RICARDO HAMAD

**Modelo para localização de instalações em escala global
envolvendo vários elos da cadeia logística**

**São Paulo
2006**

RICARDO HAMAD

**Modelo para localização de instalações em escala global
envolvendo vários elos da cadeia logística**

Dissertação apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de São
Paulo para obtenção do título de Mestre
em Engenharia.

Área de concentração:
Engenharia de Sistemas Logísticos

Orientador: Prof. Dr. Nicolau Dionísio
Fares Gualda

**São Paulo
2006**

Este exemplar foi revisado e alterado em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência do seu orientador.

São Paulo, 17 de abril de 2006.

Assinatura do autor_____

Assinatura do orientador_____

FICHA CATALOGRÁFICA

Hamad, Ricardo

Modelo para localização de instalações em escala global envolvendo vários elos da cadeia logística / R. Hamad. – ed.rev. -- São Paulo, 2006. 69 p.

Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Transportes. Sistemas Logísticos.

1.Localização de instalações 2.Fatores críticos de localização 3. Programação linear inteira mista I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Transportes II.t.

"Em nossa sociedade empresarial, indivíduos enfrentam um desafio tremendo, um desafio que se deve explorar como uma oportunidade: a necessidade contínua de aprender e reaprender".

Peter Drucker

AGRADECIMENTOS

À minha mãe por ter me motivado desde pequeno a buscar patamares mais altos de conhecimento, apesar da sua pouca educação.

Ao meu irmão Fuad por seus aconselhamentos e por seu incentivo e suporte ao meu reaprendizado contínuo.

Ao meu orientador, professor Gualda, por ter facilitado o meu processo de desenvolvimento durante as aulas do mestrado, pelas dicas valiosas para a preparação deste trabalho e pelo constante suporte dentro e fora do ambiente acadêmico.

Ao professor Hugo pela inspiração na escolha do tema deste trabalho e pelo aconselhamento e suporte sempre que foram solicitados.

Aos colegas da empresa onde esse trabalho foi aplicado por sua dedicação no levantamento de dados e por sua colaboração nas análises efetuadas.

A todas as pessoas que, de uma forma maior ou menor, contribuíram com esse trabalho.

RESUMO

A localização de fábricas, fornecedores e/ou CDs é um problema de grande complexidade, principalmente em 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) levando em consideração vários elos da cadeia de suprimentos.

Como principais contribuições do modelo citam-se a inclusão de benefícios fiscais em transações internacionais, tais como o *drawback*, o cálculo pioneiro para custo no carregamento dos estoques e o tratamento dado aos custos tipo *take-or-pay*.

São sugeridas adaptações do modelo para utilização em quaisquer segmentos de indústria.

O modelo foi aplicado com sucesso em um caso real de uma indústria do segmento químico.

Palavras-chave: Localização de instalações, Fatores críticos de localização, Programação Linear Inteira Mista.

ABSTRACT

The location of factories, suppliers 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 developed 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) taking into consideration several echelons in the supply chain network.

The main contributions of the proposed model are the considerations regarding fiscal benefits in international trade such as *drawback*, the pioneer carrying cost calculation and the treatment given to the take-or-pay costs.

Some adaptations of the model have been suggested for use in any type of industry.

The model was successfully applied in a real case of a chemical industry.

Keywords: Facilities location, critical factors on facilities location, Mixed Integer Linear Programming.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Elos considerados no modelo de Geoffrion & Graves (1974)	22
Figura 2 – Elos a serem considerados no modelo a ser apresentado.....	30
Figura 3 - Exemplo de uma Tela de Resultados	46
Figura 4 - Exemplo de uma Tela para entrada da demanda	47
Figura 5 – Exemplo de tela para colocação dos dados das fábricas.....	48
Figura 6 – Elos principais da cadeia de suprimentos do modelo proposto.....	54
Figura 7 – Distribuição geográfica das instalações da empresa	56
Figura 8 - Impacto porcentual no custo unitário devido a variações da demanda.....	60

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Modelos globais de localização (BHUTTA, 2004)	18
Tabela 2 - Modelos globais de localização - adaptado de BHUTTA (2004)	50

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
1.1	RELEVÂNCIA DO TEMA.....	11
1.2	OBJETIVOS E ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO.....	13
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15
2.1	INTRODUÇÃO	15
2.2	NÍVEIS DE PLANEJAMENTO LOGÍSTICO	15
2.3	MODELOS PARA LOCALIZAÇÃO DE INSTALAÇÕES	16
2.4	O MODELO DE GEOFFRION & GRAVES.....	22
2.4.1	Índices	22
2.4.2	Variáveis.....	23
2.4.3	Parâmetros	23
2.4.4	Função Objetivo	23
2.4.5	Restrições	24
2.5	APLICATIVOS DE OTIMIZAÇÃO DISPONÍVEIS NO MERCADO	25
2.6	CONCLUSÃO DO CAPÍTULO.....	26
3	O MODELO MATEMÁTICO	29
3.1	INTRODUÇÃO	29
3.2	A METODOLOGIA PARA DESENVOLVIMENTO DO MODELO	29
3.3	O MODELO CONCEITUAL	32
3.3.1	Índices	33
3.3.2	Variáveis.....	33
3.3.3	Parâmetros	33
3.3.4	Função Objetivo	37
3.3.5	Restrições	39
3.4	APLICABILIDADE DO MODELO	40
3.4.1	Modelos com mais de quatro elos	40
3.4.2	Quando existem vendas de produto nos elos intermediários	42
3.4.3	Quando o elo k é um Centro de Distribuição	43
3.4.4	Incidência da taxa de câmbio	43
3.4.5	Incidência de benefícios fiscais	44
3.5	IMPLANTAÇÃO DO MODELO USANDO O APLICATIVO EXCEL ...	45

3.6	ESTUDO COMPARATIVO DE MODELOS DE LOCALIZAÇÃO	49
3.7	CONCLUSÃO DO CAPÍTULO.....	52
4	APLICAÇÃO	54
4.1	APLICAÇÃO EM UM CASO REAL.....	54
4.2	RESULTADOS.....	57
4.2.1	Distribuição dos custos.....	57
4.2.2	Impacto dos impostos e benefícios fiscais	58
4.3	ANÁLISE DE SENSIBILIDADE	59
4.3.1	Variação da demanda	59
4.3.2	Flutuação da taxa de câmbio	60
4.3.3	Impacto do Mercosul na malha logística	61
4.3.4	Nível de Serviço	61
4.3.5	Implantação de fábricas de produto intermediário e acabado na Bahia ..	62
4.4	DESEMPENHO COMPUTACIONAL	62
4.5	CONCLUSÃO DO CAPÍTULO.....	63
5	CONCLUSÕES FINAIS E RECOMENDAÇÕES	64
6	REFERÊNCIAS	66

1 INTRODUÇÃO

1.1 RELEVÂNCIA DO TEMA

Desde a revolução industrial o foco das empresas tem mudado radicalmente ao longo dos tempos. A redução de custos perseguida inicialmente foi substituída pelo aumento da demanda através de propaganda massiva. Em seguida, com o crescente domínio dos japoneses em vários segmentos, a qualidade do produto tornou-se uma prioridade. Com a qualidade do produto dominada, o foco migrou para a qualidade do serviço e conseqüente redução dos tempos de desenvolvimento dos produtos e das entregas (IBM, 2004). Com o recente advento da Internet, as vendas virtuais tornaram-se o grande desafio no aprimoramento das cadeias de suprimentos. Mas, na evolução do foco das empresas, uma coisa sempre permeou todo o processo: a globalização como fator vital para a manutenção da competitividade das empresas (BHUTTA, 2004).

O crescimento sustentado e a conquista de novos mercados levaram a problemas novos não percebidos em escala regional ou a problemas antigos, mas amplificados pelos novos desafios impostos pelos mercados globais, tais como o domínio de novas línguas, a adequação do produto a culturas e necessidades diferentes e o aumento na complexidade da logística de distribuição (BHUTTA, 2001). Essa complexidade fez com que as vantagens das empresas se tornassem temporárias (FINE, 1999).

No mundo natural, as espécies evoluem e se transformam para enfrentar novos desafios. Segundo FINE, o mesmo imperativo genético atua no ambiente das empresas: a fim de sobreviver, as empresas devem ser capazes de se antecipar e de se adaptar às mudanças, de modo a não se defrontar com a extinção rápida e brutal. Para conquistar essa sobrevivência e, preferencialmente, a liderança setorial, esse autor defende que o projeto das empresas deve simultaneamente contemplar os produtos, os processos e a cadeia de suprimento (a chamada engenharia sincrônica tridimensional – ES3-D). Esse raciocínio implica em mudanças significativas nas leis de mercado: a competição que foi por muito tempo entre

produtos ou empresas está migrando atualmente para a competição entre cadeias de suprimento.

Para uma empresa sobreviver – para não falar em prosperar – três fatores devem ser perseguidos conjuntamente: lucratividade, desempenho e parcerias (IBM, 2004). Essa migração do foco do melhor produto para a melhor malha logística fez com que a famosa lei de Darwin referente à preservação das espécies fosse subvertida a partir da metade do século passado: em gerenciamento da cadeia de suprimentos quem sobrevive atualmente não são os mais fortes, mas os mais precisos, aqueles que se adaptaram às mudanças de mercado e tecnologia, administrando sua cadeia de forma mais eficiente e eficaz (MOHAMED, 1999).

A eficiência da cadeia de suprimentos depende fundamentalmente do desenho de sua malha logística que, segundo OWEN & DASKIN (1998), deve ser definida não simplesmente com base no estado atual do sistema, mas levando em consideração também todo o tempo de vida das instalações selecionadas, as mudanças nos fatores ambientais, populacionais, a evolução esperada para a demanda e demais fatores que impactam o desempenho operacional logístico e o atendimento aos clientes.

A quantidade enorme de variáveis que devem ser consideradas é o que torna o problema de otimização de uma cadeia logística de difícil resolução (BALLOU, 1998).

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 já chegue a 90% atualmente. E para o caso das empresas transnacionais com objetivos de expandir seus horizontes comerciais, o problema de localização de novas unidades industriais, fornecedores e CDs em diferentes mercados torna-se muito mais importante (BIJAYAMADA & CHAKRAVARTY, 1994).

Talvez por isso, percebe-se um grande aumento nos modelos matemáticos desenvolvidos recentemente que objetivam a otimização da localização de instalações de empresas transnacionais (BHUTTA, 2004).

Fatores como flutuação da demanda, custos de produção fixos e variáveis, custos de distribuição e armazenagem, benefícios fiscais, variações de câmbio e outros tornam

a decisão de localização de fábricas normalmente complexa, o que faz com que as decisões sejam tomadas de forma subjetiva, sem levar em consideração que o sistema é composto por vários subsistemas interligados. 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. GUALDA (1995) também demonstra essa necessidade e comenta como a abordagem sistêmica pode ser implementada através da decomposição dos sistemas e subsistemas. Considerando-se modelos de otimização que contemplam uma escala global, a consideração sistêmica de todos os fatores envolvidos torna-se fundamental. Percebe-se que esse enfoque nem sempre é aplicado nos modelos disponíveis na literatura (BHUTTA, 2004).

Nos problemas de localização de instalações em escala mundial, especificamente, pode ser verificada a inclusão de outros fatores que afetam a tomada de decisão quando tratamos de globalização, tais como flutuação das taxas de câmbio, os custos do capital, flutuação das taxas de juros e instabilidade política dos países (HADJINICOLA & KUMAR, 2002).

Os fatores que devem ser considerados, tais como benefícios fiscais, variações cambiais e de inflação, dificuldades operacionais regionais, nível de serviço e outros exigem que o problema seja resolvido por modelos matemáticos amparados por ferramentas computacionais. Essas ferramentas devem ser, preferencialmente, de fácil utilização.

1.2 OBJETIVOS E ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Este trabalho tem como principal objetivo propor um modelo matemático para a solução do problema de localização de instalações em escala mundial que possa ser usado em um software de domínio público, de fácil utilização, que apresente resultados de uma forma rápida e que possa contribuir com o conhecimento científico trazendo novas idéias para o tratamento do gerenciamento de inventário e dos custos incorridos em um desenho de malha logística em âmbito global.

