

Modelagem matemática para o problema de localização de centros de distribuição de empresa de alimentos

Cauê Sauter Guazzelli¹, Claudio Barbieri da Cunha²

Resumo: Neste trabalho é apresentado um modelo matemático para um problema real de localização de centros de distribuição de uma indústria de alimentos na América Latina, buscando retratar suas peculiaridades operacionais e que normalmente não são consideradas nos trabalhos encontrados na literatura científica. Mais especificamente, é proposto um modelo de programação inteira mista que considera múltiplos produtos, múltiplas camadas (com transferência entre unidades da mesma camada), pontos de *cross-docking*, restrições de capacidade e custos fixo e variável para as unidades, além do ganho de escala em função do tamanho de centros de distribuição. O modelo permite a determinação dos melhores locais e os tamanhos ideais para instalação dessas unidades logísticas, bem como dos fluxos de transporte ótimos entre todas as instalações de forma a minimizar o custo operacional total. São apresentados resultados considerando dados reais da empresa para diferentes cenários que refletem níveis de serviço distintos e seus custos resultantes. Os cenários são comparados com o cenário base, possibilitando entender como os custos operacionais se comportam em relação aos diferentes níveis de serviço. Os resultados obtidos possibilitaram reduções do custo operacional total de até 8,3%, mantendo os níveis de serviço próximos aos atuais, os quais são bastante significativos considerando-se as baixas margens de lucro do setor e os altos custos logísticos em relação aos preços finais.

Palavras-chave: Otimização de redes logísticas. Ganho de escala. Localização de centros de distribuição.

Abstract: In this paper we propose a mathematical model for a real-world problem of locating distribution centers for a food industry in Latin America. Our model aims to properly represent the peculiarities of the logistics operation that are not usually considered in the scientific literature. More specifically we propose a mixed integer programming model that considers multiple products, multiple layers (with transfer between units of the same layer allowed), cross-docking points, capacity constraints and fixed and variable costs for facilities, as well as economies of scale due to the size of the distribution centers. The model aims to determine the best locations and sizes for these logistic facilities, as well as the transport flows among them, in order to minimize the total operating cost. We also present the results for real-world scenarios for the company, which reflect different levels of service and their associated costs. These outputs are compared to the base scenario, thus allowing trade-offs to be analyzed. The results allowed savings in operational costs up to 8.3%, with levels of services close to the actual ones. These outcomes are considered expressive given the low profit margins of the sector and the high logistics costs when compared to the final prices.

Keywords: Optimization of logistic networks. Economies of scale. Location of distribution centers.

1 INTRODUÇÃO

É usual que as empresas dos segmentos de alimentos e bebidas que atendem o varejo apresentem estruturas logísticas tais que as suas fábricas abasteçam os centros de distribuição e estes atendam seus clientes, seguindo uma estrutura de rede hierárquica. No entanto, podem existir características e condicionantes práticas de aplicações reais que tornam essa estrutura, bem como a operação e, conseqüentemente, a sua modelagem matemática mais complexas.

Uma delas é, por exemplo, quando determinadas fábricas produzem apenas parte do portfólio de produtos que são comercializados; em outras palavras, muitas indústrias operam

com fábricas especializadas em um ou alguns tipos de produto, sendo que nenhuma das unidades produtivas contemple todos ou a maioria dos itens que usualmente compõem os pedidos. Já os centros de distribuição (CD's) normalmente operam com uma diversidade maior de tipos de produtos, em geral operando com todo o portfólio que a empresa comercializa em sua região de atendimento, uma vez que cada cliente é abastecido por apenas um CD.

Outra característica desses segmentos que atendem ao varejo são tipos de clientes muito heterogêneos, desde pequenos pontos de venda dispersos, como lanchonetes e mercearias, e que compram em pequenas quantidades, até supermercados que apresentam volumes de venda significativamente maiores, gerando pedidos normalmente maiores. Além disso, pode ocorrer que a operação de vendas e distribuição seja terceirizada em determinadas regiões, operada por empresas distribuidoras que comercializam os produtos. Normalmente esses

¹ Departamento de Engenharia de Transportes, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (caue@inpo.eng.br).

