



Modelando o projeto logístico de uma indústria multicommodity

Modeling the logistics design of a multi-commodity industry

Everton da Silveira Farias^{1,2}
Denis Borenstein²

Resumo: Neste trabalho apresentamos duas diferentes formulações matemáticas para o Projeto de Rede da Cadeia de Suprimentos de uma empresa responsável por produção e distribuição *multicommodity*. O investimento em uma nova fábrica exigiu a readequação do projeto logístico da empresa, implicando na reestruturação dos fluxos de matérias-primas e produtos acabados, assim como a abertura de novos CD. A cadeia de suprimentos foi modelada utilizando-se uma formulação em programação inteira linear mista na qual as facilidades são representadas pelos nós e os *links*, pelos arcos. As implementações computacionais foram realizadas em OPL e os resultados obtidos utilizando-se o *solver* CPLEX[®]. Para validar os modelos implementados, uma série de experimentos computacionais foi realizada. Para viabilizar a aplicação dos modelos ao problema da empresa, estudos para identificar as demandas de mercado (*market shares*) e os custos de transporte foram incorporados ao trabalho. A aplicação dos modelos apoiou várias decisões referentes ao projeto inicial da empresa, realizadas pela equipe de projeto.

Palavras-chave: Projeto logístico; *Multicommodity*; Projeto de rede da cadeia de suprimentos; *Single-source*; Pesquisa operacional.

Abstract: *This paper presents two different mathematical formulations for the Supply Chain Network Design of a company responsible for producing and distributing multi-commodity products. Investments in a new manufacturing plant required the readjustment of the company's logistics project, with a necessary re-structuring of the raw materials and finished product flows and the possibility of opening new distribution centers. (DCs). The supply chain was modeled using a formulation in mixed linear integer programming, in which the facilities are represented by nodes and the links by the arcs. The computer implementations were performed using OPL and results obtained by CPLEX[®] solver. The implemented models was validated by a series of computational experiments. We incorporated studies to identify the market demands (market shares) and transportation costs in order to enable the application of models to the company's problem. The application of the models allowed several decisions concerning the initial project of the company to be performed by the project team.*

Keywords: *Logistics project; Multicommodity; Supply chain network design; Single-source; Operational research.*

1 Introdução

Cadeias de suprimentos são redes de organizações responsáveis pelos diferentes processos e atividades que produzem valor na forma de produtos e serviços colocados à disposição do consumidor final. A gestão da cadeia de suprimentos preocupa-se com os fluxos externos à empresa e visa à coordenação e controle de materiais, informações e finanças que vão do fornecedor ao consumidor, passando pelos fabricantes, atacadistas e varejistas (Ballou, 2006). Por meio do planejamento, organização e controle efetivo das atividades corporativas, a logística visa prover um melhor nível de serviços, reduzindo custos

operacionais e contribuindo para a prosperidade do negócio (Bowersox et al., 2006).

A definição do Projeto de Rede da Cadeia de Suprimentos (SCND, do inglês Supply Chain Network Design) é um dos problemas mais abrangentes relacionados à cadeia de suprimento, pois envolve decisões em níveis operacionais, táticos e estratégicos (Shen, 2005). Segundo Jang et al. (2002), definir a estrutura de rede de uma cadeia significa determinar o número, a localização, a capacidade e os tipos de plantas e centros de distribuição (CD) que serão utilizados. O projeto da rede também estabelece os canais de distribuição e as quantidades de materiais

¹ Departamento Interdisciplinar em Ciência e Tecnologia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS, Rodovia RS 030, 11.700 Km 92, CEP 95590-000, Tramandaí, RS, Brasil, e-mail: farias@ufrgs.br

² Programa de Pós-graduação em Administração, Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS, Rua Washington Luiz, 855, Centro Histórico, CEP 90010-460, Porto Alegre, RS, Brasil, e-mail: denisb@ea.ufrgs.br

e itens a produzir e enviar aos fornecedores em cada nível de consumo da cadeia. O número de estágios é determinado com base na complexidade dos problemas fragmentados da rede (Pirkul & Jayaraman, 1998).

As técnicas de pesquisa operacional são cada vez mais utilizadas para definir a rede da cadeia de suprimento a fim de proporcionar não apenas uma solução viável, mas, em muitos casos, uma solução ótima para esse complexo problema. A modelagem matemática de cadeias de distribuição procura, em geral, otimizar os custos relacionados à movimentação de materiais ao longo da rede, sem comprometer de forma significativa os níveis de serviços oferecidos aos clientes. A literatura apresenta diversos modelos matemáticos, principalmente de programação linear, para o projeto de cadeias de suprimentos que incorporam diversos aspectos da esfera operacional, tática e estratégica.

Este artigo apresenta o desenvolvimento e aplicação de modelos matemáticos baseados em Programação Linear Inteira Mista para o projeto inicial da rede de suprimento de uma empresa que atua na indústria de produtos à base de borracha (*commodity*). A empresa está expandindo sua área de atuação instalando uma nova fábrica no Brasil. Devido a essa nova localização geográfica, torna-se necessário reestruturar seu sistema de distribuição. Essa empresa produz uma extensa lista de produtos, os quais possuem uma grande diversidade de tamanho, características técnicas e aplicações específicas. Dessa forma, os fluxos das operações para atender as demandas das instalações por meio de fluxos eficientes de matérias-primas e produtos acabados demandam o desenvolvimento de modelos que incorporem a produção e distribuição *multicommodity*. Para viabilizar a aplicação dos modelos no problema da empresa, estudos para identificar as demandas e os custos de transporte também foram realizados, assim como a construção de diferentes cenários, incorporando diferentes elementos estratégicos e operacionais.

Este trabalho é organizado da seguinte forma: a seção 2 apresenta a revisão de literatura utilizada para desenvolver os modelos a serem apresentados e discutidos na seção 3, que aborda as etapas da metodologia de pesquisa utilizada. Na seção 4, a aplicação do modelo para o projeto inicial da cadeia de suprimento da empresa é apresentada e discutida em detalhes. Finalmente, a seção 5 apresenta as conclusões e aspectos que motivam a realização de trabalhos futuros.

2 Revisão da literatura

A revisão da literatura deste trabalho de pesquisa compreende estudos relacionados à aplicação de modelagem para o projeto da rede de cadeia de suprimentos *multicommodity*. Geoffrion & Graves (1974) realizaram estudo pioneiro que trata do projeto do sistema de distribuição incorporando *multicommodity*.

Esse trabalho é caracterizado pela abordagem da capacidade das fábricas e CD, fluxo de produtos e atendimento da demanda de consumidores em um ambiente *multicommodity*. No estudo foi utilizado o método de Decomposições de Benders para a solução. O modelo foi aplicado em uma indústria de alimentos que produzia em 14 localidades cerca de uma centena de produtos com distribuição nacional utilizando uma dúzia de CD. Geoffrion & Powers (1995) revisaram esse modelo inicial, adicionando à modelagem inicial restrições de capacidade das instalações e a limitação do fluxo de produtos ao longo da cadeia de suprimentos. Os autores afirmam que encontrar a composição ótima para uma cadeia de suprimentos integrada é um problema muito difícil de resolver.