O modelo deverá auxiliar no planejamento tático no caso de definição do fluxo de fornecimento entre as fábricas, CDs e mercados ou no planejamento estratégico das empresas quando o foco for a definição de novas instalações e/ou parceiros de fornecimento.

Para tanto, a organização deste trabalho será desenvolvida da seguinte forma:

- **Capítulo 2:** revisão bibliográfica referente à modelagem para resolução de problemas de localização de fábricas e depósitos em escala global. Fará parte deste capítulo a evolução histórica do conhecimento científico sobre o tema, os tipos de modelos existentes e a sua caracterização;
- **Capítulo 3:** apresentação do modelo matemático conceitual. Neste capítulo será apresentado o modelo matemático conceitual detalhado, bem como a metodologia usada para desenvolvimento do modelo e um comparativo entre os modelos propostos anteriormente e o modelo foco deste trabalho;
- **Capítulo 4:** aplicação do modelo proposto em uma empresa transnacional do segmento químico, com detalhamento dos resultados obtidos e análises de sensibilidade. Também serão apresentadas neste capítulo as conclusões sobre os fatores mais importantes na definição da malha logística da empresa estudada;
- **Capítulo 5:** Conclusão final deste estudo e recomendações para futuros desdobramentos e complementações do estudo aqui apresentado.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo será apresentada uma revisão da literatura atual que trata da resolução de problemas de localização de fábricas e depósitos que atendem mercados em diferentes países. É também escopo deste capítulo uma apresentação da evolução histórica do conhecimento científico referente a esta linha de estudo da Pesquisa Operacional no Brasil e no exterior, os tipos de modelos existentes e a sua caracterização.

2.2 NÍVEIS DE PLANEJAMENTO LOGÍSTICO

Anthony (*apud* HAX & CANDEA, 1984) classificou as decisões conforme o nível do planejamento considerado: planejamento estratégico, controle gerencial e controle operacional. Essa classificação baseia-se principalmente no horizonte de planejamento e o detalhamento que estão sendo avaliados.

BALLOU (1998), ao apresentar 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, também defende a necessidade de uma hierarquia de decisões representada por níveis de planejamento atrelados ao horizonte de tempo em foco. Dependendo do tipo de problema e horizonte de planejamento envolvido, BALLOU propõe uma estratificação desses modelos nos seguintes níveis de decisão:

- **Nível Estratégico** – Horizonte de tempo mais longo (normalmente maior do que um ano), dados geralmente agregados e maior nível de flexibilidade. Neste nível encontram-se as decisões relacionadas, normalmente, à determinação do número, tamanho e localização de fábricas e depósitos;
- **Nível Tático** – Horizonte de tempo entre meses e um ou dois anos, mistura de dados agregados e detalhados e nível de flexibilidade intermediário.

Neste nível é definida, normalmente, a alocação dos clientes aos Centros de Distribuição (CDs) e dos CDs às fábricas;

- **Nível Operacional** – O horizonte pode se situar entre horas e semanas, dados detalhados e flexibilidade muito pequena já que o tempo de resposta disponível é mínimo. Neste nível são elaborados os planos de contingência onde se pretende realocar de forma ótima os clientes no caso, por exemplo, da parada de uma linha de produção em uma fábrica e, também, decisões relacionadas a onde se posicionar os estoques e/ou que tamanho de caminhão usar na distribuição.

A totalidade dos modelos para localização de instalações estudada cobre apenas os níveis de planejamento estratégico e tático já que esses modelos ajudam nas decisões com impacto de médio e/ou longo prazo.

O nível de decisão operacional aplica-se, basicamente, quando tratamos de consolidação de cargas, roteirização de veículos, coleta e arrumação dos estoques, liberação dos pedidos, etc., ou seja, decisões que impactam o curto prazo.

2.3 MODELOS PARA LOCALIZAÇÃO DE INSTALAÇÕES

As possíveis aplicações para os modelos de localização são muito amplas e os primeiros trabalhos encontrados na literatura são da década de 60: KUEHN, HAMBURGER (1963), EFROYMSON, RAY (1966) e SPIELBERG (1969). Nestas últimas quatro décadas, muito tem sido estudado e vários modelos têm sido desenvolvidos para localização de depósitos ou CDs tanto lá fora (RICARDO, 1971; GEOFFRION & GRAVES, 1974; GEOFFRION & POWERS, 1980; GEOFFRION, 1987/1988; LOVE et al, 1988; SYAM, 2000) como no Brasil (MEDINA, 1996; MARTOS, 2000; YOSHIZAKI, 2002; LACERDA, 2005; BRITO, 2004; VALLIM, 2004). A grande maioria dos trabalhos analisados foi desenvolvida para estudos acadêmicos com aplicações práticas esporádicas (BRAKLOW, 1992; HAUG, 1992; MOHAMED, 1999), mas alguns modelos criados em ambiente acadêmico evoluíram para aplicações comerciais (MANUGISTICS, 2006; I2, 2006; SMARTOPS, 2006).

Dos modelos encontrados que envolviam localização em escala global, nenhum deles foi desenvolvido no Brasil.

Dentre esses modelos podem ser citados em seqüência cronológica:

- (1980) – TONG, WALTER
- (1984) – HODDER, DINCER
- (1985) – HAUG
- (1985) – HODDER, JUCKER
- (1991) – ALLEN
- (1992) – HAUG
- (1994) – BIJAYAMADA, CHAKRAVARTY
- (1996) – CANEL, KHUMAWLA
- (1996) – KIRCA, KOKSALAN
- (1996) – MIN, MELACHRINOUDIS
- (1997) – MEIJBOOM, VOS
- (1999) – MOHAMED
- (2001) – FLIPO
- (2001) – BHUTTA
- (2002) – HADJINICOLA, KUMAR
- (2002) – VERTER
- (2002) – SYAM
- (2003) – RIOS

Todos os autores acima 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.

BHUTTA (2004) faz uma excelente revisão dos modelos globais usados para a decisão de localização de fábricas e compara os modelos existentes (vide tabela 1). No capítulo 3.6, o estudo de BHUTTA é complementado com o modelo proposto neste trabalho e inclui, ainda, a análise do número de elos coberto pelos modelos.

Tabela 1 - Modelos globais de localização (BHUTTA, 2004)

Autor	Haug (1985)	Kirca & Kokasalan (1996)	Min & Melachrinoudis (1996)	Canel & Khumawala (1996)	Mohamed (1999)	Bhutta (2001)	Filipo (2000)	Hadjinicola & Kumar (2002)	Syan (2002)	Verter (2002)
Tipo do modelo	PLIM	PL	Programação por metas	PLIM binário	PLIM	PLIM	Modelo de redes	Programação por metas	Simulated Annealing	Algoritmo próprio
Objetivo	Max Lucro	Max Lucro	Max lucro depois dos impostos	Max Lucro	Minimizar custo	Max Lucro	Minimizar custo	Max Lucro	Minimizar custo	Minimizar custo
Número de Períodos	2	12	3	4	3	3	12	1	1	1
Número de Instalações	2	1	5	5	2	3	10	3	3	13
Mercados	1		1	6	3	4			2	49
Produtos	1	1	1	1	1	2	16	1	1	1
Fatores considerados										
Demanda	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim
Capacidade	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim
Investimento		Sim	Sim	Sim				Sim	Sim	Sim
Inflação		Sim			Sim	Sim				
Taxa de câmbio			Sim	Sim	Sim	Sim		Sim		
Tarifas/Impostos				Sim		Sim				

KIRCA e KOKSALAN (1996) são os primeiros a incluírem a inflação como fator a ser considerado. Foram 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. Em 2003, BHUTTA, em conjunto com outros autores, apresenta esse modelo revisado e ampliado, mas ainda limitado a uma abordagem que abrange apenas dois elos da cadeia, a saber: centro produtor e mercados. BHUTTA et al (2003) apresentam um modelo temporal para localização de plantas industriais em escala global que contempla várias das variáveis importantes ligadas à globalização, tais como taxas de câmbio, custos de inventário, custos de instalação e desmobilização de fábricas.

SMITS (2001) faz uma excelente avaliação dos modelos para projetos de redes de distribuição e apresenta uma vasta revisão da literatura existente, mas não faz separação entre os modelos para escala global e os modelos regionais. Nesse trabalho são comparados 34 modelos de localização incluindo o proposto pelo autor do estudo e cria uma taxonomia a partir de 14 atributos diferentes.

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), SMITS (2001) e BHUTTA (2004).

SHAPIRO (2001), após uma apresentação dos vários modelos existentes na literatura, também aponta a PLIM como a mais promissora para a localização de instalações, opinião compartilhada também por autores brasileiros: WANKE (2001) e LACERDA (2005).

Em 1995 GEOFFRION e POWERS apontavam que, em 90% dos casos, os modelos criados para a localização de instalações optavam pela PLIM como algoritmo de otimização. Atualmente estima-se que o percentual de modelos que usam PLIM seja menor devido ao recente crescimento de pesquisas para o aprimoramento de heurísticas e metaheurísticas, tais como algoritmo genético, colônia de formigas, Lista Tabu, redes neurais e outras. Essas heurísticas vêm recentemente ganhando destaque devido ao aumento na complexidade dos problemas e necessidade de se

reduzir o tempo de resolução apesar da perda na optimalidade das soluções (VALLIM, 2004).

Dentre os modelos de localização mais comuns, encontram-se aqueles com foco na decisão de localização de CDs em escala regional. Modelos construídos para solução de problemas que envolvem localização de fábricas em escala global que possam atender a empresas transnacionais são menos frequentes (vide tabela 1) e a grande maioria deles simplifica o problema para uma cadeia de valor de, no máximo, três elos (centro produtor, centro de transbordo e centro consumidor).

GEOFFRION & GRAVES (1974) desenvolveram um modelo usando PLIM para a localização de CDs que serviu de base para muitos outros que se seguiram. GEOFFRION aplicou este mesmo modelo em outro caso em 1976. No capítulo 3.4, este modelo será detalhado já que ele também será base para o desenvolvimento do modelo apresentado neste trabalho. GEOFFRION & GRAVES posteriormente comentam em 1980 e 1990 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. Outro trabalho que também avalia e apresenta métodos para solucionar o problema de localização é o de LOVE et al (1988). São apresentados modelos diversos e feitas considerações sobre o gerenciamento adequado das capacidades mínimas e máximas de CDs.

O modelo de YOSHIZAKI (2002) contempla três elos da cadeia (centro produtor, centro distribuidor e centro consumidor) e analisa os dados sob o ponto de vista do cliente final. Nesse trabalho atesta-se a importância da análise dos impostos na definição de uma malha logística.

O trabalho de PANTALENA (2004) analisa o caso de uma empresa química semelhante e apresenta um modelo de PLIM para localização de CDs no Brasil. O modelo engloba três elos da malha logística (centros produtor, distribuidor e consumidor), mas foi desenhado para contemplar apenas um centro produtor. O estudo analisa o impacto dos impostos na definição de localização em escala regional sob o ponto de vista do fornecedor e traz interessantes conclusões sob a influência desses impostos na definição de uma malha no Brasil. Seu trabalho baseia-se no trabalho desenvolvido por YOSHIZAKI (2002) com várias adaptações.

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 plantas industriais ou depósitos.

DOGAN, K. e GOETSCHALCKX, M. (1999) apresentam um modelo para quatro elos da cadeia (fornecedor, primeiro e segundo estágios de produção e consumidor final) que considera os vários fatores de custo fixos e variáveis em uma cadeia de suprimento, mas não os custos relacionados a impostos e impactos referentes a benefícios fiscais. Eles apresentam um modelo bastante completo de localização para sistemas de distribuição-produção multi-período com vendas sazonais e uma heurística interessante baseada no algoritmo de decomposição de Benders que, a partir de algumas adaptações e melhorias no algoritmo, conseguiu reduzir o tempo de processamento em 480 vezes se comparado com o algoritmo de Benders padrão (BENDERS, 1962). Por não incluir fatores globais, tais como impostos, taxas de inflação e câmbio, este modelo não é adequado para localização de instalações em escala global, mas funciona muito bem para aplicações regionais.

No Brasil, foram várias as aplicações da PLIM no estudo de modelos de localização: MEDINA (1996) criou um modelo para dimensionamento de frota e localização de embarcações para atendimento de acidentes marítimos que utiliza o PLIM para resolução do problema, mas o combina também com um modelo probabilístico usando o aplicativo Arena[®] da *Rockwell Software* como ferramenta de simulação.