² Departamento de Engenharia de Transportes Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (cbcunha@usp.br).

Manuscrito recebido em 02/03/2014 e aprovado para publicação em 18/09/2014. Este artigo é parte de TRANSPORTES v. 22, n. 3, 2014. ISSN: 2237-1346 (online).

DOI: <http://dx.doi.org/10.14295/transportes.v22i3.767>.

distribuidores são modelados como clientes especiais da indústria, com volume muito alto, recebendo normalmente a carga do tipo lotação, sendo assim o único destinatário da carga de um veículo que o atende (*full truck load*).

Outra característica desse segmento de varejo é a demanda geograficamente concentrada, como ocorre especialmente na América Latina. Reflexo do desenvolvimento urbano, o povoamento na região apresenta um padrão heterogêneo, com a população concentrada em poucas cidades maiores, e a demanda seguindo também este padrão.

Essa demanda geograficamente concentrada em algumas regiões e menos concentradas em outras pode acarretar a necessidade de

centros de distribuição de tamanhos muito diferentes, além de requerer a criação de outro tipo de CD, denominado ponto de *cross-docking* ou *transit-point*, que são unidades logísticas que não têm estoque de produtos acabados e onde são feitas operações de transbordo e reconsolidação da carga que chega em veículos maiores para ser distribuída utilizando veículos menores.

Os custos de operação de cada um dos tipos de centros de distribuição (CD), e de tamanhos distintos, podem apresentar comportamentos significativamente diferentes, uma vez que o ganho de escala passa a alterar a estrutura de custos das operações, como pode ser observado na Figura 1.

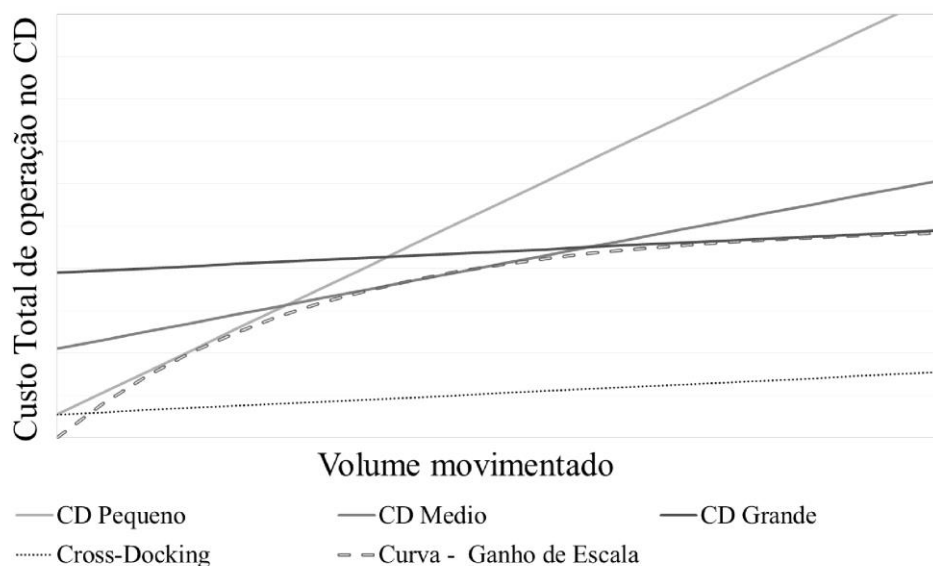


Figura 1 - Exemplo de curva de ganho de escala em CDs

A curva escala que representa os ganhos de escala de uma operação de CD, representada pela linha tracejada, é aproximada por segmentos de reta, que representam a estrutura de custos de cada tipo de CD (representado por seu tamanho), que é composta por custos fixos e variáveis. Para as unidades que correspondem a pontos de *cross-docking* (linha pontilhada), tanto o custo fixo quanto o custo variável normalmente são menores que os custos dos demais tipos de CD, uma vez que apresentam uma estrutura física e necessidade de mão-de-obra menores. Por outro lado, esse tipo de CD só pode receber produtos de unidades expedidoras de mercadoria, usualmente outros centros de distribuição, uma vez que não tem capacidade de manter produtos armazenados em estoque.