A partir do trabalho seminal desenvolvido por Geoffrion & Graves (1974) sobre o projeto de rede de distribuição de *multicommodity*, diversos modelos foram desenvolvidos para resolver problemas da cadeia de suprimentos, abordando questões relativas a transporte e armazenagem. Pirkul & Jayaraman (1996) tratam da integração da produção, transporte e planejamento de distribuição *multicommodity*, apresentando um modelo de programação inteira mista para localização de fábricas e CD com o objetivo de minimizar custos. Esse modelo admite que cada zona de consumo seja abastecida por somente um centro de distribuição, estratégia denominada *single-source*. Para solução matemática do modelo foram aplicadas técnicas de Relaxamento Lagrangeano e heurísticas. Esse trabalho é expandido em Jayaraman & Pirkul (2001) pela incorporação de fornecedores de matérias-primas ao modelo, resultando em um problema de maior complexidade computacional. Nesse modelo expandido é mantida a condição de abastecimento da demanda por um centro de distribuição. Os autores tratam o problema de múltiplos produtos realizando o agrupamento de produtos para transporte. Isso reduz drasticamente o número de variáveis e facilita a solução do modelo, porém minora a representatividade do modelo em relação ao problema real.

Desde então, diferentes abordagens de modelagem e solução vêm sendo descritas na literatura. Cole (1995) desenvolveu um modelo de programação inteira mista de múltiplos produtos para otimização do sistema integrado da cadeia de suprimentos e minimização dos custos estratégicos e operacionais. Nesse caso, a abertura e fechamento de instalações foram considerados custos estratégicos; custos de produção, estoque e transportes foram incorporados aos custos operacionais. De acordo com Vidal & Goetschalckx (1997), o modelo apresentado por Cole (1995) é o mais indicado para projetos de rede da cadeia de suprimentos de integração interna. Papageorgiou et al. (2001) demonstraram e aplicaram um modelo integrado de cadeia de suprimentos para empresas da indústria farmacêutica. Os resultados

obtidos mostraram a aplicabilidade da programação inteira mista em problemas de larga escala para encontrar a solução ideal em uma cadeia de suprimentos. Alonso-Ayuso et al. (2003) apresentaram um modelo em dois estágios para o planejamento estratégico da cadeia de suprimentos baseados em programação inteira binária e métodos estocásticos. O algoritmo proposto para solução baseia-se na coordenação algorítmica *branch and fix*. Shen (2005) apresenta o primeiro modelo de projeto da cadeia de suprimentos *multicommodity* que inclui economia em escala na cadeia de abastecimento em relação a custos. Um algoritmo para solução é proposto, sendo os resultados apresentados mais eficientes quando comparados a soluções de algoritmos já existentes. Ma & Suo (2006) desenvolveram um modelo para concepção de redes logísticas com vários produtos em três estágios. Um modelo de programação linear inteira mista foi utilizado para configurar a rede e em seguida foram desenvolvidos um modelo de planejamento de estoques e um modelo de roteamento de veículos para identificar a menor rota entre os atacadistas e varejistas. Li et al. (2009) abordaram o fluxo *multicommodity* por meio do clássico problema Capacitated Plant Location Problem. O método de solução foi desenvolvido a partir da combinação de Relaxamento Lagrangeano e Tabu Search. A implementação computacional utilizou o CPLEX[®] e instâncias geradas de forma aleatória.

Embora esses modelos apresentem formulações matemáticas capazes de incorporar inúmeros aspectos do mundo real, poucos trabalhos demonstram resultados aplicados com experimentos em situações realísticas. Este trabalho de pesquisa foca a aplicação dos modelos desenvolvidos em um estudo de caso, apresentando os desafios enfrentados quando da aplicação de modelos complexos a problemas do mundo real, especificamente ao projeto de redes de cadeias de suprimento *multicommodity*.

3 Desenvolvimento dos modelos

3.1 Definição do problema

A empresa é responsável pela produção de um conjunto de produtos à base de borracha. Esses produtos possuem diversos tamanhos, propriedades e especificações diferentes entre si, porém são constituídos, basicamente, das mesmas matérias-primas. As plantas produtoras (fábricas) são abastecidas por diversos fornecedores. O conjunto de centros de distribuição recebe diversos tipos de produtos provenientes das plantas produtoras. Os centros de distribuição (CD), por sua vez, são responsáveis por enviar às zonas de consumo as quantidades de cada produto, de acordo com a demanda. Dessa forma, a rede da cadeia de suprimentos dessa indústria é formada pelos

fornecedores de matérias-primas, planta produtoras, CD e zonas de consumo dos produtos.

A empresa está em processo de efetivação da construção de uma nova fábrica no Brasil. Essa fábrica será responsável por suprir os CD já existentes, assim como suprir novos CD que poderão ser construídos de acordo com a nova posição geográfica da fábrica. O investimento nessa nova planta produtora não descarta a utilização das fábricas já existentes, porém ajustes de capacidade devem ser realizados nas mesmas. No tratamento de uma cadeia de distribuição de produtos físicos existe a necessidade de transporte entre os atores dessa rede. Sendo assim, é necessário considerar os custos relativos ao transporte de matérias-primas e de produtos em cada estágio da cadeia. Devido à quantidade de produtos envolvidos nos fluxos da rede de suprimentos é necessário considerar as questões de capacidade de produção de cada fábrica, assim como a capacidade de processamento de cada centro de distribuição. Consequentemente, os custos fixos e variáveis das instalações (especialmente os CD) devem ser considerados.

O problema consiste, portanto, em determinar o conjunto de CD necessários para atender a demanda de produtos das zonas de consumo com menor custo operacional. Para isso é necessário considerar as quantidades de cada uma das matérias-primas que devem ser adquiridas a partir de cada fornecedor, assim como a quantidade de produtos que será produzida em cada fábrica. No entanto, por se tratar de um projeto, a empresa não tem definida a estratégia de distribuição em relação ao abastecimento das zonas de consumo. Dessa forma, no problema abordado não se tem definido se uma zona de consumo poderá ser abastecida por mais de um CD ou se esse fornecimento será exclusivo (*single-source*). Sendo assim, neste trabalho o problema é abordado apresentando-se dois modelos matemáticos para o projeto logístico da cadeia de suprimentos. A abordagem denominada *single-source* pressupõe que cada zona de consumo recebe produtos de somente um CD. Já na segunda abordagem, chamada neste trabalho de *arc-based*, a estrutura de custos de transporte entre fábricas, CD e clientes são representadas por arcos que ligam cada um desses atores, sendo que não existe a exclusividade de atendimento de um cliente por um único CD.

3.2 Formulações e modelagens matemáticas

Os modelos matemáticos desenvolvidos foram baseados na formulação apresentada por Jayaraman & Pirkul (2001). As variáveis contínuas são definidas a partir da quantidade de matérias-primas dos fornecedores para fábricas e da quantidade de produtos enviados das fábricas para as zonas de consumo por intermédio dos CD. A seguir é apresentada a notação comum às duas formulações elaboradas.

Conjuntos:

- C : Conjunto de zonas de consumo (clientes), indexado por c ;
- W : Conjunto de CD (armazéns), indexado por w ;
- F : Conjunto de fábricas (plantas), indexado por f ;
- R : Conjunto de matérias-primas, indexado por r ;
- V : Conjunto de fornecedores (supridores), indexado por v ;
- S : Conjunto de produtos, indexado por s ;
- P : Conjunto de caminhos (trajetos), indexado por p .