MARTOS (2000) elaborou um projeto de redes logísticas com consideração de estoques e modais para a indústria petroquímica.

NAZAR (2003) desenvolveu uma metodologia para resolução do problema de planejamento de serviços no transporte intermodal que leva em conta o nível de serviço oferecido.

BRITO (2004) faz uma análise do impacto logístico de diferentes regimes aduaneiros no abastecimento de itens aeronáuticos visando identificar quais produtos devem seguir diretamente dos fornecedores e quais devem sofrer uma etapa de transbordo a partir dos custos de transporte, impostos e custos de carregamento dos estoques.

VALLIM (2004) apresenta um modelo para localização de CDs que pode ser aplicado a empresas de vendas no varejo. A solução é obtida em duas fases: uma primeira análise estratégica que fornece a localização ótima através de PLIM e

Simulated Annealing que depois é complementada com a definição da quantidade ótima de CDs a partir de parâmetros de custos de estoque e armazenagem.

2.4 O MODELO DE GEOFFRION & GRAVES

O modelo de GEOFFRION & GRAVES (1974) foi desenvolvido e aplicado com sucesso para um problema de localização de uma empresa americana do ramo alimentício, a *Hunt-Wesson Foods*. O modelo é multi-produto, período único e aborda o problema clássico para localização de depósitos: atender uma demanda conhecida por produto, por região de consumo a partir de CDs dedicados que são supridos por diversas fábricas com capacidades de produção identificadas por produto. A aplicação contemplou 14 fábricas, 17 produtos, 45 possibilidades de CDs e 121 mercados e mostrou que a técnica de solução baseada na decomposição de Benders pode ser usada com sucesso. Neste modelo, são considerados três elos da malha logística da empresa: centro produtor, centro distribuidor e centro consumidor (figura 1).

Figura 1 – Elos considerados no modelo de Geoffrion & Graves (1974)

A formulação matemática é apresentada a seguir.

2.4.1 Índices

***j* [o]** ... Unidades industriais que suprirão os CDs

***k* [p]** ... CDs com potencial para serem usados

***l* [q]** ... Mercados consumidores dos produtos finais

***m* [r]** ... Produtos finais que atenderão a demanda dos mercados *l*

2.4.2 Variáveis

$Trns_{jklm}$ = volume do produto i enviado da fábrica j para mercado l através do CD k

Z_{kl} = assume valor 1 se o CD k servir o mercado l ou 0 em caso contrário

Z_k = assume valor 1 se o CD k for aberto ou 0 em caso contrário

2.4.3 Parâmetros

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

Cap_{jm} = capacidade anual da fábrica j para o produto m

$CusT_{jklm}$ = custo unitário médio para transportar o produto m do centro produtor j para o centro de consumo l através do centro de distribuição k

$CusB_k$ = Custo unitário variável a ser agregado no centro de distribuição k devido ao transbordo

$CusFix_k$ = Custo fixo (\$/ano) para operar o centro de distribuição k

$MinV_k$ = Mínimo volume admissível para o centro de distribuição k

$MaxV_k$ = Máximo volume admissível para o centro de distribuição k

2.4.4 Função Objetivo

min CT

$$CT = \sum_{jklm} (CusT_{jklm} \times Trns_{jklm}) + \sum_k \left(CusFix_k \times Z_k + CusB_k \times \sum_{lm} Dem_{ml} \times Z_{kl} \right) \quad (1)$$

A função objetivo está dividida em dois segmentos de custos: a primeira parte da função representa os custos de transporte e a segunda, os custos referentes à manutenção dos CDs (custos fixos anuais caso o CD seja usado e os custos variáveis referentes ao transbordo do produto m ao passar pelo CD k quando está sendo transferido para o mercado l).

2.4.5 Restrições

- Atender à demanda prevista:

$$Dem_{ml} x Z_{kl} = \sum_j Trns_{jklm} \quad \forall k, l, m. \quad (2)$$

- Capacidade produtiva da fábrica j para o produto m :

$$\sum_{kl} Trns_{jklm} \leq Cap_{jm} \quad \forall m, j. \quad (3)$$

- Exclusividade dos CDs k no atendimento aos mercados l :

$$\sum_k Z_{kl} = 1 \quad \forall l. \quad (4)$$

- Atendimento dos volumes mínimos e máximos nos CDs k :

$$MinV_k x Z_k \leq \sum_{ml} Dem_{ml} x Z_{kl} \leq MaxV_k x Z_k \quad \forall k. \quad (5)$$

- Outras Restrições que tenham configuração linear. Geoffrion & Graves sugerem, por exemplo, uma restrição de nível de serviço conforme segue:

$$(\sum_{kl} t_{klm} x Dem_{ml} x Z_{kl}) / \sum_l Dem_{ml} \leq T_m \quad \forall m. \quad (6)$$

Onde t_{klm} é o tempo médio para fazer uma entrega do produto m no mercado l após o recebimento de uma ordem no CD k , e T_m é o tempo limite desejado para o tempo de entrega médio do produto m .

2.5 APLICATIVOS DE OTIMIZAÇÃO DISPONÍVEIS NO MERCADO

Desde a década passada, percebe-se um aumento crescente em aplicativos comerciais que oferecem algoritmos de otimização ou heurísticas para o planejamento otimizado da cadeia logística de empresas: os sistemas chamados APS, *Advanced Planning and Scheduling* (SAP, 2006).

Os mais antigos, o I2 (I2, 2006) e o *Manugistics* (MANUGISTICS, 2006), por um bom tempo competiram entre si praticamente sozinhos no mercado americano (e posteriormente mundial) apresentando soluções para otimizar o planejamento das empresas que, até então, era apenas baseado no conceito MRP II (SHAPIRO, 2001). Atualmente apenas a empresa MANUGISTICS mantém escritório no Brasil comercializando e implantando as suas soluções para otimização.

Esses aplicativos foram elaborados de forma a cobrir vários elos da cadeia de valor das empresas e usam até hoje um misto de programação linear inteira e heurísticas para a resolução dos problemas. Com a complexidade da malha de distribuição das empresas, essas empresas perceberam o potencial oferecido para otimização de fretes e começaram a incorporar também soluções para esse tipo de problema (I2, 2006; MANUGISTICS, 2006).

O APO, *Advanced Planning Optimizer*, oferecido pela empresa SAP (SAP APO, 2006) foi desenvolvido para complementar os módulos de planejamento do sistema SAP R/3 e para competir com as empresas mencionadas acima. Enquanto os módulos de planejamento do SAP R/3 consideram a capacidade infinita e apenas indicam quando a carga excede a capacidade, o APO oferece mecanismos para a melhor tomada de decisão nos casos de restrições nas capacidades de produção e/ou transporte. Oferecido em módulos que se adicionam ao SAP R/3, essa ferramenta oferece mecanismos que auxiliam na coleta das previsões de venda, mas, principalmente, na otimização do planejamento da empresa em seus vários níveis. O módulo de previsão (DP, *Demand Planning*) apresenta cerca de 40 técnicas de previsão qualitativa (método Delphi, curva de crescimento) e quantitativa (regressão, múltipla regressão, modelos econométricos) para melhorar a acuracidade das previsões. Os módulos de planejamento fazem otimização do planejamento de vendas e operações no nível estratégico (módulo SNP, *Supply*

Network Planning) e nos níveis tático e operacional (módulos PP/DS, *Production Planning and Detailed Scheduling* e TPVS, *Transport Planning and Vehicle Scheduling*). Algumas empresas como a Johnson & Johnson e a Nestlé usam o SAP APO no Brasil.

Há pouco mais de seis anos, uma nova empresa entrou no mercado americano oferecendo comercialmente mais uma ferramenta de otimização: o MIPO (SMARTOPS, 2006). Este aplicativo calcula o nível de estoque ótimo em cada ponto da cadeia dada a malha logística da empresa, a demanda esperada, a variabilidade da demanda e fornecimento em cada ponto e o nível de serviço esperado. Apesar da sua pouca idade, a empresa já conseguiu clientes de peso, vários deles entre a lista das 500 maiores empresas do planeta divulgada pela revista Fortune (SMARTOPS, 2006). No Brasil, a empresa CATERPILLAR tem planos de estender a implantação desta ferramenta nas unidades locais.

Através de pesquisas com as próprias empresas e consultorias de implementação desse tipo de ferramenta (ACCENTURE, IBM *Business Consulting Services*, PROCWORK) detectou-se que, em todos os casos analisados, os aplicativos disponíveis no mercado que oferecem otimização como integrante do pacote de soluções exigem investimentos da ordem de, pelo menos, dezenas ou, na maioria dos casos, centenas de milhares de dólares considerando os custos do software, hardware, treinamento e consultoria de implementação.

2.6 CONCLUSÃO DO CAPÍTULO

A literatura a respeito de modelos de localização é vasta e abrangente. Até a década de 90, predominavam os modelos baseados em Programação Linear Inteira Mista, mas, recentemente, houve um crescimento acelerado dos modelos baseados em metaheurísticas.

A grande maioria dos modelos de localização é usada para o planejamento estratégico e, em alguns casos, para o planejamento no nível 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 centros produtores e/ou centros distribuidores.

São poucos os trabalhos cujo foco volta-se para o posicionamento do produto nos mercados que potencializam a maximização dos lucros. Na maioria dos problemas propostos estudados, a função objetivo prevê a minimização dos custos.

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 otimização do giro de estoque. Apesar de relativamente recente, a preocupação com o nível de serviço, por exemplo, já tem feito parte dos modelos, mas apenas como condição de restrição e não como parte da função objetivo. Com a crescente necessidade de atendimento da demanda com qualidade aceitável e dentro de tempos e precisão de entrega melhores do que a concorrência, o autor acredita que esta preocupação deverá tornar-se mais recorrente em modelos a serem desenvolvidos no futuro.

O cálculo do custo para o carregamento dos estoques tem sido cada vez mais incorporado nos modelos de localização por ser reconhecido como de importância tática e estratégica, além de ter se tornado um componente de custos importante na malha logística das empresas. Apesar disso, dentre os modelos estudados, todos consideram o cálculo do estoque a partir de um custo unitário aplicado ao inventário final de cada período. Esse custo não é considerado para modelos de período único e, pelo menos nos casos estudados, o giro de estoque não tem sido aplicado para o cálculo de custo do carregamento do estoque.

Outra variável que vem crescendo em importância em trabalhos de localização é a referente ao impacto dos impostos no desenho final da malha logística. Já são vários os trabalhos no Brasil e no exterior que abordam o tema e incluem esse tipo de parâmetro na proposta de solução.

No mercado são oferecidos alguns aplicativos que se propõe a otimizar a malha logística das empresas tanto internamente (planejamento da produção), como externamente (planejamento da distribuição) cobrindo vários elos da cadeia, mas os

investimentos exigidos para a implantação desses tipos de ferramenta são significativos.

Este trabalho pode ser considerado um dos primeiros, senão o primeiro modelo desenvolvido no Brasil para solucionar o problema de localização de fábricas e/ou depósitos em escala global.

Nos capítulos seguintes serão apresentados o modelo proposto, a aplicação do modelo em um caso real, as análises de sensibilidade feitas e as conclusões desse trabalho complementadas por recomendações para futuros estudos.

3 O MODELO MATEMÁTICO

3.1 INTRODUÇÃO

Este capítulo propõe a solução para o problema de localização de unidades industriais e fornecedores em escala global usando um modelo de programação linear inteira mista que considera vários elos na cadeia, bem como os vários fatores que influenciam a decisão. Almeja-se que o modelo a ser criado seja de fácil utilização e possa ser implementado nas empresas sem a necessidade de grandes investimentos. Para atestar a boa aplicabilidade do modelo, será feito um comparativo qualitativo entre o modelo em foco e outros apresentados por vários autores. Pretende-se que o modelo se torne útil para ajuda na tomada de decisões de localização de fábricas ou depósitos em escala global em corporações transnacionais que estejam em processo de definição de sua malha logística.

Neste capítulo serão detalhados o modelo matemático, a metodologia utilizada e a relação desse método com os trabalhos encontrados na literatura a esse respeito.