Além disso, a presença de CDs obrigató-

rios em determinadas regiões é um condicionante que surge em aplicações práticas. Em alguns casos, por questões contratuais de locação ou por questões comerciais, grandes indústrias tomam decisões estratégicas de forçar a existência de unidades em determinadas cidades ou regiões, mesmo que isso signifique certo aumento no custo logístico.

Finalmente, diferentes acordos de nível de serviço também são elementos importantes que afetam a configuração logística das empresas. No ambiente competitivo atual, a garantia do atendimento ao acordo de nível de serviço vigente, tanto em termos de frequência ou periodicidade de entrega quanto em termos de *lead time* entre pedido e entrega, se torna uma questão preponderante na decisão da localização de centros de distribuição, funcionando como condicionante comercial que deve ser asseguro-

rado pelas soluções a serem obtidas.

Tendo em vista que os modelos matemáticos encontrados na literatura científica não consideram, em uma única modelagem, tais especificidades práticas que ocorrem em problemas reais, este trabalho objetiva propor uma formulação baseada em programação inteira mista que possibilite considerá-las em sua totalidade, com a finalidade de atender a necessidade de representação mais próxima da realidade de empresas de bens de consumo, principalmente aquelas localizadas em regiões como a América Latina.

Mais especificamente, o modelo proposto tem por finalidade a localização ótima de centros de distribuição capacitados, considerando custos fixos e variáveis (e o ganho de escala em função dos tipos de CDs), além de ser multiproduto, com múltiplas camadas, hierárquico, e permitindo transferências entre unidades de mesma camada.

Adicionalmente, a modelagem proposta permite impor a abertura de CDs em determinados locais, e limitar o tempo máximo de ligação entre o CD e o ponto de atendimento, além de outras características que serão detalhadas mais adiante.

O restante deste artigo está organizado da seguinte forma. A seção 2 contempla uma revisão bibliográfica a fim de situar o trabalho no contexto da pesquisa em localização. A seção 3 entra no detalhe de uma operação real, para a qual o modelo matemático foi aplicado. A seção 4 apresenta o detalhamento e formulação do modelo matemático. A seção 5 mostra a aplicação do problema ao caso real, bem como o aprofundamento das características e detalhamento das questões que tiveram maior impacto na modelagem e na seção 6 são apresentados os resultados das modelagens. Finalmente, na seção 7 são apresentadas as considerações finais do trabalho.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Segundo Current, Daskin e Schilling (2002), não só o problema de localização é inerente a diversos setores da sociedade, como as decisões de localização são frequentemente feitas em todos os níveis das organizações humanas, desde indivíduos e famílias, até empresas, agências governamentais e agências internacionais.

De acordo com Ballou (2001) a teoria de localização de instalações é base para a modelagem matemática do problema de configuração de redes logísticas, também conhecido como projeto de cadeias de suprimentos.

Conforme Cunha (2006), o projeto (ou configuração) de redes logísticas, tanto de distribuição quanto de suprimento, ou até mesmo de transporte, é um dos problemas macrologísticos mais relevantes enfrentados pelas empresas. A configuração da rede depende, necessariamente, das características operacionais de cada empresa e de seu negócio e envolve, entre outras, as seguintes decisões: determinação do número, localização e tamanho de cada instalação; determinação dos clientes a serem atendidos por cada instalação; determinação dos fluxos entre as instalações logísticas e os pontos de oferta e demanda, podendo eventualmente incluir decisões quanto aos modos de transporte a serem utilizados. As instalações passíveis de serem consideradas podem englobar unidades industriais de produção, armazéns, terminais e centros de distribuição, entre outras.

