma escala global, o acréscimo de fatores tais como taxas de câmbio, níveis de serviço e variabilidade da demanda amplificam o problema e o torna extremamente difícil de se resolver sem um modelo matemático e *software* adequados.

O modelo aqui apresentado mostrou-se de aplicação bastante vasta e de fácil utilização. Como maiores contribuições do modelo proposto podem ser citados: a cobertura de uma maior quantidade de elos da cadeia, o tratamento pioneiro no cálculo do inventário a partir do giro esperado, a inclusão dos custos relacionados ao não cumprimento de contratos dedicados de fornecimento, e o tratamento do benefício fiscal *drawback*, quatro considerações que ainda não foram exploradas em modelos de localização.

Os resultados aqui apresentados corroboram os estudos feitos por outros autores sobre o impacto cada vez maior dos impostos na definição de uma rede logística. Além disso, outros fatores, tais como taxa de câmbio, custos de estoque, custos fixos, custos de frete e nível de serviço também não podem ser desconsiderados na otimização de um sistema logístico.

Como limitação do modelo ora proposto podem ser citados: a falta do fator sazonalidade dentre os parâmetros a serem considerados e o tratamento simplificado dado ao cálculo dos níveis de serviços envolvidos no problema. No caso específico da empresa analisada, as sazonalidades regionais acabam se compensando em escala global, o que elimina grandes picos e vales nos volumes demandados. As fábricas também trabalham de forma contínua, o que elimina quaisquer flutuações significativas nos volumes de produção. Com relação ao nível de serviço, o parâmetro é analisado de forma indireta, o que não invalida o modelo para os tipos de respostas a que ele se propõe a dar.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Allen, K.M. (1991) The role of logistics in the overseas plant selection decision process of United States based multinational corporations, *Journal of Business Logistics*, v. 12, n. 2, p. 59 – 73
- Ballou, R. H. *Business Logistics Management*. Englewood Cliffs NJ: Prentice-Hall, 4ª edição, 1998.
- Bijayamada, N. e A. K. Chakravarty (1994) A strategy for locating a network of international manufacturing facilities, *Proceedings of the Symposium on Globalization of Technology*, Manufacturing and Service Operations, Tulane University, p. 7-8
- Bhutha, K.S. (2001) *Global Supply Chains: An Integration Location, Production, Distribution and Investment Model for a Multinational Corporation Operating Under Varying Exchange Rates and Tariff Structures*, Doctoral Dissertation, University of Texas at Arlington
- Bhutta, K.S.; F. Huq; G. Frazier e Z. Mohamed (2003) An Integration Location, Production, Distribution and Investment Model for a Multinational Corporation, *International Journal of Production Economics*, v. 86, p. 201-216
- Bhutta, K.S. (2004), International facility location decisions: a review of the modelling literature, *International Journal of Integrated Supply Management*, v. 1, n. 1, p. 33-50
- Brito Jr., I. (2004), *Análise do impacto logístico de diferentes regimes aduaneiros no abastecimento de itens aeronáuticos empregando modelo de transbordo multiproduto com custos fixos*, Dissertação de Mestrado. Escola Politécnica da USP, São Paulo
- Canel, C. e B. M. Khumawala (1996), A mixed integer programming approach for the international facilities location problem, *International Journal of Operations and Production Management*, v. 16, n.4, p. 49-68
- Churchmann, C. W. (1979), *The systems approach*, Delacorte Press, New York. Paperback edition Dell Publishing, New York, 1969, second, revised ed. 1979
- Efroymsen, M. A. e T. L. RAY (1966), A branch and bound algorithm for plant location, *Operations Research*, v. 14, p. 361-368
- Fawcett, S.E. e D. B. Vellanga (1992), Transportation Characteristics and Performance in Maquiladora Operations, *Transportation Journal*, p. 5-16
- Flipo, C.D. (2000), Spatial decomposition for a multi-facility production and distribution problem, *International Journal of Production Economics*, v. 64, p. 177-186
- Flipo, C.D. e G. Finke (2001), An integrated model for an industrial production-distribution problem, *IIE Transactions*, v. 33, n. 9, p. 705-716
- Fürbringer, J. M. (1996), Sensitivity analysis for modelers, *Air Infiltration Review*, v. 17, n. 4, World Wide Web Edition
- Geoffrion, A. M. (1987), An introduction to Structured Modeling, *Management Science*, v. 33, p. 547-588
- Geoffrion, A. M. (1989), Integrated modeling Systems, *Computer Science in Economics and Management*, v. 02, p. 3-15
- Geoffrion, A. M. (1976), Better Distribution planning with computer models, *Harvard Business Review*, v. 54, p. 92-99
- Geoffrion, A. M. e R. F. Powers (1995), Twenty years of strategic distribution system design: an evolutionary perspective, *Interfaces*, v. 25, n. 5, p. 105-127
- Geoffrion, A. M. e R. F. Powers (1980), Facility location analysis is just the beginning, *Interfaces*, v. 10, n. 2, p. 22-30
- Gutierrez, C. J. (1996), *Development and Application of a Linear Programming Model to optimize Production and Distribution of a Manufacturing Company*, Dissertation for the Master of Science Degree, MIT, Massachusetts, USA
- Hadjinicola, G. C. e K. R. Kumar (2002), Modeling manufacturing and marketing options in international operations, *International Journal of Production Economics*, v. 75, p. 287-304
- Haug, P. (1985), A multiple-period, mixed-integer-programming model for multinational facility location, *Journal of Management*, v. 11, n. 3, p. 83-97
- Haug, P. (1992), An international location and production transfer model for high technology multinational enterprises, *International Journal of Production Research*, v. 30, n. 3, p. 559 – 572
- Hodder, J. E. e J. V. Jucker (1985), International plant location under price and exchange rate uncertainty, *Engineering Costs and Production Economics*, v. 9, p. 225 – 229
- Kirca, O. e M. Koksalan (1996), An integrated production and financial planning model and an application, *IIE Transactions*, v. 19, n. 8, p. 765 – 784
- Kuehn, A. A. e M. J. Hamburger (1963), A heuristic Program for locating warehouses, *Management Science*, v. 9, p. 643 - 666