3.2 A METODOLOGIA PARA DESENVOLVIMENTO DO MODELO

O estudo que inspirou o trabalho de graduação de PANTALENA (2004) e que acabou evoluindo para o presente modelo foi o de YOSHIZAKI (2002) que usa um modelo de GEOFFRION, GRAVES (1974) adaptado para provar a importância da análise dos impostos na definição de uma malha logística. O modelo básico a ser adotado é o mesmo de GEOFFRION, GRAVES que usa um modelo de PLIM (Programação Linear Inteira Mista) para minimizar os custos fixos e variáveis de uma malha logística (vide capítulo 2.4). O modelo de GEOFFRION, GRAVES recomenda a abertura ou fechamento de CDs a partir de uma lista de instalações pré-selecionadas. O resultado do modelo fornece uma solução ótima que satisfaz toda a demanda usando como restrição as capacidades produtivas e de armazenamento

nos CDs. Para a abertura de um CD impõe-se uma demanda mínima que, caso não alcançada, impede a abertura do mesmo.

Uma restrição forte desse modelo é o de que todas as mercadorias para um determinado cliente devem ser atendidas sempre de um mesmo CD. Além disso, o modelo considera apenas a localização de centros distribuidores (os centros produtores são fixos) e não leva em conta os possíveis impactos relacionados a taxas de câmbio. No modelo a ser apresentado, a restrição referente ao atendimento exclusivo de um mercado por determinado CD vai ser suprimida, as taxas de câmbio vão ser consideradas e mais elos serão incluídos na modelagem (figura 2).

Figura 2 – Elos a serem considerados no modelo a ser apresentado

Os custos referentes a impostos não estão segregados e, portanto, devem ser consolidados nos custos de transferência. Estas deficiências do modelo para o problema a ser atacado foram eliminadas através da retirada da restrição referente à relação biunívoca entre elos produtores, distribuidores e mercados e da inclusão de parâmetros de taxa de câmbio que serão usados nas análises de sensibilidade. Os custos de distribuição (frete, taxas e impostos) estão segregados no modelo o que possibilita um melhor entendimento do impacto desses fatores no custo logístico total.

Outra diferença do modelo de GEOFFRION e GRAVES é o não tratamento dos inventários e seus custos associados. Dentre os custos logísticos, o fator inventário é um dos mais importantes já que ele afeta diretamente os dois indicadores principais da performance de uma cadeia de suprimentos: o nível de serviço ao cliente e o giro de estoque da cadeia. O primeiro mede a qualidade no atendimento e, indiretamente, o nível de satisfação dos clientes, enquanto que o segundo indicador representa o quão bem estão sendo gerenciados os inventários da companhia que, atualmente, tem se tornado o ativo mais importante e o mais representativo em termos de capital empregado. Um bom gerenciamento de inventários otimiza o fluxo de caixa das empresas reduzindo os seus riscos.

Segundo CHRISTOPHER (2002) mais de 50% do ativo circulante das empresas freqüentemente será encontrado nos estoques. Na empresa usada para a aplicação do modelo proposto neste estudo, por exemplo, o inventário médio anual situa-se em torno de US\$ 150 milhões apenas no Brasil.

Por conta dessa percepção crescente da importância dos estoques, há uma preocupação recorrente nos modelos mais recentes de retratar os custos de inventário: BHUTTA (2001), FLIPO (2001), SYAM (2002), VALLIM (2004).

Para tratar os custos de carregamento do inventário, foi desenvolvida uma metodologia não encontrada em outros modelos que leva em conta o giro de estoque esperado e os volumes de estoque que estão sendo recebidos pelas fábricas. Optou-se por essa metodologia porque esse indicador de performance de administração do inventário é amplamente utilizado na empresa objeto da aplicação do modelo e aceito nacional e internacionalmente por várias empresas de vários segmentos. O indicador de giro de estoque pode também ser adaptado para medir a cobertura do estoque através da inversão da fórmula utilizada para calculá-lo. Para calcular o giro, deve-se dividir o custo das mercadorias vendidas, transferidas ou consumidas durante o ano pelo valor médio investido na formação do estoque.

Alguns dos modelos encontrados na literatura preocupam-se com a maximização da lucratividade da empresa através do aproveitamento dos mercados com maior margem de contribuição. Como a política de preços da maioria das companhias que fabricam produtos de alto valor agregado depende principalmente da aceitação tecnológica do produto e de estratégias de *market share* e não dos custos incorridos, optou-se por um modelo que minimize custos. Para o caso de problemas em que o desejo é a maximização dos lucros, o modelo pode ser facilmente adaptado bastando, para tanto, acrescentar na função objetivo os parâmetros de preço que deverão ser subtraídos dos fatores de custo para o cálculo da margem.

Todas as variáveis, capacidades e custos são dados em unidades padrões que podem ser calculadas baseadas em:

- Princípio ativo que compõe o produto acabado (para empresas do segmento químico/farmacêutico);
- Matéria prima que apresenta restrições (para empresas manufactureiras que apresentam gargalos em seus fornecedores);

- Unidade usada para o planejamento agregado da empresa (qualquer tipo de empresa).

Para produtos químicos ou farmacêuticos, os valores deverão ser colocados em unidades de volume do princípio ativo principal que é usado para a fabricação do produto acabado.

No caso de uma indústria manufatureira, caso haja uma matéria prima específica com problemas de suprimento que limita e define os volumes produzidos na cadeia, o volume desta matéria prima será usado como unidade padrão.

Em qualquer dos casos, pode-se adotar a unidade usada para o planejamento agregado da empresa e os custos, restrições, capacidades, etc. deverão ser ajustados para essa unidade. Alguns exemplos:

- Montadoras de automóveis: número de veículos;
- Fabricante de aeronaves: número de assentos;
- Fabricante de aspirina: volume de ácido acetil salicílico;

3.3 O MODELO CONCEITUAL

O modelo está baseado no trabalho de GEOFFRION, GRAVES (1974) mantendo a idéia básica e o algoritmo de Programação Linear Inteira Mista. A partir desse modelo básico foram incorporadas as seguintes modificações:

- Inclusão de mais elos na cadeia tratada;
- Substituição dos CDs por fábricas;
- Substituição dos custos de transbordo por custos de transformação;
- Eliminação da restrição que obrigava apenas um elo produtor fornecendo para um elo consumidor;
- Segregação dos custos referentes a impostos;
- Inclusão da taxa de câmbio para cálculo dos custos;
- Inclusão dos custos de inventário a partir do giro de estoque;
- Inclusão de custos de *take-or-pay* que são incorridos quando o consumo de matéria prima é menor do que o acertado com os fornecedores.

Índices

(entre colchetes: nº de elementos da dimensão)

***i* [n]** ... Fábricas próprias ou fornecedores do princípio ativo ou da matéria-prima mais importante que compõe os produtos finais da cadeia de suprimentos em estudo

***j* [o]** ... Unidades industriais com potencial para produzir o produto intermediário que irá compor os produtos finais da cadeia de suprimentos em estudo

***k* [p]** ... Unidades industriais com potencial para produzir os produtos finais da cadeia de suprimentos em estudo

***l* [q]** ... Mercados consumidores dos produtos finais

m* [r]** ... Produtos finais que atenderão a demanda dos mercados ***l

3.3.1 Variáveis

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

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

Dstr_{*ml*} = 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

3.3.2 Parâmetros

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:

$$IM_j = DOH_j \times \sum_i (Trns_{ij} \times CusB_i) / 365 \quad (7)$$

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:

$$IM_k = DOH_k \times \sum_k \{Trns_{jk} \times [\sum_i (CusB_i)/2 + CusB_j]\} / 365 \quad (8)$$

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 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:

$$CC = CF + CM \quad (9)$$

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

CM: custo envolvido com a armazenagem 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 (KIRCA & KOKSALAN, 1996). 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), a saber,

- O custo de manuseio dos estoques (mão-de-obra empregada e custos com equipamentos);
- O custo com o pagamento de prêmios de seguro usados para cobrir possíveis perdas com roubos ou destruição dos produtos estocados;
- Os custos associados com obsolescência dos estoques particularmente importante na indústria alimentícia e química;
- Os custos com possíveis danos ou roubo do material estocado que por ventura não estejam cobertos por seguro;
- Os custos com o prédio usado para estocagem dos produtos manufaturados ou comprados (IPTU, manutenção predial etc).

Tipicamente, o custo de oportunidade financeira nos EUA situa-se em torno de 12% do valor do estoque total. No Brasil, com o alto valor das taxas de juro reais, os custos financeiros são ainda maiores e, reconhecidamente, muito mais representativos para a manutenção do estoque do que os custos associados ao armazenamento (BRITO, 2004).

Como a empresa opera no mercado acionário americano e capta empréstimos ou aplica grande parte do seu caixa naquele país, optou-se por usar o valor de 12% para o custo de oportunidade financeira.

O custo de armazenagem varia muito dependendo do tipo de indústria. Para a indústria química onde o modelo foi aplicado, esse custo gira em torno de 3,0%.

3.3.3 Função Objetivo

$$\min CT$$

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

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

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

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

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

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

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

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

$$+ \sum_j \sum_k ((\sum_i^n Cusb_i / n) + Cusb_j) \times Trns_{jk} \times DOH_k \div 365 \times CC \longrightarrow (9) \quad (10)$$

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

Os números entre parênteses representam as partes da função objetivo que são detalhadas a seguir:

- (1) – Custo de transferência das fábricas *i* para as fábricas *j*. Este custo é calculado através do volume transferido multiplicado pela soma dos custos de frete de transferência e custo de produção unitário do princípio ativo;
- (2) – Custo referente aos impostos e taxas que incidem na transferência do princípio ativo ou matéria-prima básica e que são considerados como despesas (impostos que não podem ser recuperados). Estas taxas e impostos podem ser relacionados ao comércio exterior (impostos de importação e exportação) ou comércio interno dos países (ICMS, IPI, PIS/COFINS no caso brasileiro quando estes não são de valor agregado, isto é, o valor pago não pode ser usado posteriormente como crédito na venda ou transferência do item seguinte da cadeia);

- (3) – Custo de transferência entre as fábricas j e k . Este custo é calculado através do volume transferido multiplicado pela soma dos custos de frete de transferência e custo referente ao valor agregado unitário para se produzir o Produto Intermediário;
- (4) – Custo referente aos impostos e taxas que incidem na transferência do produto intermediário e que são considerados como despesas (impostos que não podem ser recuperados). Estas taxas e impostos podem ser relacionados ao comércio exterior (impostos de importação e exportação) ou comércio interno dos países (ICMS, IPI, PIS/COFINS no caso brasileiro quando estes não são de valor agregado, isto é, o valor pago não pode ser usado posteriormente como crédito na venda ou transferência do item seguinte da cadeia);
- (5) – Custo de transferência dos produtos m das fábricas ou depósitos k para os mercados l . Este custo é calculado através do volume transferido multiplicado pela soma dos custos de frete de transferência e custo referente ao valor agregado unitário para se produzir o Produto Acabado m na fábrica k ;
- (6) – Custo referente aos impostos e taxas que incidem na venda do produto acabado e que são considerados como despesas (impostos que não podem ser recuperados). Estas taxas e impostos podem ser relacionados ao comércio exterior (impostos de importação e exportação) ou comércio interno dos países (ICMS, IPI, PIS/COFINS no caso brasileiro quando estes não são de valor agregado, isto é, o valor pago não pode ser usado posteriormente como crédito na venda ou transferência do item seguinte da cadeia);
- (7) – Total dos custos fixos associado à(s) fábrica(s) cuja(s) abertura(s) o modelo recomende;
- (8) – Custo para carregar-se o inventário (*carrying cost*) nas fábricas de produto intermediário;
- (9) – Custo para carregar-se o inventário (*carrying cost*) nas fábricas de produto acabado ou nos CDs;
- (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 acordado é menor o que leva ao pagamento de um prêmio devido à não aquisição dos volumes acertados em contrato.