Segundo Novaes (1989), o problema da localização de instalações foi tratado de modo bastante amplo na literatura, envolvendo desde problemas mais simples de localização de uma única instalação, até problemas bastante complexos, com várias instalações a serem localizadas, em diversos níveis de uma cadeia produtiva ou de serviços, com fluxos de naturezas distintas.

O tipo de modelagem matemática mais usual trata do problema de localização discreta, que consiste na definição de quais locais deverão ser selecionados para serem instaladas unidades logísticas, dado um conjunto de candidatos pré-selecionados. Daskin (1995) relaciona os principais tipos de modelos matemáticos discretos de localização já desenvolvidos. Estes modelos servem como base para as formulações derivadas que abordam outras características das operações logísticas. Brandeau e Chiu (1989) apresentam uma resenha contemplando 54 trabalhos sobre localização com o objetivo de fornecer uma visão abrangente da maioria dos problemas estudados na época, com suas formulações e como eles se relacionam entre si. Já Current, Daskin e Schilling (2002) relacionam 51 referências bibliográficas sobre o assunto, envolvendo inúmeras aplicações diferen-

tes, destacando seu aspecto multidisciplinar.

O chamado Modelo de Cobertura tem o objetivo de identificar o conjunto de instalações que garantam que todos os pontos de demanda tenham a distância da instalação mais próxima menor ou igual a uma distância definida D . Pode ser interpretado, no contexto logístico, como um modelo que busca uma solução com a menor quantidade de instalações que garanta um “nível de serviço” determinado. Neste modelo porém o custo fixo não é considerado senão indiretamente por meio da busca da quantidade mínima de unidades necessárias.

Uma alternativa ao Modelo de Cobertura é o modelo de P -centros, que considera um número de instalações dado exogenamente. Seu objetivo então é a busca de uma configuração que minimize a distância máxima entre um ponto de demanda e a instalação mais próxima. Pode ser representado, no contexto logístico, como o objetivo de minimizar o pior nível de serviço, dada uma quantidade de instalações já estipulada.

Já o Modelo de P -medianas é uma evolução do Modelo de P -centros, e tem como função objetivo a minimização da distância total ponderada entre as instalações e os pontos de demanda a estas alocadas.

Este tipo de modelo desempenha uma melhor aproximação ao objetivo de minimizar o custo operacional melhorando o nível de serviço médio, dada uma quantidade de instalações fixa. Essa modelagem pode ser interpretada como se os custos fixos de todos os candidatos fossem iguais. Se a informação de distância entre os candidatos a instalações e os clientes for interpretada como uma aproximação do custo de transporte por unidade de volume, o modelo se aproximará ainda mais de uma operação real. Para mais detalhes, recomendam-se os trabalhos de Daskin (1995), Drezner (2004) e ReVelle e Eiselt (2005).

Algumas hipóteses do problema das P -medianas podem não ser apropriadas para algumas situações que envolvem a localização de instalações, em particular: (i) todas as instalações têm o mesmo custo fixo; (ii) as instalações não têm limite de capacidade; (iii) o número de instalações a serem selecionadas é definido a priori (igual a p).

Uma generalização do problema das P -medianas consiste na consideração dos custos fixos de cada instalação candidata a ser aberta,

o que define o chamado Problema de Localização de Planta Simples (*Simple Plant Location Problem*). Esta característica implica que o modelo consegue definir também qual é a quantidade ideal de instalações a serem abertas, de tal forma que o custo total, composto das parcelas de custo de transporte e custo fixo, seja minimizado. Boas referências sobre esse problema podem ser encontradas em Mirchandani e Francis (1990) e ReVelle, Eiselt e Daskin (2008).

O Problema de Localização de Instalações Capacitadas (*Capacitated Facility Location Problem*) corresponde à generalização do Problema de Localização de Planta Simples em que são conhecidas as capacidades de cada candidato. Essa restrição impõe soluções em que alguns clientes podem não ser atendidos pela instalação selecionada mais próxima. Para boas referências pode-se citar Sridharan (1995), Mazzola e Neebe (1999), Melkote e Daskin (2001), e Yang, Chu e Chen (2012).