Parâmetros:

- d_{sc} : Demanda por produtos $s \in S$ da zona de consumo $c \in C$;
- U_f : Máximo de fábricas que podem ser abertas;
- U_w : Máximo de CD que podem ser abertos;
- u_{rs} : Taxa de utilização de matéria-prima $r \in R$ pelo produto acabado $s \in S$;
- u_s : Taxa de utilização de capacidade pelo produto acabado $s \in S$;
- CAP_w : Capacidade de transferência dos CD;
- CAP_w : Capacidade de suprimento da matéria-prima $r \in R$ do fornecedor $v \in V$;
- CAP_f : Capacidade de produção da fábrica $f \in F$;

- CT_f^o : Custo fixo anual de funcionamento da fábrica $f \in F$;
- CT_w^o : Custo fixo anual de funcionamento do centro de distribuição $w \in W$;
- CT_w^g : Custo unitário de transferência do centro de distribuição $w \in W$;
- CT_f^p : Custo unitário de produção do produto $s \in S$ na fábrica $f \in F$;
- CT_{fv}^t : Custo unitário de transporte da matéria-prima $r \in R$ do fornecedor $v \in V$ para a fábrica $f \in F$;
- CT_{ps}^t : Custo unitário de transporte do produto $s \in S$ utilizando-se o caminho $p \in P$;
- CT_{fws}^t : Custo unitário de transporte do produto $s \in S$ utilizando a fábrica $f \in F$ para o centro de distribuição $w \in W$;
- CT_{wcs}^t : Custo unitário de transporte do produto $s \in S$ utilizando o centro de distribuição $w \in W$ para a zona de consumo $c \in C$;
- u_{min} : Mínima demanda para abertura do centro de distribuição $w \in W$.

3.2.1 Modelo *single-source*

A Figura 1 ilustra o conceito da abordagem *single-source*, mostrando que cada zona de consumo é atendida por somente um centro de distribuição.

Definição do conjunto de variáveis de decisão:

- x_{fws} : Quantidade de produto $s \in S$ enviada da fábrica $f \in F$ para o centro de distribuição $w \in W$;

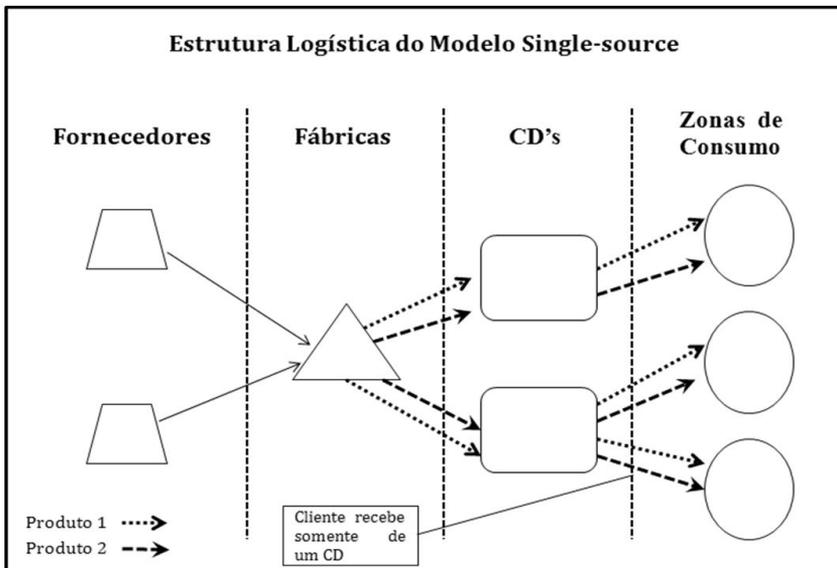


Figura 1. Estrutura logística do modelo *single-source*.

y_{vr} : Quantidade de matéria-prima $r \in R$ enviada do fornecedor $v \in V$ para a fábrica $f \in F$;

a_w : Variável binária que assume o valor 1 se o centro de distribuição $w \in W$ está selecionado, e 0 em caso contrário;

g_{wc} : Variável binária que indica se centro de distribuição $w \in W$ atende a demanda da zona de consumo $c \in C$.

O problema, considerando as variáveis de decisão definidas e uma abordagem *single-source*, pode ser formulado como um modelo de programação linear inteira mista.

• Modelo *single-source*

$$\min \sum_{w \in W} CT_w^o a_w + \sum_{w \in W} \sum_{c \in C} \sum_{s \in S} CT_{sc}^s d_{sc} g_{wc} + \sum_{f \in F} \sum_{w \in W} \sum_{s \in S} CT_{fs}^p x_{fws} + \sum_{v \in V} \sum_{f \in F} \sum_{r \in R} CT_{vr}^r y_{vfr} + \sum_{f \in F} \sum_{w \in W} \sum_{s \in S} CT_{fws}^t x_{fws} + \sum_{w \in W} \sum_{c \in C} \sum_{s \in S} CT_{wcs}^t d_{sc} g_{wc} \quad (1a)$$

St:

$$\sum_{w \in W} g_{wc} = 1 \quad \forall c \in C \quad (1b)$$

$$\sum_{c \in C} \sum_{s \in S} d_{sc} g_{wc} \leq CAP_w z_w \quad \forall w \in W \quad (1c)$$

$$\sum_{w \in W} a_w \leq U_w \quad (1d)$$

$$\sum_{c \in C} d_{sc} g_{wc} \leq \sum_{f \in F} x_{fws} \quad \forall w \in W, \forall c \in C \quad (1e)$$

$$\sum_{f \in F} y_{vfr} \leq CAP_{vr} \quad \forall r \in R, \forall v \in V \quad (1f)$$

$$\sum_{w \in W} \sum_{s \in S} u_{rs} x_{fws} \leq \sum_{v \in V} y_{vfr} \quad \forall r \in R, \forall f \in F \quad (1g)$$

$$\sum_{w \in W} \sum_{s \in S} u_s x_{fws} \leq CAP_f \quad \forall f \in F \quad (1h)$$

$$\sum_{f \in F} \sum_{s \in S} x_{fws} \geq u_{min} \quad \forall w \in W \quad (1i)$$

$$a_w = \{0,1\} \quad \forall w \in W \quad (1j)$$

$$g_{wc} = \{0,1\} \quad \forall w \in W, \forall c \in C \quad (1k)$$

A função objetivo (1a) minimiza a soma do custo anual dos CD, os custos de processamento dos CD, os custos de produção das fábricas, os custos de transporte da matéria-prima para as fábricas e os custos de transporte das fábricas para as zonas de consumo, por intermédio dos CD. A restrição (1b) assegura que cada zona de consumo é atribuída a um único centro de distribuição, respeitando a abordagem *single-source*. A restrição (1c) garante que a capacidade de cada centro de distribuição não é violada. A restrição (1d) limita o número de CD a serem abertos. A restrição (1e) assegura que os CD possuem capacidade suficiente para atender as zonas de consumo. A restrição (1f) garante que a capacidade de o fornecedor abastecer a fábrica com

matérias-primas é respeitada. A restrição (1g) apresenta que a relação entre matéria-prima e produtos deve ser satisfeita. A restrição (1h) garante que a capacidade das fábricas será respeitada. A restrição (1i) impõe a quantidade mínima de produtos para abertura de um centro de distribuição. As restrições (1j) e (1k) são as condições de integralidade das variáveis binárias.

3.2.2 Modelo *arc-based*

O modelo de rede da cadeia de suprimentos denominado *arc-based* propõe a utilização de arcos de transporte entre as fábricas, os CD e as zonas de consumo. As variáveis de decisão são definidas sobre os arcos da rede, representando os fluxos de produtos e matérias-primas entre cada um dos elementos em dois níveis diferentes da rede de suprimentos. Essa formulação pode ser chamada de *one-to-many*, pois o modelo possibilita a um cliente receber produtos de mais de um centro de distribuição. Nessa formulação foi incluída uma estrutura que limita a quantidade de fábricas que podem ser abertas. A Figura 2 apresenta a estrutura da cadeia de suprimentos a partir da abordagem *arc-based*.

A abordagem *arc-based* proporciona que os custos de transportes sejam definidos pelos arcos entre as fábricas, CD e zonas de consumo de forma independente.