3.3.4 Restrições

- Atender à demanda prevista:

$$Dem_{ml} \leq \sum_k Dstr_{mkl} \quad \forall l, m. \quad (11)$$

- Capacidade produtiva do princípio ativo na fábrica i :

$$\sum_j Trns_{ij} \leq Cap_i \quad \forall i. \quad (12)$$

- Capacidade produtiva do produto intermediário na fábrica j :

$$\sum_k Trns_{jk} \leq Cap_j x Z_j \quad \forall j. \quad (13)$$

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

$$\sum_l Dstr_{mkl} \leq Cap_{mk} x Z_k \quad \forall m, k. \quad (14)$$

- Balanço do princípio ativo na fábrica j :

$$\sum_i Trns_{ij} = \sum_k Trns_{jk} \quad \forall j. \quad (15)$$

- Balanço do produto intermediário na fábrica ou depósito k :

$$\sum_j Trns_{jk} = \sum_l \sum_m Dstr_{mkl} \quad \forall k. \quad (16)$$

- Não negatividade:

$$Trns_{ij} \geq 0 \quad \forall i, j.; \quad Trns_{jk} \geq 0 \quad \forall j, k.; \quad Dstr_{mkl} \geq 0 \quad \forall m, k, l. \quad (17)$$

- Variáveis binárias:

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

$$Z_k = \begin{cases} 1, & \text{se a fábrica ou depósito } k \text{ for aberto} \\ 0, & \text{em caso contrário} \end{cases} \quad \forall k \quad (18)$$

3.4 APLICABILIDADE DO MODELO

3.4.1 Modelos com mais de quatro elos

A cadeia de suprimento com quatro elos normalmente atende à maioria das cadeias verificadas na prática.

Para os casos em que a malha logística apresenta mais de quatro elos, pode-se criar facilmente um modelo a partir deste modelo conceitual, seguindo o mesmo raciocínio usado para o modelo base.

Exemplificando: para adaptar o modelo para uma malha logística com cinco elos deve-se seguir o seguinte roteiro:

- Criar um novo índice que representará o novo elo da cadeia de valor (por ex.: ***h***);
- Criar uma nova variável racional positiva (por exemplo, ***Trns_{hi}***), que representará os volumes transferidos da fábrica com índice ***h*** para a fábrica ***i*** (***h*** é o novo primeiro elo da nova cadeia);
- Criar uma nova variável binária para a fábrica ***i*** (***Z_i***), que tem, agora, a opção de ser aberta ou não;

- Criar novos parâmetros, a saber:
 - **Cap_h** = capacidade anual da fábrica **h** em unidades padrões
 - **CusT_{hi}** = custo unitário em \$/unidade Padrão para transportar o princípio ativo ou matéria prima básica do centro produtor **h** para o centro produtor **i**
 - **CusB_h** = Custo unitário \$/Unidade Padrão do princípio ativo fabricado na fábrica **h**
 - **CusFix_i** = Custo fixo (\$/ano) na fábrica **i**
 - **Tax_{hi}** = Taxas e impostos (em %) não recuperáveis para transferir o princípio ativo da fábrica **h** para a fábrica **i**
 - **PrecPA_{ij}** = preço de transferência unitário (\$/Unidade Padrão) do princípio ativo fabricado na fábrica **h** e enviado para a fábrica **i**
 - **DOH_i** = *Days-On-Hand* (cobertura de estoque) esperada da fábrica **i**
- O cálculo dos inventários médios das fábricas **i** e **j**, **IM_i** e **IM_j**, deverão ser corrigidos considerando que eles estão, agora, em elos posteriores da cadeia e, portanto, devem absorver os custos de agregação de valor correspondentes;
- Um novo parâmetro de inventário deverá ser criado, **IM_h**, referente ao inventário médio da fábrica **h**;
- Adaptar a função objetivo adicionando os seguintes componentes na fórmula:

(1) – Custo de transferência das fábricas **h** para as fábricas **i**.

$$\sum_h \sum_i ((CusT_{hi} + Cusb_h) x Trns_{hi}) \quad (19)$$

(2) – Custo referente aos impostos considerados como despesas (impostos que não podem ser recuperados) que incidem sobre o princípio ativo

$$\sum_h \sum_i (PrecPA_{hi} x Tax_{hi} x Trns_{hi}) \quad (20)$$

(3) – Total dos Custos fixos associados à(s) fábrica(s) i cuja abertura o modelo recomende

$$\sum_i (CusFix_i \times Z_i) \quad (21)$$

(4) – Custo para carregar-se o inventário nas fábricas i

$$\sum_h \sum_i (Cusb_h \times Trns_{hi}) \times DOH_i \div 365 \times CC \quad (22)$$

- Incluir as seguintes restrições:

(1) Capacidade produtiva do princípio ativo na fábrica h :

$$\sum_i Trns_{hi} \leq Cap_h \quad \forall h. \quad (23)$$

(2) Balanço do princípio ativo na fábrica i :

$$\sum_h Trns_{hi} = \sum_j Trns_{ij} \quad \forall i. \quad (24)$$

(3) Não negatividade:

$$Trns_{hi} \geq 0 \quad \forall h, i. \quad (25)$$

3.4.2 Quando existem vendas de produto nos elos intermediários

Caso existam vendas de princípio ativo ou produto intermediário na cadeia logística a ser considerada, o modelo pode ser adotado da mesma forma bastando, para tanto, incluir esse(s) produto(s) no elo das fábricas de produto acabado e considerar que os custos de frete, impostos e agregação de valor ao passar de um elo a outro

sejam nulos. As restrições também devem ser ajustadas para que esses produtos não consumam capacidade dos elos seguintes.

3.4.3 Quando o elo k é um Centro de Distribuição

O penúltimo elo da cadeia (k) na explicação do modelo conceitual e na aplicação em um caso real apresentada no capítulo 4 deste trabalho representa uma fábrica onde há a agregação de matérias primas para a confecção do produto acabado.

Caso existam CDs entre as fábricas do produto acabado e os mercados, o modelo pode ser adaptado conforme segue:

- O elo j passa a ser a fábrica responsável pela confecção do produto acabado;
- O elo k passa a ser um centro de distribuição e não mais uma fábrica
- O custo de agregação $\mathbf{CusB}_{km}$ passa a ser o custo unitário \$/unidade padrão para manusear o produto m no CD k ;
- O parâmetro $\mathbf{CusFix}_k$ passa a representar o Custo fixo (\$/ano) do CD k ;
- Todos os demais parâmetros, restrições e fórmulas mantêm-se exatamente iguais. O único cuidado a ser tomado é a substituição das fábricas com índice k por CDs de mesmo índice.

3.4.4 Incidência da taxa de câmbio

A taxa de câmbio no modelo apresentado incide apenas sobre o cálculo dos custos fixos, já que os custos variáveis referentes às matérias primas variam proporcionalmente, por premissa, com a flutuação da taxa do dólar. Caso isso não seja aplicável, o modelo pode ser facilmente ajustado separando-se os custos variáveis em dois fatores: um diretamente proporcional às taxas de dólar e a outra porção atrelada apenas à moeda local.

Os demais parâmetros, variáveis e restrições são mantidos.

3.4.5 Incidência de benefícios fiscais

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 similares ao nosso *drawback* podem ser contemplados pelo modelo.

O *Drawback* é um procedimento aduaneiro que possibilita ao produtor importar insumos sem a incidência de impostos, desde que estes sejam utilizados na fabricação de bens exportáveis. O Regime Aduaneiro Especial de *Drawback* está descrito no Regulamento Aduaneiro e na Portaria 4/97 da Secretaria de Comércio Exterior (SECEX), onde consta a sistemática administrativa / operacional do benefício.

Para adequar o modelo a este procedimento, as variáveis **TRNS_{ij}**, e **TRNS_{jk}** e os parâmetros **Cusb_i** e **Cusb_j** deverão ser duplicados (por exemplo, **TRNS_DB_{ij}**, **TRNS_DB_{jk}**, **Cusb_DB_i** e **Cusb_DB_j**), 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*:

$$\sum_i Trns_{ij} + \sum_j Trns_{jk} \leq \sum_k Dstr_{mkl} \quad \forall \text{destinos } j, k, l \notin \text{Brasil e origens } i, j \notin \text{Brasil} \quad (26)$$

O FUNDAP, Fundo de Desenvolvimento das Atividades Portuárias, foi criado para viabilizar os projetos produtivos restritos às empresas com sede no Espírito Santo, pela Lei Estadual 2.508, regulamentada pelo Decreto 163-N de 15/07/1971. As empresas que optam por trabalhar segundo esta lei possuem inúmeras vantagens referentes à redução de impostos, tais como isenção do pagamento do ICMS na nacionalização, prazo para recolhimento do ICMS de acordo com a legislação do

Estado do Espírito Santo, isenção de despesas de administração, coordenação e execução dos processos de importação e exportação. Maiores informações sobre este benefício podem ser encontradas na página da Internet do porto de Vitória: <http://www.vitoria.es.gov.br/moquecamiga/ingles/negocios/recordes.htm>.

A porção dos benefícios referentes ao FUNDAP que representam isenção ou redução de alíquotas de impostos é considerada no modelo. Os demais benefícios (isenção de despesas, maior prazo para pagamento dos impostos, etc.), como possuem componentes não lineares e, portanto, não podem ser modelados usando PLIM, foram desconsiderados na modelagem, mas, por serem insignificantes, praticamente não devem afetar os resultados obtidos com o modelo aqui apresentado. Esta mesma observação se aplica a outros incentivos brasileiros, tais como os verificados nos estados da Bahia (projeto DESENVOLVE) e Amazonas (Zona Franca de Manaus).

3.5 IMPLANTAÇÃO DO MODELO USANDO O APLICATIVO EXCEL

Um dos objetivos deste trabalho é oferecer um modelo de fácil implementação e que possa ser utilizado por pessoas não especialistas em modelagem. Pensando nisso, optou-se por implantar o modelo usando o aplicativo Microsoft® **Excel** que se tornou a ferramenta para tratamento de planilhas eletrônicas de mais larga utilização nas empresas. O modelo criado será detalhado neste capítulo. Ele contempla fábricas de princípio ativo no primeiro elo, fábricas de produto intermediário no segundo elo e fábricas responsáveis pelo produto acabado no terceiro elo, além dos mercados (quarto elo) que podem consumir vários produtos.

Como o recurso “*Solver*”, *add-in* presente no Excel para cálculo de otimização usando PLIM, não tem recursos suficientes para resolver modelos como o apresentado nesse trabalho devido à sua limitação de 200 variáveis e 200 restrições (<http://office.microsoft.com/pt-br/FX010858001046.aspx>), foi usado o “*Premium Solver Platform*” fornecido pela *Frontline Systems, Inc* que amplia a capacidade do Solver oferecido pela Microsoft® em seu Excel. Este aplicativo oferece novos mecanismos de otimização e heurísticas para resolução de problemas não lineares,

quadráticos, cônicos e não suaves (exemplo: algoritmo genético). Um comparativo de suas funcionalidades, aplicabilidade, preços e outros fatores pode ser encontrado em <http://www.lionhrtpub.com/orms/surveys/LP/LP-survey.html>, página na Internet da INFORMS, “*Institute for Operations Research and the Management Sciences*”.

Segundo o site da empresa *Frontline* (www.solver.com), o “*Premium Solver*”, versão com menos recursos do que o “*Premium Solver Platform*”, conseguiria resolver modelos do tamanho do problema em questão, mas com maior tempo de resposta.

Uma tabela comparativa e maiores detalhes sobre a diferença das duas apresentações do aplicativo Solver da empresa *Frontline* podem ser obtidas no endereço www.solver.com/xlscompare.htm.

Para facilitar a organização dos dados e a visualização dos resultados, optou-se por separar os dados em pastas de trabalho e disponibilizar-se macros para a navegação pelo modelo e para o cálculo dos resultados (vide Figura 3). Os nomes dos campos estão em inglês por ser um modelo para corporações internacionais.