Modelos de localização mais complexos consideram ainda mais de uma camada de unidades. Uma vez que nas redes logísticas existem diferentes tipos de instalações cujas funções são complementares, esse tipo de modelo possibilita que as interações entre estas unidades sejam representadas. Neste caso, o modelo permite definir a localização conjunta de instalações de diferentes tipos, incluindo fábricas, centros de distribuição e até locais de consolidação de carga (*hubs*) e de pontos de transbordo (*cross-docking*). Os tipos ou camadas de instalações podem ser hierárquicas (cada local de determinada camada só pode receber fluxo da camada diretamente superior) ou não hierárquicas (os fluxos entre unidades são livres, permitindo que existam, por exemplo, fluxos de transporte entre dois centros de distribuição). Uma boa referência é o trabalho de Şahin e Süral (2007) que apresentam uma ampla revisão sobre o assunto.

Segundo Melo, Nickel e Saldanha-Da-Gama (2009) pouca importância tem sido dada a modelos que permitem fluxos de produtos entre instalações que fazem parte da mesma camada, como transporte entre CDs ou entre fábricas. Existem casos porém onde este fator é considerado na modelagem, como nos trabalhos de Aghezzaf (2005), Carlsson e Rönnqvist (2005), Cordeau, Pasin e Solomon (2006), Melo, Nickel e Saldanha da Gama (2006), Tronco-

so e Garrido (2005), Vila, Martel e Beauregard (2006), e Wouda et al. (2002).

Outro aspecto importante a fim de aproximar mais as modelagens da operação real é a consideração de múltiplos produtos ou famílias de produtos, denominados genericamente de modelos multiprodutos, uma vez que existem casos em que algumas fábricas são “especialistas”, ou seja, produzem apenas parte do portfólio de uma empresa; ou ainda fornecedores que produzem apenas uma linha de produtos. Consequentemente, as variáveis de fluxos de transporte devem estar associadas a cada tipo de produto considerado no problema. Para mais detalhes de modelos multiprodutos sugere-se, por exemplo, o trabalho de Klose & Drexl (2005) e suas referências. Os modelos deste tipo já podem apresentar maior complexidade matemática uma vez que diversas variações podem ser incorporadas a sua formulação a fim de representar situações encontradas na prática em cada cadeia logística e cada empresa.

Algumas outras restrições e condicionantes podem ser contemplados em modelos mais complexos voltados a resolver problemas reais encontrados na prática. Esses são o caso de restrições que garantem que o tempo de deslocamento ou a distância dos clientes até o ponto definido para seu atendimento seja menor ou igual aos acordos de nível de serviço estipulados, como em Keskin e Üster (2007), Lee e Dong (2008), Syam (2002) e Wang et al. (2003) e da definição de faixas de número de unidades permitidas para cada camada da cadeia, como em Altıparmak et al. (2006), Hinojosa, Puerto e Fernández (2000), Hinojosa et al. (2008), Jayaraman e Pirkul (2001), Pati, Vrat e Kumar (2008) e Wouda et al. (2002).

As características citadas acima, além de geralmente serem de fácil utilização nos modelos, restringem o espaço de soluções possíveis, o que pode inclusive acarretar na redução do tempo computacional de resolução. Este também é o caso da imposição de abertura de certa quantidade de unidades em determinadas regiões decorrente de decisões comerciais, porém este aspecto não tem sido explorado na literatura.

Outra característica também não muito aprofundada na literatura, e que é abordada neste trabalho, é a consideração de ganho de escala nos custos dos CDs em função do seu tamanho. Usualmente na literatura os ganhos

de escala são aplicados em custos de transporte, como fez, por exemplo, Fleischmann (1993). Mais recentemente, Xu (2013) apresenta resultados dos estudos desenvolvidos que avaliam como mudanças na tecnologia de transportes e de produção impactam na localização de unidades logísticas. Já Baumgartner, Fuetterer e Thonemann (2012) avançaram na literatura aplicando, a um caso real de uma indústria química, um modelo de localização-alocação, multiproduto, que considera um ambiente com economias de escala não só no transporte como também em armazenagem.