Definição das variáveis de decisão:

x_{wc}^s : Quantidade de produto $s \in S$ transportada do centro de distribuição $w \in W$ para a zona de consumo $c \in C$;

y_{vr}^r : Quantidade de matéria-prima $r \in R$ enviada do fornecedor $v \in V$ para a fábrica $f \in F$;

z_{fw}^s : Quantidade de produto $s \in S$ transportada da fábrica $f \in F$ para o centro de distribuição $w \in W$;

a_w : Variável binária, 1 se o centro de distribuição $w \in W$ está selecionado, e 0 caso contrário;

b_f : Variável binária, 1 se a fábrica $f \in F$ está selecionada, e 0 caso contrário.

O problema pode ser formulado como se segue:

• Modelo *arc-based*

$$\min \sum_{w \in W} CT_w^o a_w + \sum_{w \in W} CT_w^b b_w + \sum_{f \in F} \sum_{s \in S} \sum_{w \in W} CT_{fs}^p z_{fw}^s + \sum_{w \in W} \sum_{c \in C} \sum_{s \in S} CT_w^s x_{wc}^s + \sum_{f \in F} \sum_{r \in R} \sum_{v \in V} CT_{vr}^r y_{vfr}^r + \sum_{f \in F} \sum_{w \in W} \sum_{s \in S} CT_{fws}^t z_{fw}^s + \sum_{w \in W} \sum_{c \in C} \sum_{s \in S} CT_{wcs}^t x_{wc}^s \quad (2a)$$

St:

$$\sum_{w \in W} x_{wc}^s \geq d_c^s \quad \forall s \in S, \forall c \in C \quad (2b)$$

$$\sum_{c \in C} x_{wc}^s = \sum_{f \in F} z_{fw}^s \quad \forall s \in S, \forall w \in W \quad (2c)$$

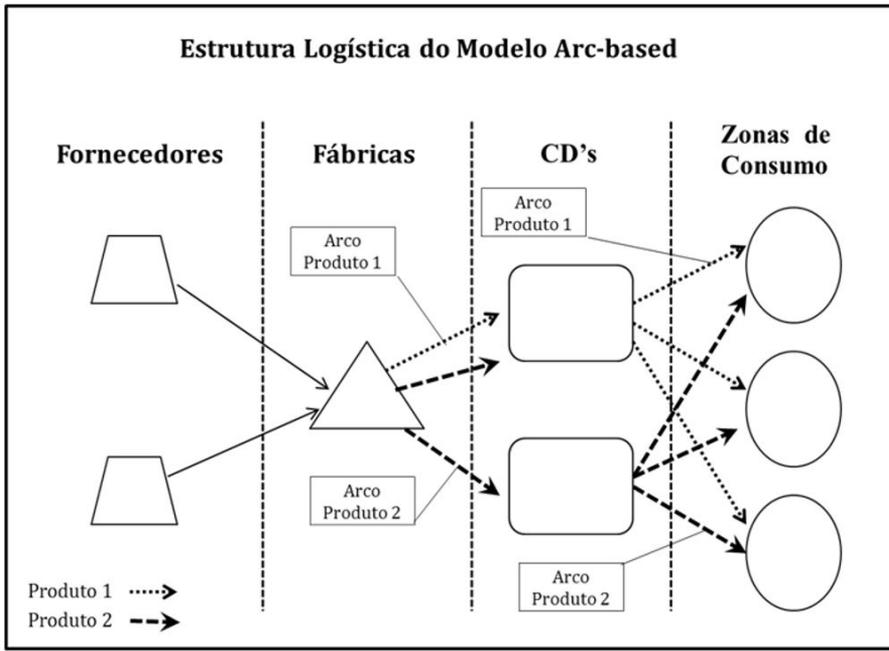


Figura 2. Estrutura logística do modelo *arc-based*.

$$\sum_{c \in C} \sum_{s \in S} x_{wc}^s \leq CAP_w a_w \quad \forall w \in W \quad (2d)$$

$$\sum_{f \in F} y_{vf}^r \leq CAP_{vr} \quad \forall r \in R, \forall v \in V \quad (2e)$$

$$\sum_{w \in W} \sum_{s \in S} u_{rs} z_{fw}^s \leq \sum_{v \in V} y_{vf}^r \quad \forall r \in R, \forall f \in F \quad (2f)$$

$$\sum_{w \in W} \sum_{s \in S} u_{fs} z_{fw}^s \leq CAP_f b_f \quad \forall f \in F \quad (2g)$$

$$\sum_{w \in W} a_w \leq U_w \quad (2h)$$

$$\sum_{f \in F} b_f \leq U_f \quad (2i)$$

$$a_w = \{0,1\} \quad \forall w \in W \quad (2j)$$

$$b_f = \{0,1\} \quad \forall f \in F \quad (2k)$$

A função objetivo (2a) minimiza a soma do custo anual dos CD, dos custos de processamento dos CD, dos custos fixos e produção das fábricas, dos custos de transporte de matéria-prima para as fábricas e dos custos de transporte de produtos das fábricas para os CD. A restrição (2b) assegura que as demandas dos clientes (zonas de consumo) são atendidas. A restrição (2c) assegura que a quantidade de produto transportada das fábricas para cada CD é igual à quantidade enviada pelo CD para as zonas de consumo. A restrição (2d) garante que a capacidade de cada centro de distribuição não é violada. A restrição (2e) assegura a capacidade de fornecimento de matéria-prima pelos fornecedores. A restrição (2f) garante a relação entre a quantidade de matéria-prima e a quantidade de produto. A restrição (2g) assegura que a capacidade das fábricas é respeitada. As restrições (2h) e (2i)

limitam o número de CD e fábricas que podem ser abertos. As restrições (2j) e (2k) são condições de integralidade das variáveis binárias.

3.3 Validação computacional

Os modelos foram implementados utilizando-se o ambiente ILOG OPL Studio[®], versão 6.3, e a validação resolvida pelo *solver* IBM ILOG CPLEX[®] versão 12.2 em sua configuração *default*, ou seja, sem tolerância para *gap* de otimalidade. Todos os procedimentos computacionais foram realizados em um PC com processador Core™ 2 Duo de 2,4 Ghz e RAM de 4Gb.

A realização de testes e experimentos possibilitou verificar e validar a funcionalidade dos modelos implementados. Esses experimentos tiveram como finalidade definir a capacidade do CPLEX[®] de resolver diferentes instâncias, principalmente em relação ao tamanho delas. As diferentes instâncias geradas deram ênfase à aplicação dos modelos em situações de diferentes quantidades de CD, produtos e zonas de consumo, de forma semelhante às implementações apresentadas nos trabalhos de Park (2005), Li et al. (2009), Golmohammadi et al. (2010) e Lee & Kwon (2010). Com isso, as implementações se aproximam, em relação à quantidade de restrições e variáveis, às instâncias demonstradas nos artigos de Jayaraman & Pirkul (2001) e Vidal & Goetschalckx (2001). A quantidade de fornecedores, tipos de matéria-prima e fábricas foram mantidas fixas em todas as instâncias. A capacidade de processamento e os custos fixos dos CD foram estabelecidos de forma a conferir caráter

realista ao problema abordado. A Tabela 1 apresenta um resumo das instâncias executadas.

Analisando-se a Tabela 1 observa-se que as implementações foram expostas gradativamente a problemas de maior complexidade em relação à quantidade de variáveis e restrições. A principal variável de decisão, que influencia fortemente a função objetivo, é a quantidade de CD abertos. De acordo com os resultados apresentados percebe-se que a quantidade de CD abertos varia em relação às abordagens *arc-based* e *single-source*. Embora, em algumas instâncias, a quantidade de CD seja a mesma nas duas abordagens, o custo total é maior nos resultados da abordagem *single-source* visto que a restrição 1b, que determina que cada cliente (zona de consumo) deve ser abastecido por um único CD, restringe o espaço de soluções em relação à abordagem *arc-based*, com conseqüente penalidade da função objetivo. Nesse sentido, a última coluna da Tabela 1 apresenta a variação percentual do custo total (das soluções encontradas) entre os modelos *arc-based* e *single-source* para cada instância executada.