Figura 3 - Exemplo de uma Tela de Resultados

File Edit View Insert Format Tools Data Window Help															
Close Full Screen															
DEMAND (Basic Unit)		B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O
Market #	Product 1	Product 2	Total												
Brazil South	0	4,171	4,171												
Brazil NorthWest	2,800	2,850	5,650												
Brazil Center	0	2,607	2,607												
Brazil SouthWest	0	2,750	2,750												
Brazil NorthWest	6,200	0	6,200												
LAS - Chile/Argentina South	1,350	4,400	5,750												
LAS - Argentina North	1,300	4,350	5,650												
LAS (Paraguay, Uruguay, Bolivia)	1,500	1,500	3,000												
LAN South - Venezuela, Colombia and region	500	1,000	1,500												
LAN - Central America	200	312	519												
LAN - Mexico South	115	173	288												
LAN - Mexico Center	182	272	454												
LAN - Mexico North	83	125	208												
Canada - North	1,168	1,762	2,920												
Canada - West	1,032	1,548	2,580												
Canada - East	508	940	1,400												
Canada - South	576	864	1,440												
Asia (India)	1,971	1,971	3,942												
Asia Center	477	716	1,193												
Asia North	863	1,294	2,157												
Asia (Indonesia)	911	1,366	2,276												
Asia East	314	471	795												
Africa South	200	200	400												
Africa Center	274	412	686												
Africa North	254	381	635												
Africa West	183	275	458												
Africa East	211	316	527												
Western Europe South	180	270	450												
Western Europe Center	217	401	618												
Western Europe North	194	291	485												
Western Europe West	618	927	1,545												
Western Europe East	603	905	1,508												
Eastern Europe South	639	958	1,596												
Eastern Europe Center	433	650	1,083												
Eastern Europe North	556	834	1,389												
Eastern Europe West	780	270	1,049												
Eastern Europe East	311	466	777												
Middle East South	75	112	187												
Middle East Center	48	71	119												
Middle East North	119	179	298												
Middle East West	117	176	293												
Middle East East	102	153	255												
USA South	2,070	3,104	5,174												
USA Center	4,332	6,498	10,830												
USA North	5,542	8,313	13,855												
USA West	2,343	3,515	5,858												
USA East	2,315	3,472	5,787												
Total	44,870	68,473	113,343												

Neste exemplo podem ser percebidos 47 mercados (fontes em preto) e dois produtos para entrada dos dados da demanda (fontes em azul). As definições dos mercados e dos produtos são feitas nesta pasta (parâmetros do modelo e, portanto, posicionados em células em amarelo). Outros lugares onde o mercado e/ou produto são mostrados são bloqueados para que não haja riscos de alteração indevida. Na figura 5 é mostrada a pasta para inserção dos dados das fábricas e/ou depósitos.

Figura 5 – Exemplo de tela para colocação dos dados das fábricas

Microsoft Excel - Global_Sourc_Model (v1).xls

File Edit View Insert Format Tools Data Window Help

Type a question for help

80%

B1

Reply with changes...

Arial

10

B

I

U

Nesta pasta encontram-se as informações das fábricas intermediárias e do produto final e/ou depósitos objetos da análise.

Os dados necessários contemplam os custos fixos e variáveis, tais como custo fixo anual, taxas de câmbio, capacidades de produção, valores agregados em cada elo da cadeia, coberturas de estoque esperadas, etc.

A taxa mínima de produção justifica-se quando existe uma imposição interna da empresa (ex.: manutenção de uma estrutura mínima funcionando como estratégia de

fornecimento) ou exigência externa do mercado (acordos de fornecimento, problemas sociais, etc.). Caso contrário ela pode ser mantida zero. No modelo matemático apresentado no capítulo 3.3 essa restrição não foi incluída, mas foi disponibilizada nessa versão do modelo aqui apresentada.

3.6 ESTUDO COMPARATIVO DE MODELOS DE LOCALIZAÇÃO

Complementando o estudo feito por BHUTTA (2004), segue na tabela 2 uma análise comparativa dos vários modelos encontrados na literatura que propõem soluções para o problema de localização global de instalações. Além das análises feitas por BHUTTA, a tabela detalha as características do modelo proposto neste trabalho.

Além do objetivo, número de períodos, produtos, mercados e fatores, tais como taxa de câmbio, inflação, demanda, capacidade, investimento, etc., um item adicional foi incluído na análise: o número de elos da cadeia de suprimentos tratado em cada modelagem.

Percebe-se que o modelo proposto nesse trabalho distingue-se fundamentalmente pelo maior número de elos em comparação com os demais. Isso torna a otimização mais completa, pois soluciona o problema de uma forma mais sistêmica que os modelos que contemplam cadeias mais curtas. VERTER (2002) apresenta um modelo que poderia ser ajustado para mais elos, mas, para cobrir esta necessidade, exigiria várias modificações. Além disso, é um modelo simples à medida que não contempla fatores como custos fixos, investimento, inflação, taxa de câmbio e custos de inventário. Os modelos mais completos, CANEL (1996) e BHUTTA (2003), apesar de levarem em consideração vários fatores em sua modelagem, incluem apenas dois elos na malha logística considerada para a otimização. O tratamento de impostos verifica-se em apenas dois modelos, além do proposto neste estudo.

Tabela 2 - Modelos globais de localização - adaptado de BHUTTA (2004)

Autor	Haug (1985)	Kirca & Kokasalan (1996)	Min & Melachrinoudis (1996)	Canel & Khumawala (1996)	Mohamed (1999)	Bhutta (2001)	Filipo (2000)	Hadjinicola & Kumar (2002)	Syan (2002)	Verter (2002)	Hamad (2006)
Tipo do modelo	PLIM	PL	Programação por metas	PLIM binário	PLIM	PLIM	Modelo de redes	Programação por metas	Simulated Annealing	Algoritmo próprio	PLIM
Objetivo	Max Lucro	Max Lucro	Max lucro depois dos impostos	Max Lucro	Minimizar custo	Max Lucro	Minimizar custo	Max Lucro	Minimizar custo	Minimizar custo	Minimizar custo
Número de Períodos	2	12	3	4	3	3	12	1	1	1	1
Número de Instalações	2	1	5	5	2	3	10	3	3	13	16
Mercados	1		1	6	3	4			2	49	47
Produtos	1	1	1	1	1	2	16	1	1	1	2
Número de elos na cadeia	2	2	2	2	2	2	3	2	3	3	4
Fatores considerados											
Demanda	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim
Capacidade	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim
Investimento		Sim	Sim	Sim				Sim	Sim	Sim	Sim
Inflação		Sim			Sim	Sim					
Taxa de câmbio			Sim	Sim	Sim	Sim		Sim			Sim
Tarifas/Impostos				Sim		Sim					Sim

Outra novidade no modelo ora proposto é a forma de cálculo dos custos relacionados ao inventário. Os inventários médios de uma fábrica são estimados a partir dos valores esperados da cobertura da demanda (inverso do giro de estoque) e do volume de material que vai alimentar essa fábrica. Os valores de cobertura são chamados de DOH (*Days-On-Hand*) para efeito deste estudo.

O conceito clássico usado para medição do DOH exige a divisão do inventário médio anual pelo total de Cost of Goods Sold (ou Custo da Mercadoria Vendida, neste estudo denominado de COGS) enviado para o elo seguinte da cadeia pela empresa no período de um ano:

$$DOH = \frac{\overline{Inventário_anual}}{\sum COGS} \times 365 \quad (27)$$

Como o volume a ser entregue em unidade padrão deverá ser o mesmo volume que ingressa em um elo f da cadeia, foi usado, para efeitos de construção do modelo, o volume de entrada e o DOH esperado conforme a seguinte fórmula:

$$\overline{Inventário_anual}_f = \frac{DOH_f \times \sum COGS_f}{365}, \forall f \quad (28)$$

Onde,

DOH_f = cobertura esperada para o elo f da cadeia considerando o estoque de entrada

$\overline{Inventário_anual}_f$ = Inventário médio do elo f no ano

$\sum COGS_f$ = Valor do Inventário que ingressa no elo f

O custo incluído na função objetivo compreende o custo de carregar o inventário (CI) em cada elo f que é dado pela seguinte fórmula:

$$CI = \overline{Inventário_anual}_f \times CC \quad (29)$$

Onde,

CC = O custo de carregar o inventário calculado a partir do WACC (Weighted Average Cost of Capital) da empresa, somado ao custo de armazenamento.

No capítulo 3.3.3 foram apresentados outros detalhes e as fórmulas usadas para calcular os custos de carregar o inventário em cada elo da cadeia.

Finalmente, uma última contribuição deste modelo é a inclusão de custos de *take-or-pay* que são incorridos quando o consumo de matéria prima é menor do que o acertado com os fornecedores. Nos casos em que a fábrica tem um fornecedor dedicado, são muito comuns os contratos, principalmente em empresas químicas, em que o cliente reembolsa parcialmente o fornecedor pelo não uso da matéria-prima, o que acontece quando a capacidade da fábrica não está totalmente tomada.

3.7 CONCLUSÃO DO CAPÍTULO

O modelo proposto no capítulo 3.3 foi adaptado do modelo de GEOFFRION, GRAVES (1974) e contempla vários fatores não incluídos no modelo original, o que o torna muito mais completo para a realidade das empresas transnacionais que atualmente precisam de um modelo para tomada de decisão referente à localização de plantas industriais ou CDs. Além da maior quantidade de elos coberta pelo modelo, o tratamento dado ao cálculo dos custos de inventário também é pioneiro em modelos do gênero. Essa forma de tratamento pode tornar-se muito útil para desenvolvimento de outros modelos já que o tema inventário tem se tornado bastante importante graças à participação dos estoques no ativo circulante das empresas e da representatividade do capital empregado nesse tipo de ativo em relação ao fluxo de caixa das empresas.

O modelo pode englobar tantos quantos forem os elos principais da cadeia de suprimentos analisada pela empresa, podendo ser usado tanto para a localização de plantas industriais como para CDs ou ambos. O primeiro elo da cadeia pode ser também associado a fornecedores o que habilita o modelo a fazer análises conhecidas como *“make-or-buy”*.

A análise é feita de uma forma sistêmica a partir de todos os fatores que normalmente influenciam esse tipo de decisão: taxa de câmbio, custos de carregamento dos estoques, custos fixos (incluídos aí os custos de investimento associados), custos para agregação de valor, custos de transporte, custos referentes aos impostos não recuperáveis e os custos denominados de *“take-or-pay”*.

No capítulo seguinte será detalhado como o modelo pode atender uma empresa química que tem como objetivo a tomada de decisão de quais fábricas deveriam ser abertas para atender uma distribuição mundial do principal produto de seu portfólio.

4 APLICAÇÃO

4.1 APLICAÇÃO EM UM CASO REAL

No capítulo 3 foram apresentados o detalhamento do modelo matemático proposto e sua implantação usando uma planilha Excel. Neste capítulo será mostrada uma aplicação do modelo em uma indústria transnacional do segmento químico que contempla a definição de instalações para a distribuição em nível global dos dois principais produtos da empresa. No caso em questão foram levados em consideração os quatro elos principais da cadeia de suprimentos dessa empresa (figura 6), a saber:

- 1) Fábricas que produzem o princípio ativo, componente principal do produto final: são duas as opções, uma localizada no Brasil e outra nos EUA;
- 2) Fábricas que fazem um produto intermediário a partir do princípio ativo: são seis as opções, duas no Brasil, duas nos EUA, uma na Argentina e outra na Europa;
- 3) Fábricas de produtos formulados finais: dez opções espalhadas por vários países nas Américas (Brasil, Argentina, México e EUA), Europa (Bélgica) e na Ásia (Indonésia, Malásia e Índia);
- 4) Os mercados consumidores dos produtos acabados: os mercados foram separados em macroregiões globais e divididos de acordo com as áreas geográficas de negócios da empresa que compreendem Brasil, América Latina Sul, América Latina Norte, América do Norte, Ásia/Pacífico, Europa e África. Para melhorar a precisão dos dados e das conclusões, cada macroregião foi subdividida em mesoregiões, perfazendo um total de 47 mercados.

Figura 6 – Elos principais da cadeia de suprimentos do modelo proposto

Apesar do modelo ter sido aplicado para localização de fábricas, o primeiro elo pode ser substituído por fornecedores e o último elo pode ser representado por CDs, sem nenhum prejuízo para o modelo da forma que foi estruturado. 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 implementado, no caso de elos representando CDs, é substituir os custos de transformação usados na aplicação mostrada no capítulo 4 pelos custos de manuseio e transbordo que são praticados nos CDs.

O levantamento dos dados otimizados de custo de frete para uso neste trabalho foi feito com o auxílio dos responsáveis pela logística da empresa que trabalham em várias de suas subsidiárias espalhadas pelo mundo. O trabalho de CAPLICE e SHEFFI (2003) poderia servir para refinar esses valores em trabalhos futuros.

FÜRBRINGER (1996) apresenta uma ferramenta para ajudar na simulação de análises de sensibilidade e detalha métodos eficientes para essas análises. Alguns dos seus conselhos foram usados para a definição das análises do capítulo 4.3.