Melo, Nickel e Saldanha-Da-Gama (2009) apresentam uma ampla revisão de modelos de localização no contexto de cadeias de suprimento, em que apontaram aspectos que caracterizam os modelos encontrados na literatura, entre elas quantidade de camadas, de tipos de produtos e de períodos, se os parâmetros são determinísticos ou estocásticos, capacidade de instalações, custo de inventários, custos de produção, restrições de orçamento, além de outras ainda não tão abordadas pelos trabalhos científicos, que permitem traduzir de melhor forma a peculiaridades das operações reais, apresentando uma taxonomia e classificando os modelos recentes.

Nesse mesmo trabalho são citados alguns artigos que aplicam modelos de planejamento de redes a casos da indústria de alimentos, como é o caso de Tushaus e Wittmann (1998) que abordam um caso aplicado a uma indústria de produtos perecíveis na Suíça formulando-o como um Problema de Localização de Planta Simples; o trabalho de Wouda et al. (2002), que aplicaram um modelo de Localização de Instalações Capacitadas com a possibilidade de transferência de produtos semiacabados entre as fábricas para o redesenho da rede logística do Grupo Nutricia Dairy & Drinks, na Hungria; Levén e Segerstedt (2004), que aplicaram um modelo uniproduto, com duas camadas, instalações capacitadas e considerando custos de inventário para um caso de localização de unidades de armazenagem de frutas silvestres para a Polarica, na região da Escandinávia.

Em síntese, os modelos clássicos de localização podem considerar diversos outros aspectos e condicionantes, isoladamente ou em conjunto. A atual literatura científica vem desenvolvendo alguns modelos que apresentam combinações de características, permitindo a

modelagem cada vez mais fidedigna de problemas reais.

O modelo a ser apresentado na Seção 3 busca avançar na literatura sobre o assunto ao considerar um problema mais abrangente no contexto de problemas de localização de centros de distribuição. Mais especificamente, buscou-se incorporar à modelagem muitos aspectos que são usualmente encontrados nas operações reais, porém não considerados em um único modelo dentre aqueles descritos na literatura científica, entre os quais pode-se citar múltiplas camadas de instalações capacitadas, múltiplos produtos, transferência entre unidades da mesma camada, incluindo a possibilidade de realização de *cross-docking*, além de ganhos de escala nos custos de operação de centros de distribuição e de restrições operacionais em função de decisões comerciais, como é o caso de requisitos de nível de serviço, abertura de CDs de forma obrigatória e a possibilidade de impor o atendimento de clientes a partir de CDs específicos.

3 CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA

O escopo desta pesquisa contempla o planejamento de uma rede logística para uma indústria de alimentos situada na região andina da América Latina; mais especificamente a definição da localização de centros de distribuição e os fluxos de transporte entre as unidades produtivas da empresa.

Inicialmente, serão apresentados, nesta seção, os aspectos específicos à operação atual da indústria que motivaram o desenvolvimento do modelo matemático e a sua aplicação, detalhados nas seções subsequentes.

3.1 O negócio de alimentos

A indústria alimentícia atuante na região dos Andes comercializa produtos em diversos segmentos atendendo quase a totalidade dos municípios do país em que opera e é líder de mercado em quase todos os segmentos em que atua. Sua operação cobre grande parte da cadeia logística incluindo produção, abastecimento dos CDs, armazenagem e distribuição até os pontos de venda. Atualmente observa-se uma proximidade entre muitos CDs, o que pode indicar uma sobreposição na área de atuação dos centros de distribuição, sendo que em algumas cidades existe mais de um CD, em vir-

tude de fusões em que a empresa participou ao longo de sua história.

A empresa conta com um portfólio de produtos variado que são agrupados em cinco categorias principais de diferentes características físicas e necessidades de manuseio, entre eles bolachas, massas, chocolates, etc. Essas categorias principais se desdobram, por sua vez, em nove tipos de produtos caracterizados por sua tecnologia de produção, uma vez que todos os produtos dentro de cada tipo são produzidos nas mesmas fábricas.