Em relação ao tempo computacional, as instâncias submetidas à abordagem *single-source* apresentaram resultados melhores (menor tempo) quando comparados à abordagem *arc-based*. Embora aquela implementação apresente um número maior de variáveis inteiras, considerando-se a variável g_{wc} , a formulação *arc-based* é penalizada em função do excessivo número de variáveis x_{wc}^s necessárias para definir o fluxo de cada produto que sai de cada CD para atender as demandas de cada zona de consumo. Instâncias maiores, envolvendo mais de 30M variáveis inteiras e não-inteiras (sendo 750 mil variáveis devidas a x_{wc}^s) não foram resolvidas pelo CPLEX®.

Considerando-se a magnitude do problema a ser resolvido para a empresa foco do estudo de caso, os resultados apresentados em ambas as abordagens foram bastante satisfatórios e validaram a aplicação dos modelos *arc-based* e *single-source* para o projeto inicial da cadeia de suprimento da empresa, descrito na próxima seção.

4 Aplicação dos modelos para o projeto logístico

Nessa seção apresentamos a aplicação dos modelos matemáticos implementados para solucionar o problema do projeto inicial da rede da cadeia de suprimentos da indústria de produtora de *commodities* foco deste estudo. Para a aplicação dos modelos foi realizado um estudo preliminar para definir a demanda dos principais mercados atendidos pela empresa. Dada a grande quantidade de produtos, foram definidas três famílias de produtos para pesquisa de mercado. Após definir os principais polos de consumo (261 zonas de consumo), foi necessário mapear as distâncias de todas as zonas de consumo até as localidades onde os CD poderiam ser localizados. A partir da definição

das distâncias foi possível determinar o custo de transporte para cada localidade, baseado no custo médio de transporte de cada grupo de produtos. Diferentes cenários (*market shares*) foram elaborados para representar com a máxima fidelidade situações reais de operação. A aplicação dos modelos no estudo de caso é apresentada pelas seguintes etapas: coleta e estruturação dos dados, aplicação dos modelos e análise dos resultados.

4.1 Coleta e estruturação dos dados

O portfólio da empresa apresenta cerca de 160 diferentes *commodities*. Para a satisfatória execução dos modelos é necessária a definição da demanda de cada *commodity* para cada possível zona de consumo. Infelizmente, na fase de projeto em que este estudo foi realizado a empresa conhecia somente a demanda agregada para cada tipo de mercado, ou seja, a empresa desconhecia a demanda por possíveis zonas de consumo. A ausência dessa informação impediu a aplicação mais detalhada dos modelos desenvolvidos. Dessa forma, os modelos foram aplicados para o que foi denominado projeto inicial, cujo objetivo foi balizar todas as decisões da empresa até a obtenção de informações mais detalhadas de demanda das *commodities*, a serem definidas em conjunto com uma empresa especializada em análise de mercado. Os produtos, para esse projeto inicial, foram divididos em três grandes categorias, conforme o mercado a que se destinavam, e denominadas Commodity 1, Commodity 2 e Commodity 3.

Os modelos requerem que se conheçam os “clientes” que serão atendidos, sendo assim o mercado nacional foi dividido em duas categorias: (i) Mercado original: composto pelas demandas de empresas fabricantes de bens que utilizam essas *commodities* para montagem de seus produtos; e (ii) Mercado reposição: composto de lojas do varejo que comercializam as *commodities* para a substituição de produtos com excessivo desgaste por uso. Foram relegadas possíveis exportações nessa etapa do projeto. A demanda anual das *commodities* é fundamentalmente definida a partir das informações de produção de bens que necessitam das *commodities*, de dados de vendas das *commodities* em lojas do varejo e atacado, e do *market share* pretendido dentro de cada um desses mercados. As demandas do mercado original consideraram as informações de produção das fábricas de bens que utilizam as *commodities* como componentes de seu produto final. Nessa etapa foram considerados os principais *players* com fábricas no Brasil. Para a demanda do mercado de reposição foram considerados o número de bens que utilizam as *commodities* existentes em cada município ou região do país. Além disso, foram coletadas informações por meio de pesquisas realizadas nos *sites* (internet) das associações nacionais responsáveis pelas vendas e regulação das *commodities* tratadas nesta pesquisa.

Tabela 1. Resumo dos resultados computacionais.

Instâncias	Fornecedores	Matérias-primas	Fábricas (plantas)	CD	Produtos (grupos)	Consumidores (clientes)	Quantidade de produtos	Modelo arc-based			Modelo single-source			% var. custo \$
								CD abertos	Custo \$	Tempo (s)	CDs Abertos	Custo \$	Tempo (s)	
Instância 1	5	5	3	10	5	150	1.000.000	7	16.616.300	2,80	7	16.970.300	2,07	2,13%
Instância 2	5	5	3	20	5	150	1.000.000	9	16.165.200	7,17	9	16.541.500	2,42	2,33%
Instância 3	5	5	3	30	5	150	1.000.000	3	17.249.000	10,81	4	17.484.800	4,06	1,37%
Instância 4	5	5	3	40	5	150	1.000.000	12	15.003.100	32,34	13	15.453.300	7,65	3,00%
Instância 5	5	5	3	50	5	150	1.000.000	10	14.666.600	81,14	10	15.051.100	4,86	2,62%
Instância 6	5	5	3	10	10	150	1.575.000	4	29.129.000	4,69	4	31.098.000	2,45	6,76%
Instância 7	5	5	3	10	50	150	1.576.200	8	27.078.168	62,36	8	30.755.440	3,97	13,58%
Instância 8	5	5	3	10	100	150	1.583.100	7	25.788.806	152,03	7	29.169.246	9,61	13,11%
Instância 9	5	5	3	20	10	150	1.575.000	12	24.636.000	8,21	12	28.816.500	3,93	16,97%
Instância 10	5	5	3	20	50	150	1.576.200	14	25.683.340	138,60	13	30.880.456	10,97	20,24%
Instância 11	5	5	3	20	100	150	1.583.100	13	26.051.168	1062,33	13	31.226.678	39,62	19,87%
Instância 12	5	5	3	30	10	150	1.575.000	15	23.423.500	37,57	14	27.681.500	4,39	18,18%
Instância 13	5	5	3	30	50	150	1.576.200	15	24.571.496	945,34	13	29.728.252	13,54	20,99%
Instância 14	5	5	3	30	100	150	1.583.100		Out of Memory		13	27.813.526	36,44	-
Instância 15	5	5	3	40	10	150	1.575.000	19	24.047.600	127,76	17	28.525.950	10,74	18,62%
Instância 16	5	5	3	40	50	150	1.576.200	16	24.767.588	2687,56	14	29.947.862	15,03	20,92%
Instância 17	5	5	3	40	100	150	1.583.100		Out of Memory		15	28.943.138	54,42	-
Instância 18	5	5	3	50	10	150	1.575.000	15	23.248.000	177,77	14	27.532.500	4,96	18,43%
Instância 19	5	5	3	50	50	150	1.576.200	15	23.067.188	3743,47	14	27.763.300	17,45	20,36%
Instância 20	5	5	3	50	100	150	1.583.100		Out of Memory		15	27.935.264	38,47	-
Instância 21	5	5	3	20	10	150	3.000.600	18	48.963.496	6,79	15	60.940.660	7,12	24,46%
Instância 22	5	5	3	20	50	150	3.152.400	20	52.678.632	72,15	18	63.771.168	13,23	21,06%

As zonas de consumo foram definidas a partir de polos de demanda. Esses polos foram criados estabelecendo-se um círculo em torno de cidades com alta demanda dessas *commodities*, incorporando a demanda de cidades/regiões vizinhas menores. Por exemplo, a cidade de Ribeirão Preto, no estado de São Paulo, engloba as cidades de Taquaritinga, Matão, Pirassununga, Mococa, Porto Ferreira, Monte Alto, São José do Rio Pardo, Jaboticabal, Itápolis, Batatais e Sertãozinho. Dessa forma, a demanda do polo Ribeirão Preto é determinada pela soma das demandas estimadas de cada uma dessas cidades. Especificamente para a Commodity 1 foi utilizada a divisão territorial baseada nas informações do IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística) devido ao alto consumo dessa *commodity* em relação às demais, sendo as características socioeconômicas mais apropriadas para definir o agrupamento das cidades. Conforme os dados levantados, os círculos possuem as seguintes dimensões de diâmetro, considerando as demandas totais pelas *commodities*.