- Lacerda, L. (1999), *Considerações sobre o estudo de localização de instalações*, <http://www.cel.coppead.ufri.br/fs-busca.htm?fr-loc-inst.htm>, Artigos do CEL, COPPEAD, RJ
- Love, R. F.; J. G. Morris e G. O. Wesolowsky (1988), *Facilities Location: models & methods*. New York, North Holland, p. 186-203
- Martos, A. C. (2000), *Projeto de redes logísticas com consideração de estoques e modais: aplicação de programação linear inteira mista à indústria petroquímica*, Dissertação de mestrado, Escola Politécnica da USP, São Paulo
- Medina, A. C. (1996), *Modelos para dimensionamento de frota e localização de embarcações para atendimento de acidentes marítimos*, Dissertação de Mestrado, Escola Politécnica da USP, São Paulo
- Meijboom, B. e B. Vos (1997), International manufacturing and location decisions: balancing configuration and co-ordination aspects, *International Journal of Operations & Production Management*, v.17, n. 8, p. 790-805
- Min, H. e E. Melachrinoudis (1996), Dynamic location and entry mode selection of multinational manufacturing facilities under uncertainty: a chance-constrained goal programming approach, *International Transactions of Operational Research*, v. 3, n. 1, p. 6 – 76
- Mohamed, Z. (1999), An integrated production-distribution model for a multinational company operating under varying exchange rates, *International Journal of Production Economics*, v. 58, p. 81 – 92
- Nazar, S. P. (2003), *Modelo para planejamento de serviços de transporte intermodal Long-haul*, Dissertação de Mestrado, Escola Politécnica da USP, São Paulo
- Pantalena, B. G. (2004), *Otimização da malha logística de uma indústria química*, Trabalho de formatura, Escola Politécnica da USP, São Paulo
- Rios, A. (2003), International Assembly Facility Location Problem, *Revista de Investigación*, v. 01, n. 1, EGAD del Tecnológico de Monterrey, Chihuahua, México
- Shapiro, J. F. (2001), *Modeling the Supply Chain*. Pacific Grove CA: Duxbury Press
- Spielberg, K. (1969), Algorithms for the simple plant-location problem with some side constraints, *Operations Research*, v. 17, p. 85-111
- Syam, S. S. (2002), A model and methodologies for the location problem with logistical components, *Computers and Operations Research*, v. 29, p. 1173 – 1193
- Tong, H. e C. K. Walter (1980), An empirical study of plant location decisions of foreign manufacturing investors in the US, *Columbia Journal of World Business*, v. 15, n. 1, p. 66 - 73
- Vallim Filho, A. R. A. (2004), *Localização de Centros de Transporte e carga – Uma contribuição para modelos de otimização*, Tese de doutorado, Escola Politécnica da USP, São Paulo
- Verter, V. (2002), An integrated model for facility location and technology acquisition, *Computers and Operations Research*, v. 29, p. 583-592
- Wanke, P. (2001), *Aspectos Fundamentais do Problema de Localização de Instalações em Redes Logísticas*, <http://www.cel.coppead.ufri.br/fs-busca.htm?fr-loc-inst.htm>, Artigos do Centros de Estudo em Logística, COPPEAD, RJ
- Yoshizaki, H. T. Y. (2002), *Projeto de Redes de Distribuição Física considerando a Influência do ICMS*, Tese de Livre-Docência, Escola Politécnica da USP, São Paulo

Ricardo Hamad (rcrdhamad@aol.com)

Nicolau D. F. Gualda (ngualda@usp.br)

Departamento de Eng. de Transportes, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo

Av. Prof. Almeida Prado, Travessa 2, nº 83 - Cidade Universitária - São Paulo – SP – Brasil