Cada um dos tipos de produto apresenta características físicas bem distintas; para cada um deles existe uma capacidade máxima diferente para o veículo padrão de transferência entre unidades. Os veículos que fazem as transferências entre unidades transportam apenas um tipo de produto em cada viagem, o que implica que os custos unitários para o transporte de transferência são diferentes para cada tipo de produto.

Por outro lado, na distribuição dos produtos até os clientes a partir dos CDs, assim como na sua armazenagem, os recursos são compartilhados entre os diferentes tipos de produto.

3.2 Peculiaridades da operação na região

A região dos Andes é composta por uma diversidade de cadeias de montanhas que impõem grande dificuldade de deslocamento rodoviário. Em função da topografia, o transporte em determinados trechos se torna lento, difícil e incerto, o que implica em custos que se comportam de uma forma mais complexa em relação às variáveis de transporte, especialmente distâncias e velocidades. Esse também foi o motivo apontado para o elevado número e a alta concentração de centros de distribuição na operação da empresa.

Em algumas regiões a comercialização e distribuição dos produtos são terceirizadas, em função tanto da dificuldade de acesso quanto da insegurança, ocasionada pela ocorrência de roubos de carga. Dessa forma, os pontos de armazenagem das empresas terceiras responsáveis pela distribuição e comercialização são tratados como clientes especiais, sendo abastecidos diretamente dos centros de distribuição da empresa, porém com quantidades e *drop sizes* maiores.

Sob este ponto de vista, os supermercados também apresentam características discre-

pantes dos demais clientes atendidos pela empresa, uma vez que requerem quantidades entregues significativamente maiores. Os supermercados, porém, também se diferenciam por terem um tempo maior para a espera até a entrega. Estes fatores apresentam grande impacto no custo, pois afetam na quantidade de veículos necessários e na quantidade de produtos que eles podem levar a cada viagem durante a operação de distribuição.

A dificuldade de acesso a determinadas regiões pode acarretar o seu atendimento por meio de rotas chamadas “viageiras”. Uma vez que não é possível concluir as viagens de entrega entre as unidades da empresa e essas regiões em um dia, os veículos saem em viagens de deslocamento até as regiões, entrega e retorno à base que podem durar até quatro dias.

3.3 Características da operação atual

A indústria possui sete cidades com fábricas sendo que em nenhuma cidade são produzidos todos os nove tipos de produto. Em uma das cidades são produzidos cinco tipos de produtos e nas demais no máximo dois tipos.

A estrutura da rede atual é composta por 32 CDs com estoque (sendo que em algumas cidades existe mais de um CD) e sete CDs que não mantêm estoque, denominados pontos de *cross-docking*. A operação nos pontos de *cross-docking* consiste no recebimento de veículos de perfil grande com alta ocupação, originados de CDs com estoque e no transbordo da carga a veículos menores que fazem a distribuição aos clientes.

Cada cliente é atendido por apenas um centro de distribuição (CD), o que faz com que todos os CDs operem com todo o portfólio de produtos comercializado nas regiões que abastecem. Os clientes individuais são agrupados em função de sua localização, criando conjuntos de clientes que são atendidos por um mesmo veículo, nas chamadas “rotas de entrega”.

Em algumas regiões, porém, alguns tipos de clientes são separados em rotas de entrega específicas em função do *drop size* e tempos de espera grandes, o que é o caso dos supermercados. Isto acontece para evitar o impacto de atraso na entrega aos demais clientes.

4 MODELO MATEMÁTICO PROPOSTO

Nesta seção é apresentado o modelo ma-

temático proposto para o problema de localização de centros de distribuição que incorpora as principais restrições e condicionantes encontradas na operação descrita acima.