- Commodity 1: Definido pelo IBGE, divisão territorial do Censo 2006;
- Commodity 2: 100 km;
- Commodity 3: 100 km.

A partir dessas definições foram identificados cerca de 250 polos para a Commodity 1, 100 polos para a Commodity 2 e 100 polos para a Commodity 3. Possíveis zonas não consideradas pela falta de tangência dos círculos foram incorporadas no polo vizinho com maior demanda. Para a execução dos modelos foram considerados os mercados de reposição e original para os três grupos de *commodities* e a possibilidade de diferentes *market shares* em cada grupo e em cada mercado. Para priorizar os polos mais viáveis economicamente foi estabelecida uma linha de corte em relação às demandas da Commodity 1, considerando o *market share* pretendido pela empresa. Dessa forma foi definido que seriam atendidas somente as cidades com demanda superior a 500 unidades/ano. Conseqüentemente, o número de polos referente à Commodity 1 foi reduzido para 181. Para definir o total de zonas de consumo foi necessário o cruzamento dos polos para as três *commodities*, pois alguns apresentavam demandas específicas para um único tipo de *commodity*. Para o mercado original foram definidas 32 fábricas produtoras de

bens que necessitavam ser abastecidas por algum tipo de *commodity*. A partir dessas informações, o número de zonas de consumo para a execução dos modelos foi definido como de 261 zonas de consumo, conforme Tabela 2.

Após a definição das zonas de consumo foram selecionadas cinco cidades potenciais para a instalação de novos CD. A partir da definição da localização dos CD foi necessário considerar a distância de cada um desses CD até cada uma das zonas de consumo para se definirem os custos de transportes. A coleta de dados referentes às distâncias foi realizada a partir do serviço de roteirização disponibilizado na internet pelo Google Map[®]s. Utilizando-se essa ferramenta foi possível pesquisar as menores distâncias rodoviárias de aproximadamente 1.300 rotas diferentes.

Para o custo de transporte entre os CD e as zonas de consumo foi considerada a utilização de um único tipo de modal: rodoviário. Dessa forma consideramos que um caminhão tipo carreta com capacidade completa transporta em média, de forma exclusiva: 80 unidades da Commodity 1; 1.500 unidades da Commodity 2; e 240 unidades da Commodity 3. Dessa forma, o custo unitário médio de cada categoria, simplificada, foi definido de forma proporcional, na qual uma Commodity 1 corresponde a 20 unidades da Commodity 2 e cerca de 5 unidades da Commodity 3. A partir dessa proporcionalidade definimos o custo médio unitário de transporte por quilômetro para cada uma das *commodities*: \$0,040, \$0,002 e \$0,008, para a Commodity 1, 2 e 3, respectivamente.

A coleta e estruturação dos dados possibilitaram identificar as demandas do mercado para os três grupos de *commodities*. No entanto, a empresa tratada neste trabalho consegue atender somente parte dessas demandas, ou seja, para cada tipo de *commodity* deve ser definida a parcela de mercado (*market share*) que a empresa deseja atender. A partir de discussões com os executivos da empresa foram definidos diversos cenários da operação futura, considerando diferentes *market shares*, baseados em estratégias que podem ser adotadas pela empresa. A Tabela 2 apresenta as demandas anuais calculadas para cada mercado e que servem de base para a definição dos *market shares*.

As demandas de cada zona de consumo, para a execução dos modelos, foram computadas a partir da definição dos *market shares* de cada *commodity* e para cada mercado considerado. O Quadro 1 apresenta os cenários considerados para o estudo a partir da definição do percentual de demanda de mercado que

Tabela 2. Áreas e demandas do mercado de *commodities*.

Mercado	Commodity 1		Commodity 2		Commodity 3		TOTAL	
	Áreas	Demanda	Áreas	Demanda	Áreas	Demanda	Áreas comuns	Demanda
Reposição	181	556.951	107	36.180.162	105	6.781.554	229	43.518.667
Original	8	658.996	16	6.366.042	8	3.405.523	32	10.430.561
Total	189	1.215.947	123	42.546.204	113	10.187.077	261	53.949.228

a empresa deseja atender. Esses cenários procuram representar diferentes estratégias de atuação no mercado nacional, sendo que existe preocupação especial com o atendimento da demanda regional do estado onde se localiza a base fabril dessa indústria, por questões de incentivos fiscais, representada no Quadro 1 pelas linhas Original estado.

Em síntese, a Figura 3 apresenta o arranjo inicial do projeto da cadeia de suprimentos da empresa, composto por cinco fornecedores de cinco tipos diferentes de matérias-primas (responsáveis por 90% dos componentes totais das *commodities*). Embora a empresa já tenha uma planta industrial construída no exterior, a mesma foi desconsiderada nessa fase de projeto. A empresa definiu que as operações deveriam ser completamente independentes. Dessa forma, somente a nova planta a ser construída foi considerada. Os três grupos de produtos agregam dados referentes a 160 *commodities*. O fornecimento de matérias-primas é determinado em quantidade

suficiente para atender a única fábrica disponível no cenário. A capacidade de produção da fábrica, por sua vez, é suficiente para atender as demandas de acordo com o *market share* definido pela empresa. As informações de capacidade e custos fixos para as instalações consideradas foram determinadas de acordo com as informações apresentadas pela empresa.

4.2 Aplicação dos modelos e análise dos resultados

As duas abordagens de soluções foram aplicadas aos três cenários propostos no Quadro 2. Essa iniciativa visa fornecer um conjunto de alternativas para o projeto logístico da empresa de acordo com o *market share* de cada um dos cenários. Nos cenários Market Share 1 e Market Share 2, as duas abordagens são aplicadas para encontrar a solução ótima conforme a respectiva demanda, no entanto uma segunda execução foi realizada para identificar o melhor

Quadro 1. Cenários do *market share*.