A unidade padrão a ser usada no modelo é o KREG, que significa milhares de galões equivalentes do princípio ativo.

Por solicitação da empresa, o seu nome e o detalhamento dos dados usados não serão divulgados neste trabalho.

A empresa objetiva analisar a melhor combinação de fábricas, produtos e mercados que minimizem os custos logísticos do principal produto de seu portfólio. A partir dos resultados encontrados podem ser tomadas decisões referentes ao “*sourcing model*” (modelo de suprimento) da empresa.

A distribuição geográfica das fábricas da empresa analisada está representada na figura 7. Para este caso em questão, as dimensões são 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 Argentina, uma no México, uma na Bélgica e três na Ásia (Indonésia, Malásia e Índia);

- Mercados I : $q = 47$, espalhados por mesoregiões dentro de macroregiões globais, divididas de acordo com as áreas de negócio da empresa;
- Produtos m : $r = 2$ que constituem os principais produtos da empresa.

Figura 7 – Distribuição geográfica das instalações da empresa

Os dados de impostos/taxas foram coletados junto aos profissionais da área fiscal de cada região onde a empresa está instalada. No Brasil, várias análises foram feitas para que os impostos usados no modelo reflitam exatamente os valores a serem incorridos sobre o produto a ser transferido entre fábricas e das fábricas para os mercados. O levantamento de dados foi a parte mais difícil e que envolveu maior dedicação em termos de tempo para a elaboração deste trabalho.

O modelo utilizado foi o básico apresentado no capítulo 3.3, adaptado para a inclusão de benefícios fiscais como o *drawback*, conforme sugerido no capítulo 3.4. 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 pequeno porte. O objetivo em mantê-lo pequeno foi tornar possível construí-lo com base em planilhas Excel suportadas por um software de otimização de baixo preço que pudesse oferecer uma interface fácil para o usuário e calcular os resultados de forma rápida.

4.2 RESULTADOS

Foi feita uma simulação para um caso base que representa a atual configuração de plantas industriais da empresa. Os dados de demanda e de custo referem-se ao ano de 2004.

O modelo apresentou resultados bastante interessantes e demonstrou-se bastante útil para a tomada de decisões na localização de plantas industriais. Um detalhamento desses resultados será apresentado a seguir, mas, como exemplo, pode-se citar a conclusão de que a manutenção de todas as fábricas hoje existentes na Ásia não se justifica do ponto de vista estritamente econômico. Somente o custo fixo dessas fábricas já representa um percentual significativo do custo logístico total que não é compensado pelos ganhos com a redução nos custos de transporte e impostos.

O modelo possibilita uma visão sistêmica e, ao mesmo tempo, um detalhamento dos custos logísticos incorridos pela empresa em sua cadeia de suprimento global, mostrando os custos mais e menos significativos na malha logística atual.

As tabelas de dados de entrada e de resultados obtidos não estão aqui apresentadas para preservar o sigilo das informações e dados da empresa considerada.

No entanto, as conclusões aqui resumidas são reais e os valores percentuais refletem fielmente os resultados obtidos.

4.2.1 Distribuição dos custos

Os resultados da solução otimizada mostram que os custos fixos representam pouco mais de 18% dos custos totais. Os custos de matérias primas e mão de obra para agregação de valor ficam em torno de 69% dos custos totais e os custos logísticos representam os 13% restantes. Importante comentar que a solução apresentada pelo modelo difere razoavelmente da malha logística atualmente adotada pela empresa.

Nos custos logísticos, os impostos/taxas se mostraram, independentemente da configuração de malha, mais representativos que os custos com transporte.

Os custos para carregar o inventário, apesar de relativamente pequenos (pouco mais de 2%), não são insignificantes e influenciam diretamente o resultado da localização das instalações.

4.2.2 Impacto dos impostos e benefícios fiscais

Por ter uma participação grande no custo logístico total, os impostos influenciam fortemente na 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, podem-se 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 reduzidas, um produto acabado produzido na Argentina chega ao Sul do Brasil por 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.

Das três fábricas existentes na Ásia, o resultado do modelo recomenda a manutenção de apenas uma fábrica. Isto se justifica, apesar do alto custo fixo, pela redução de impostos causada por benefícios fiscais.

Verifica-se, portanto, que a guerra fiscal entre os estados brasileiros, amplamente explorada e discutida na imprensa, não é uma realidade apenas em nosso país. Na economia global, os acordos de cooperação econômica e benefícios fiscais negociados entre os países podem mudar drasticamente a configuração de uma malha logística. Fábricas tornam-se viáveis, mercados passam a ser mais atraentes

e produtos voltam à condição de competitivos basicamente por conta dos benefícios fiscais conseguidos.

4.3 ANÁLISE DE SENSIBILIDADE

Foram desenvolvidas três análises, todas elas normalmente relevantes para a tomada de decisão em um problema de localização de instalações em escala mundial:

- Variação da demanda;
- Flutuação da taxa de câmbio;
- Nível de serviço.

Dois estudos, em particular, situam a participação do Brasil na formação da malha logística global da empresa:

- Impacto do Mercosul;
- Implantação de uma fábrica de produtos intermediários e produtos acabados na Bahia.

4.3.1 Variação da demanda

Foram analisadas várias alterações na demanda atual, tanto de redução como de aumento. O gráfico mostrado na figura 8 mostra a variação do custo unitário em consequência dessas alterações na demanda anual. Os fatores de alteração de demanda utilizados foram aplicados igualmente em todos os parâmetros Dem_{ml} , ou seja, sem considerações mercadológicas mais aprofundadas.

Para a análise referente ao crescimento de 20%, investimentos em aumento de capacidade talvez sejam necessários. Para efeitos da análise, optou-se por considerar um aumento uniforme de capacidade em todas as fábricas conseguido através de melhoria de produtividade sem impacto nos custos fixos.

Nota-se que 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, já que se partiu da premissa de que o aumento da capacidade via aumento da produtividade não geraria aumento nos custos fixos.

Figura 8 - Impacto porcentual no custo unitário devido a variações da demanda

A redução dos custos unitários para demandas menores é explicada pelo melhor aproveitamento de fábricas que estão totalmente ocupadas no caso base e que, por oferecerem melhores custos de produção, distribuição e administração de inventário, acabam levando esses custos mais baixos para novos mercados, em detrimento das plantas industriais menos competitivas. Os ganhos obtidos com essas alterações na malha acabam por superar as perdas pelo não aproveitamento da capacidade total instalada.

4.3.2 Flutuação da taxa de câmbio

Foram usados três cenários de câmbio:

- O de pico acontecido no final de 2003 (1US\$ = R\$ 4,00);
- Um cenário intermediário (1US\$ = R\$ 3,00);

- E um último cenário de 1 US\$ = R\$ 2,00 por dólar que está próximo das taxas de câmbio do início de 2006. No caso base, a taxa de câmbio considerada foi a média de Maio de 2005: 1 US\$ = R\$ 2,50.

Não foi percebida nenhuma influência da taxa de câmbio para a atual configuração de fábricas e malha logística existente atualmente na empresa, já que as fábricas que devem ser abertas e os volumes de transferência e distribuição permanecem os mesmos. A única alteração de resultado encontra-se no custo logístico total, que varia na exata proporção da variação do custo fixo em relação à taxa do Dólar.

A taxa de câmbio começa a tornar-se significativa quando se considera a abertura de novas fábricas de produto intermediário e produto acabado no Brasil.

4.3.3 Impacto do Mercosul na malha logística

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 localmente. 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. Curiosamente, caso o Mercosul fosse extinto e, conseqüentemente, os seus benefícios fiscais acabassem, a malha logística envolvendo Brasil e Argentina mudaria significativamente, mas ainda justificaria a transferência de produto intermediário da Argentina para o Brasil, apesar de em menor quantidade do que a de produto acabado recomendado no caso base. A explicação para isso baseia-se no menor custo de frete entre a fábrica da Argentina e o sul do Brasil, se comparado ao mesmo custo entre São Paulo e aquela região.

4.3.4 Nível de Serviço

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 a cinco dias e/ou a precisão de entrega esperada fosse menor do que 95%. Até o limite de cinco dias e a precisão de entrega de 95%, a empresa considera que a expectativa do tipo de cliente a que ela se orienta ainda pode ser atendida. Acima desse tempo, aumentam significativamente a insatisfação do consumidor e o risco potencial de perda de vendas.

Dois foram os fatores usados: 1,5 e 15. Esses fatores multiplicam diretamente os fretes daquelas origens que ultrapassariam o limite de tempo de entrega estipulado.

Percebe-se que, mesmo com um custo de frete 50% acima (fator de 1,5), 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.

Para o fator de 15, o impacto do frete no desenho da malha já se torna significativo. Aparece a necessidade da abertura de uma segunda fábrica na Ásia que não era prevista no caso base e várias modificações nas transferências e distribuições fazem parte da nova solução.

4.3.5 Implantação de fábricas de produto intermediário e acabado na Bahia

Apesar de não fazer parte dos planos da empresa, a implantação de uma fábrica de produto acabado e outra de produto intermediário na Bahia, nas instalações da fábrica atual de produto intermediário, pode trazer ganhos de até 1,5% em relação ao custo logístico total.

Os ganhos maiores estão basicamente na redução de impostos/taxas a serem pagos e na redução dos custos de transferência do princípio ativo.

4.4 DESEMPENHO COMPUTACIONAL

Para suportar os cálculos do 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 da Microsoft.

Inicialmente, durante a construção do modelo, foi usado um computador Dell C610, com sistema operacional Windows 2000.

Em ambos os casos, o tempo de processamento ficou entre um e dois segundos.

4.5 CONCLUSÃO DO CAPÍTULO

Este capítulo procurou demonstrar a aplicabilidade do modelo desenvolvido em um caso real de uma indústria química. Comprovou-se a eficiência e a eficácia do aplicativo desenvolvido em MSExcel e a importância que uma ferramenta dessas tem para a tomada de decisões, principalmente tratando-se de gerenciamento da cadeia de suprimentos, onde a quantidade de variáveis inter-relacionadas é enorme e a tomada de decisões é normalmente subjetiva. O modelo apresentou-se de fácil utilização e os resultados são calculados em um tempo bastante reduzido (entre 1 e 2 segundos), o que facilitou as análises de sensibilidade.

A maior dificuldade encontrada após o modelo já estar pronto, testado e validado, foi a coleta precisa dos dados devido a quantidade, variedade e abrangência internacional dos dados a serem levantados.

As análises de sensibilidade mostraram que a taxa de câmbio não é um fator significativo para a definição da malha logística da empresa analisada. Mas fatores como benefícios fiscais, variação da demanda e nível de serviço podem impactar significativamente os custos na cadeia de suprimentos de empresas que tenham produtos de alto valor agregado e escopo de atuação mundial como é o caso estudado.

5 CONCLUSÕES FINAIS E RECOMENDAÇÕES

O problema de localização de instalações de uma forma otimizada é e sempre vai ser 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, variabilidade da demanda e outros amplificam o problema e o tornam extremamente difícil de se resolver sem um modelo matemático bem elaborado, montado em plataformas computacionais que possam adequadamente embasar as decisões a serem tomadas. São tantos os *trade-offs* que, sem um modelo matemático e um software confiável que o suporte, torna-se impossível tomar-se decisões objetivas, precisas e bem fundamentadas.

Existem ferramentas comerciais no mercado que auxiliam em parte as análises aqui propostas, mas nenhuma delas pode ser utilizada sem investimentos significativos em software, hardware e treinamento dos envolvidos no uso do aplicativo.

O modelo aqui apresentado mostrou-se de aplicação bastante vasta e de fácil utilização, já que está baseado em uma planilha MSExcel, *software* largamente difundido nas empresas. A ferramenta usada para a otimização do modelo é de baixo custo (menos de US\$ 2 mil), equivalente a uma fração do custo normalmente gasto em softwares comerciais oferecidos para otimização de malhas logísticas.

Como maiores contribuições do modelo proposto, foram inseridas e analisadas três idéias ainda pouco exploradas na literatura:

- O tratamento dos custos de carregar-se inventário a partir do giro do estoque;
- A inclusão dos benefícios fiscais do Mercosul;
- A inclusão dos custos relacionados ao não cumprimento de contratos dedicados de fornecimento.