Cenários	Mercado	Commodity 1	Commodity 2	Commodity 3
Market Share 1	Reposição	10%	10%	10%
	Original	10%	10%	10%
	Original estado	10%	10%	10%
Market Share 2	Reposição	20%	10%	15%
	Original	20%	10%	15%
	Original estado	25%	10%	15%
Market Share 3	Reposição	20%	10%	15%
	Original	20%	10%	15%
	Original estado	35%	10%	15%

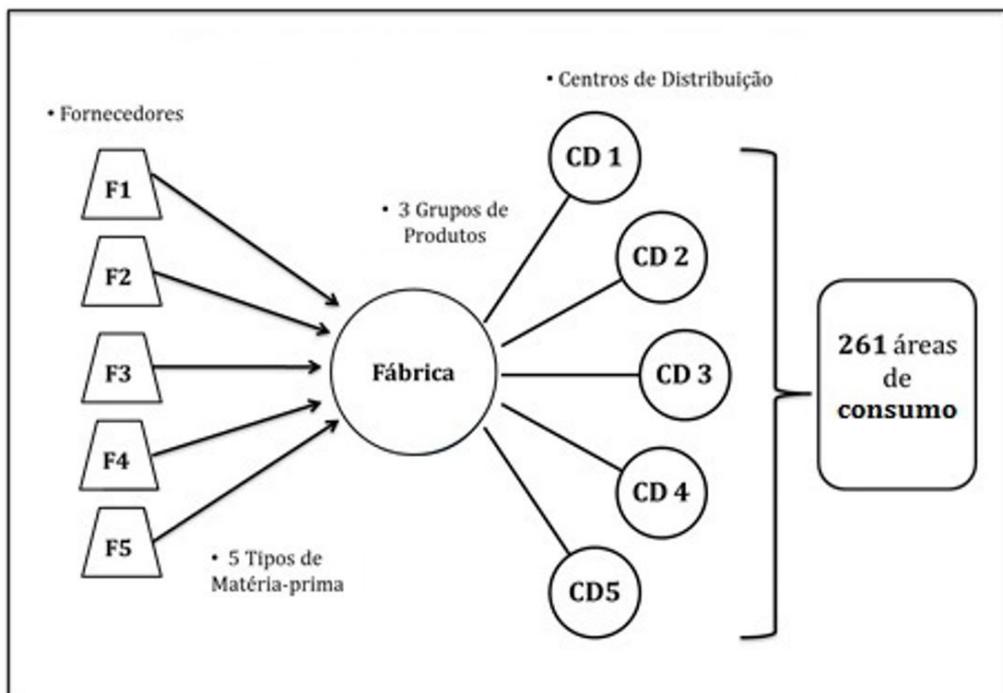


Figura 3. Arranjo inicial do projeto da cadeia de suprimentos.

Quadro 2. Síntese de resultados dos cenários.

Cenário	Modelo	Demanda (produtos)	CD (abertos)	Custo total \$	Tempo (segundos)	Iterações
	(abordagem)			(operação)		
Market Share 1	<i>single-source</i> 1	5.391.881	1, 2 e 5	\$56.882.604	32,32	4.868
	<i>single-source</i> 2	5.391.881	1 e 5	\$66.020.663	10,32	767
	<i>arc-based</i> 1	5.391.881	1, 2 e 5	\$55.678.012	13,04	656
	<i>arc-based</i> 2	5.391.882	1 e 5	\$62.553.128	10,22	1.044
Market Share 2	<i>single-source</i> 3	6.037.604	1, 2 e 5	\$68.474.638	13,05	1.016
	<i>single-source</i> 4	6.037.604	1 e 5	\$83.386.676	8,3	874
	<i>arc-based</i> 3	6.037.604	1, 2 e 5	\$65.171.209	11,47	635
	<i>arc-based</i> 4	6.037.604	1 e 5	\$78.109.464	8,35	1.139
Market Share 3	<i>single-source</i> 5	6.070.660	1 e 5	\$83.920.572	6,41	15
	<i>single-source</i> 6	6.070.660	3 e 5	\$93.663.497	6,1	21
	<i>single-source</i> 7	6.070.660	4 e 5	\$104.956.316	5,57	12
	<i>arc-based</i> 5	6.070.660	1 e 5	\$80.031.564	6,05	450
	<i>arc-based</i> 6	6.070.660	3 e 5	\$88.414.182	6,14	457
	<i>arc-based</i> 7	6.070.660	4 e 5	\$95.278.179	6,12	487

projeto logístico, restringindo-se a quantidade de CD que podem ser abertos, nesse caso, a apenas dois. Nessa dinâmica, a primeira execução permite identificar o conjunto de CD que otimiza a operação de distribuição. Já a segunda execução identificou os dois CD potenciais para a composição do projeto logístico. Evidentemente, a primeira execução traz a solução ótima e, conseqüentemente, o menor custo total de operação. Já a segunda execução permite estruturar a rede logística com apenas dois CD e apresenta um custo operacional maior, pois o custo de transporte aumenta devido ao aumento da distância entre os CD e os clientes. A configuração do projeto logístico com apenas dois CD, embora mais onerosa, proporciona um menor fluxo de transporte, principalmente em relação ao fornecimento de matérias-primas. Além disto, por uma opção estratégica da empresa, visto a complexidade de gestão de cada centro de distribuição para esse tipo de indústria, foi solicitada a apresentação de cenários dispondo de apenas dois CD para análise da decisão do projeto logístico.

A aplicação as abordagens *single-source* e *arc-based* apresentou desempenho satisfatório com relação à execução computacional para a solução dos problemas a partir da definição de diferentes *market shares*. Os modelos forneceram soluções viáveis em tempos computacionais aceitáveis, além de apresentarem o conjunto de CD que minimiza o custo total de operação da cadeia de suprimentos da indústria. Dessa forma foi possível analisar a funcionalidade dos modelos no atendimento das mais diversas demandas de mercado.

Analisando-se o Quadro 2 podemos ver que os resultados da abordagem *arc-based* apresentam-se mais satisfatórios em relação aos da abordagem *single-source*, confirmando os resultados preliminares da fase de experimentação. Na abordagem *arc-based*, a empresa não efetiva exclusividade de fornecimento de produtos de um centro de distribuição para áreas

de demanda específicas. Dessa forma, uma zona de consumo (mercado) poder ter seu fornecimento de produto sob responsabilidade de mais de um centro de distribuição. Tal característica aumenta a necessidade de controle da empresa na gestão do atendimento das zonas de consumo, assim como o fluxo das operações em relação à demanda de cada produto. De acordo com os resultados, independentemente do cenário, a estratégia adotada pelas soluções *arc-based* apresentam melhores resultados econômicos, ou seja, menores custos totais. Dessa forma, pode-se afirmar que a abordagem *arc-based* possibilita uma operação que minimiza os custos totais de operação da cadeia de suprimentos. Contudo, a implementação dessa estratégia pode levar a custos administrativos que podem diminuir ou mesmo suprimir essa vantagem inicial. Estudos mais aprofundados devem ser realizados.

Em relação ao conjunto de CD propostos para solução ótima, observa-se que há unanimidade na seleção do CD 5. Pode-se concluir que esse CD é fundamental para a otimização da operação de distribuição da empresa, provavelmente devido à localização geográfica em relação à planta de produção (fábrica). Além disto, o CD 5 pode ser considerado de extrema importância estratégica pela sua proximidade em relação às zonas de consumo com potencial de mercado grande, tanto mercado de reposição quanto original.

Para o cenário Market Share 3 foram realizadas seis diferentes execuções que possibilitaram analisar diferentes opções para a rede logística. Essas instâncias possibilitaram identificar as melhores alternativas para atender as demandas dos mercados com menor custo, de acordo com o conjunto de CD disponíveis. Dessas execuções, a instância *arc-based* 5 apresentou o menor custo de operação envolvendo a distribuição de 6.070.600 produtos para os 261 consumidores. Nessa composição, os CD 1 e 5 formam o conjunto que minimiza o custo total de operação para atender

a totalidade da demanda do Market Share 3. Dessa forma, a modelagem *arc-based* 5 fornece a melhor configuração para rede da cadeia de suprimentos para distribuição *multicommodity*.

Analisando-se o tempo computacional para encontrar solução viável para os cenários propostos, não há diferença significativa entre as abordagens *single-source* e *arc-based*. Sendo assim, pode-se afirmar que ambas as abordagens apresentam resultados computacionais similares e em níveis toleráveis de execução, de acordo com a literatura apresentada neste artigo.

5 Considerações finais

Os modelos *single-source* e *arc-based* representam diferentes estratégias de distribuição e as modelagens matemáticas de ambas as estratégias apresentaram resultados importantes para o projeto logístico inicial da empresa pesquisada neste trabalho. A decisão de adotar a estratégia da abordagem *single-source*, a qual exige que cada cliente receba todos os tipos de produtos de um único centro de distribuição, pode trazer benefícios em relação à gestão operacional por meio de ganhos de produtividade e na qualidade dos serviços, pois o cliente se reportará exclusivamente a um único centro de distribuição. Por outro lado, a abordagem *arc-based* possibilita estruturar a rede da cadeia de suprimentos otimizando os custos totais das operações de produção e transporte.

É importante ressaltar que a metodologia Pesquisa Operacional utilizada neste trabalho permitiu desenvolver formulações e implementações que apresentaram importantes resultados para a viabilização do projeto logístico da empresa. Isso foi possível pela resolução de instâncias que representavam situações práticas do mundo real. Dessa forma foi possível verificar a aderência dos modelos implementados, assim como validar a sua funcionalidade.

Embora o foco deste trabalho seja determinar quais CDs devem ser abertos para compor a rede logística da indústria, os modelos desenvolvidos abrangem toda a rede da cadeia de suprimentos. Portanto, os modelos determinam a quantidade de matérias-primas que deve ser fornecida, assim como quais fornecedores devem suprir cada uma das fábricas, a partir das demandas de cada produto para cada zona de consumo. Independentemente do cenário, os modelos *single-source* e *arc-based* apresentam soluções para o projeto logístico da cadeia de suprimentos que atendem integralmente a demanda, assim como o fornecimento de matéria-prima em quantidade e custos alinhados à proposta de minimização do custo operacional.

O resultado final deste trabalho pode ser descrito como desenvolvimento de modelos matemáticos que permitem identificar a melhor composição da rede logística analisando diferentes cenários. Os modelos construídos prestam-se ao apoio de importantes

decisões em relação ao projeto logístico da cadeia de suprimentos da indústria foco desta pesquisa. Nesse sentido é possível adaptar esses modelos matemáticos para soluções em diferentes segmentos da indústria.

Projetando estudos futuros, sugere-se que diferentes tipos de modais de transporte (trem, navio, caminhão) sejam incorporados na modelagem matemática da cadeia de suprimentos. Além disso, heurísticas podem ser desenvolvidas para solucionar instâncias que envolvam um maior número de produtos. Para isso é necessário um estudo preliminar que determine as demandas de cada produto para cada área de consumo. Propõe-se também que o problema logístico da cadeia de suprimentos seja ampliado com a introdução de uma variável relacionada a tempo. Dessa forma, as soluções de planejamento da cadeia de suprimentos abordariam não somente as questões de custos, mas também aspectos táticos tais como prazos de entrega, níveis de produção, de armazenagem e de transporte.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Capes e ao CNPq pelo apoio financeiro.

Referências

- Alonso-Ayuso, A., Escudero, L. F., Garin, A., Ortuño, M. T., & Pérez, G. (2003). An approach for strategic supply chain planning under uncertainty based of stochastic 0-1 programming. *Journal of Global Optimization*, 26(1), 97-124. <http://dx.doi.org/10.1023/A:1023071216923>.
- Ballou, R. (2006). *Gerenciamento da cadeia de suprimentos* (5. ed.). Porto Alegre: Bookman.
- Bowersox, D. J., Closs, D. J., & Cooper, M. B. (2006). *Gestão logística de cadeias de suprimentos*. Porto Alegre: Bookman.
- Cole, M. H. (1995). *Service considerations and the design of strategic distribution systems* (Tese de doutorado). Georgia Institute of Technology, Atlanta.
- Geoffrion, A. M., & Graves, G. W. (1974). Multicommodity distribution system design by benders decomposition. *Management Science*, 20(5), 822-844. <http://dx.doi.org/10.1287/mnsc.20.5.822>.
- Geoffrion, A. M., & Powers, R. F. (1995). Twenty years of strategic distribution system design: an evolutionary perspective. *Interfaces*, 25(5), 105-128. <http://dx.doi.org/10.1287/inte.25.5.105>.
- Golmohammadi, V., Afshari, H., Hasanzadeh, A., & Rahimi, M. (2010). A heuristic approach for designing a distribution network in a supply chain system. *African Journal of Business Management*, 4(3), 308-311.
- Jang, Y. J., Jang, S. Y., Chang, B. M., & Park, J. (2002). A combined model of network design and production/distribution planning for a supply network. *Computers & Industrial Engineering*, 43(1-2), 269-281. [http://dx.doi.org/10.1016/S0360-8352\(02\)00074-8](http://dx.doi.org/10.1016/S0360-8352(02)00074-8).

- Jayaraman, V., & Pirkul, H. (2001). Planning and coordination of production and distribution facilities for multiple commodity. *European Journal of Operational Research*, 133(2), 394-408. [http://dx.doi.org/10.1016/S0377-2217\(00\)00033-3](http://dx.doi.org/10.1016/S0377-2217(00)00033-3).
- Lee, Y. H., & Kwon, S. G. (2010). The hybrid planning algorithm for the distribution center operation using tabu search and decomposed optimization. *Expert Systems with Applications*, 37(4), 3093-3103. <http://dx.doi.org/10.1016/j.eswa.2009.09.020>.
- Li, J., Chu, F., & Prins, C. (2009). Lower and upper bounds for a capacitated plan location problem with multicommodity flow. *Computers & Operations Research*, 36(11), 3019-3030. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cor.2009.01.012>.
- Ma, H., & Suo, C. (2006). A model for designing multiple products logistics networks. *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, 36(2), 127-135. <http://dx.doi.org/10.1108/09600030610656440>.
- Papageorgiou, G. E., Rotstein, G. E., & Shah, N. (2001). Strategic supply chain optimization for the pharmaceutical industries. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 40(1), 275-286. <http://dx.doi.org/10.1021/ie990870t>.
- Park, Y. B. (2005). An integrated approach for production and distribution planning in supply chain management. *International Journal of Production Research*, 43(6), 1205-1224. <http://dx.doi.org/10.1080/00207540412331327718>.
- Pirkul, H., & Jayaraman, V. (1996). Distribution planning in a multi-commodity tri-echelon system. *Transportation Science*, 30(4), 291-302. <http://dx.doi.org/10.1287/trsc.30.4.291>.
- Pirkul, H., & Jayaraman, V. (1998). A multi-commodity, multi-plant, capacitated facility location problem: formulation and efficient heuristic solution. *Computers & Operations Research*, 25(10), 869-878. [http://dx.doi.org/10.1016/S0305-0548\(97\)00096-8](http://dx.doi.org/10.1016/S0305-0548(97)00096-8).
- Shen, Z. J. (2005). A multi-commodity supply chain design problem. *Institute of Industrial Engineers Transactions*, 37, 753-762.
- Vidal, C. J., & Goetschalckx, M. (1997). Strategic production-distribution models: a critical review with emphasis on global supply chain models. *European Journal of Operational Research*, 98(1), 1-18. [http://dx.doi.org/10.1016/S0377-2217\(97\)80080-X](http://dx.doi.org/10.1016/S0377-2217(97)80080-X).
- Vidal, C. J., & Goetschalckx, M. (2001). A global supply chain model with transfer pricing and transportation cost allocation. *European Journal of Operational Research*, 129(1), 134-158. [http://dx.doi.org/10.1016/S0377-2217\(99\)00431-2](http://dx.doi.org/10.1016/S0377-2217(99)00431-2).