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 inventários, custos fixos e nível de serviço também demonstraram serem muito importantes na otimização de uma malha logística.

Como limitação do modelo ora proposto pode-se citar a não consideração do fator sazonalidade e o tratamento simplificado para o cálculo dos níveis de serviço envolvidos no problema.

No caso específico da empresa analisada, as sazonalidades regionais acabam sendo compensadas em escala global, o que tende a eliminar grandes picos e vales nos volumes demandados. As fábricas também trabalham de forma contínua, o que reduz 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.

De qualquer forma, apesar de não comprometerem significativamente as conclusões resultantes das análises feitas no capítulo 4, estes dois fatores poderiam ser incluídos no modelo de forma a melhorá-lo.

Outras melhorias no modelo são sugeridas para futuros trabalhos, a saber:

- Adequar a função objetivo para a maximização dos lucros;
- Incluir uma variável que considere o custo das vendas perdidas para os cenários em que a demanda possa aumentar acima da capacidade instalada;
- Incluir variáveis relacionadas a aumentos de capacidade e investimentos associados;
- Incluir considerações de nível de serviço conforme sugerido na restrição número (6), capítulo 2.4.5.

6 REFERÊNCIAS

- ALLEN, K.M. (1991) ***The role of logistics in the overseas plant selection decision process of US based multinational corporations***, Journal of Business Logistics, V. 12, No. 2, pp. 59 – 73
- BALLOU, R. H. (1998) ***Business Logistics Management***. Englewood Cliffs NJ: Prentice-Hall, 4a. edição.
- BENDERS, J. F. (1962), ***Partitioning Procedures for Solving Mixed-Variables Programming Problems***, Numerische Mathematik, 4, pp. 238 - 252
- BIJAYAMADA, N. and CHAKRAVARTY, A.K. (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, pp.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. (2002), ***Spreadsheet approach to Facility Location Decisions for a Multinational Corporation***, Department of Information Systems, Nicholls State University, *paper* disponível no site da universidade, <http://72.14.207.104/Papers/02swsdi016.pdf> (acesso em Novembro de 2005)
- BHUTTA, K.S., HUQ, F., FRAZIER, G., MOHAMED, Z. (2003), ***An Integration Location, Production, Distribution and Investment Model for a Multinational Corporation***, International Journal of Production Economics, V. 86, pp. 201-216
- BHUTTA, K.S. (2004), ***International facility location decisions: a review of the modelling literature***, International Journal of Integrated Supply Management, V. 1, No. 1
- BRAKLOW, John W; et alli (1992), ***Interactive Optimization Improves Service and Performance for Yellow Freight System***, Interfaces, V. 21, no. 1
- 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. São Paulo
- CAPLICE, C. and SHEFFI, Y., (2003) ***Optimization-based procurement for transportation services***, Journal of Business Logistics, V. 24, No. 2
- CANEL, C. and KHUMAWALA, B.M. (1996), ***A mixed integer programming approach for the international facilities location problem***, International Journal of Operations and Production Management, V. 16, No.4, pp.49-68
- CHURCHMANN, C.W. (1979), ***The systems approach***, Delacorte Press, New York. Paperback edition Dell Publishing, New York, 1969, second, revised ed. 1979
- CHRISTOPHER, M. (2002), ***Logística e Gerenciamento da Cadeia de Suprimentos - Estratégias para a redução de custos e melhoria dos serviços***, São Paulo, Pioneira
- DOGAN, K. and GOETSCHALCKX, M. (1999), ***A primal decomposition method for the integrated design of multi-period production-distribution systems***, IIE Transactions, v. 31, pp 1027-1036
- EFROYMONSON, M. A. and RAY, T. L. (1966), ***A branch and bound algorithm for plant location***, Operations Research, v. 14, p. 361-368

- FAWCETT, S.E. and VELLANGA, D.B. (1992), ***Transportation Characteristics and Performance in Maquiladora Operations***, Transportation Journal, pp. 5-16
- FINE, C. H. (1999), ***Mercados em Evolução contínua***, Editora Campus, Primeira Edição
- FLIPO, C.D. (2000), ***Spatial decomposition for a multi-facility production and distribution problem***, International Journal of Production Economics, V. 64, pp 177-186
- FLIPO, C.D. and FINKE, G. (2001), ***An integrated model for an industrial production-distribution problem***, IIE Transactions, V. 33, No. 9, pp. 705-716
- FÜRBRINGER, Jean-Marie, (1996), ***Sensitivity analysis for modelers***, Air Infiltration Review, V. 17, No 4, World Wide Web Edition
- GEOFFRION, A. M., GRAVES, G.W. (1974), ***Multicommodity distribution design by Benders decomposition***, Management Science, V. 20, n.5, pp. 822-844.
- GEOFFRION, A. M. (1976), ***Better Distribution planning with computer models***, Harvard Business Review, V. 54, pp. 92-99
- GEOFFRION, A. M. (1987), ***An introduction to Structured Modeling***, Management Science, V. 33, pp. 547-588
- GEOFFRION, A. M. (1989), ***Integrated modeling Systems***, Computer Science in Economics and Management, V. 02, pp. 3-15
- GEOFFRION, A. M., POWERS, R. F. (1995), ***Twenty years of strategic distribution system design: an evolutionary perspective***, Interfaces, V. 25, No. 5, pp. 105 - 127
- GEOFFRION, A. M., POWERS, R. F. (1980), ***Facility location analysis is just the beginning***, Interfaces, V. 10, pp. 22-30
- GUALDA, N. D. F. (1995), ***Terminais de transportes: contribuição ao planejamento e ao dimensionamento operacional***, 277p. Tese (Livre Docência) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo
- 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. and KUMAR K. R. (2002), ***Modeling manufacturing and marketing options in international operations***, International Journal of Production Economics, V. 75, pp. 287-304
- HAUG, P. (1985), ***A multiple-period, mixed-integer-programming model for multinational facility location***, Journal of Management, V. 11, No. 3, pp. 83-97
- HAUG, P. (1992), ***An international location and production transfer model for high technology multinational enterprises***, International Journal of Production Research, V. 30, No. 3, pp. 559 – 572
- HAX, A.C. and CANDEA, D. (1984), ***Production and Inventory Management***. Englewood Cliffs, New Jersey, Prentice-Hall
- HODDER, J. E. and DINCER M. C. (1984), ***A multifactor model for international plant location and financing under uncertainty***, Computers and Operations Research, V. 13, No. 5, pp. 601 – 609
- HODDER, J. E. and JUCKER, J. V. (1985), ***International plant location under price and exchange rate uncertainty***, Engineering Costs and Production Economics, V. 9, pp. 225 – 229

I2, The Supply Chain Company (2006), **Strategic Network Design & Analysis**, Disponível em <http://www.i2.com/solutionareas/sixone/td/networkDesign.cfm>, (acesso em 15 de fevereiro de 2006), Dallas, Texas, EUA

IBM (2004), **Energize your supply chain network – A European perspective (New competitive advantage from existing investments)**, Survey conducted by IBM Business Consulting Services, New York, EUA

KIRCA, O. and KOKSALAN, M. (1996), **An integrated production and financial planning model and an application**, IIE Transactions 19 (8), pp. 765 – 784

KUEHN, A. A. and HAMBURGER, M. J. (1963), **A heuristic Program for locating warehouses**, Management Science, V. 9, pp. 643 – 666

LACERDA, L. (2005), **Considerações sobre o estudo de localização de instalações**, Disponível em <http://www.cel.coppead.ufrj.br/fs-busca.htm?fr-loc-inst.htm> (acesso em 18 de novembro, 2005). Artigos do Centro de Estudo em Logística, COPPEAD, RJ

LOVE, R. F., MORRIS, J. G. and WESOLOWSKY, G. O. (1988), **Facilities Location: models & methods**. New York, North Holland, pp. 186-20

MANUGISTICS (2006), Network Design and Optimization solution, Disponível em http://www.manugistics.com.br/solutions/SupplyManagement/cg_sm_ndo.aspx?id=SupplyManagement, (acesso em 15 de fevereiro de 2006), Rockville, Maryland, EUA

MARTOS, A. C. (2000), **Projeto de redes logísticas com consideração de estoques e modais: aplicação de programação linear inteira mista à indústria petroquímica**. 98 p., Dissertação de mestrado, Escola Politécnica da USP, São Paulo

MEDINA, Alfonso 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. and VOS, B. (1997), **International manufacturing and location decisions: balancing configuration and co-ordination aspects**, International Journal of Operations & Production Management, V.17, No. 8, pp. 790-805

MIN, H. and MELACHRINOUDIS, E. (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, No. 1, pp. 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, pp. 81 – 92

MOORE, E.W. Jr., WARMKE, J. M., GORBON, L. R. (1991), **The indispensable role of management science in centralizing freight operations at Reynolds Metals Company**, Interface, V. 21, No. 1

NAZAR, Sérgio P. (2003), **Modelo para planejamento de serviços de transporte intermodal Long-haul**, Dissertação de Mestrado, Escola Politécnica da USP, São Paulo

OR/MS Today (2005), **Linear Programming Software Survey**, disponível em <http://www.lionhrtpub.com/orms/surveys/LP/LP-survey.html> (acesso em Dezembro de 2005). A publication of INFORMS

- OWEN, S. H., DASKIN, M. S. (1998), **Strategic facility location: A review**, European Journal of Operational Research, V. 111, No. 3, pp. 423-447
- PANTALENA, B. G. (2004), **Otimização da malha logística de uma indústria química**, Trabalho de formatura, Escola Politécnica da USP, São Paulo
- POWELL, W. B., SHEFFI, Y., NICKERSON, K. S., BUTTERBAUGH, K., ATHERTON, S. (1988), **Maximizing profits for North American Van Lines' Truckload Division**, Interfaces, V. 18, No. 1
- RIBEIRO, F. N. et alli (2003), **Problema de roteamento de veículos**, Universidade de Ouro Preto
- RIOS, A. (2003), **International Assembly Facility Location Problem**, Revista de Investigación, V. 01, No. 1, EGADE del Tecnológico de Monterrey, Chihuahua, México
- SAP APO (2006), *Advanced Planner and Optimizer application by SAP*, disponível em <http://www.sap-img.com/sap-apo.htm>, (acesso em 15 de fevereiro de 2006). Dicas de Implementação e Fórum de discussão no endereço da empresa da Internet, Palo Alto, Califórnia, EUA
- SHAPIRO, J. F. (2001), **Modeling the Supply Chain**. Pacific Grove CA: Duxbury Press
- SMARTOPS CORPORATION (2006), Software para otimização de inventários, disponível em <http://www.smartops.com/inventory-targets>, (acesso em 15 de fevereiro de 2006), soluções fornecidas pela empresa apresentadas no seu endereço na Internet
- SMITS, S. R. (2001), **Evaluation Model for the design of distribution networks**. Faculty of Technology Management, Netherlands
- SPIELBERG, K. (1969), **Algorithms for the simple plant-location problem with some side constraints**, Operations Research, V. 17, pp. 85-111
- SYAM, S.S. (2002), **A model and methodologies for the location problem with logistical components**, Computers and Operations Research, V. 29, pp. 1173 – 1193
- TACLA, D. (1999), **Estudo para otimização de rotas no transporte rodoviário de cargas granelizadas na indústria química**, Dissertação de Mestrado, Escola Politécnica da USP, São Paulo
- TONG, H. and WALTER, C.K. (1980), **An empirical study of plant location decisions of foreign manufacturing investors in the US**, Columbia Journal of World Business, V. 15, No. 1, pp. 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, pp. 583-592
- VIEIRA, J.G.V. e YOSHIZAKI, H.T.Y. (2003), **Análise de um caso brasileiro de CPFR (Collaborative Planning, Forecasting and Replenishment) usando Custos de Transação**, Anais do XXIII EBEGEP, Ouro Preto
- VOS, B. and AKKERMANS, H. (1996), **Capturing the dynamics of facility allocation**, International Journal of Operations & Production Management, V.16, No.11, p. 57
- WANKE, P. (2001), **Aspectos Fundamentais do Problema de Localização de Instalações em Redes Logísticas**, disponível em <http://www.cel.coppead.ufrj.br/fs-busca.htm?fr-loc-inst.htm>, (acesso em Dezembro de 2006). Artigos do Centro 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