4.1 Definições do problema

O modelo considera as seguintes características: múltiplos produtos, múltiplas camadas hierárquicas, possibilidade de transferência entre unidades da mesma camada (entre fábricas ou entre CDs, incluindo a transferência entre CDs e pontos de *cross-docking*), capacidade e custo de produção por fábrica e produto, capacidade máxima e volume mínimo do total movimentado por centro de distribuição, diferentes tipos de CDs com custo fixo e variável, limites máximo e mínimo de quantidade de CDs abertos, possibilidade de forçar a existência de CDs em determinadas locais ou regiões e forçar alocações de atendimento entre CDs e clientes e restrição de tempo de viagem máximo entre CD e cliente.

O modelo tem a finalidade de determinar a localização dos centros de distribuição c , seu tipo i (que representa os tamanhos com diferentes estruturas de custo) e quais clientes l devem ser atendidos por ele. Além disso, também determina como cada centro de distribuição c é abastecido de cada tipo de produto p , seja diretamente de uma fábrica f ou por meio de outro centro de distribuição c .

Trata-se de um modelo discreto o que implica que o conjunto dos locais candidatos a abrigar CDs deve ser definido *a-priori*. Os pontos de demanda e de eventuais unidades existentes (fábricas e CDs atuais) também são conhecidos *a priori*.

Em função de ser um modelo matemático do tipo discreto é necessário conhecer as matrizes de custo de transporte entre fábricas, CDs e clientes; mais especificamente os custos unitários de transferência cfc_{fc}^p associados ao transporte de determinado tipo de produto p entre uma fábrica f e um candidato a CD c , os custos unitários de transferência ccc_{ce}^p associados ao transporte de determinado tipo de produto p entre os candidatos a CD c e e , e os custos unitários de distribuição ccl_{cl} entre cada candidato a CD c e cada cliente l .

O modelo considera fluxos de cada um dos tipos de produto p das fábricas para os CDs e entre CDs. A partir dos CDs, são considera-

dos fluxos que representam a distribuição até os clientes. Cada CD pode receber produtos de mais de uma unidade (fábricas e outros CDs), porém cada cliente deve ser atendido por apenas um CD.

O modelo considera um único período e todos os parâmetros que representam volumes, como a demanda de cada cliente por cada produto d_l^p e as capacidades devem ser dados em relação ao período considerado para o mesmo, usualmente um ano ou um mês típico. Para cada tipo de produto p é conhecida a capacidade de produção q_f^p de cada fábrica no período considerado.

Definem-se tipos de CDs i em função de suas capacidades $Vmax_i$ e restrições de volume mínimo necessário para abertura $Vmin_i$ (dados em quantidade total de produtos movimentados no período) e também de diferentes estruturas de custo. Os CDs pequenos apresentam custos fixos menores e custos variáveis maiores. Um dos tipos dos CDs é denominado pontos de

cross-docking, que por não terem estoque físico devem ser abastecidos necessariamente por outros CDs.

Em cada local candidato a abrigar um CD são criados tantos candidatos quantos os tipos de CDs existentes. Os locais são agrupados em regiões o e em cada região só é possível instalar um tipo de CD. Em um extremo cada região pode abrigar apenas um local candidato, o que garante que o modelo escolha no máximo um tipo de CD para cada local. Já no outro extremo uma região pode ser composta de mais de um local, fazendo com que seja permitido que apenas um CD e seu respectivo tipo (tamanho) seja escolhido na região. O modelo também permite que a abertura de um CD em uma região seja forçada.

4.2 Formulação matemática

Inicialmente a notação utilizada na modelagem é apresentada, seguida da formulação matemática do modelo de programação inteira mista desenvolvido.

4.2.1 Conjuntos

C : conjunto de candidatos a CDs

I : conjunto de tipos de CDs

L : conjunto de clientes

F : conjunto de fábricas

P : conjunto de tipos de produtos

O : conjunto de regiões que agrupam candidatos a CDs

R : conjunto de regiões onde a existência de um CD é forçada, com $R \subset O$

X : conjunto de tipos de CDs que funcionam como pontos de *cross-docking*, com $X \subset I$

4.2.2 Parâmetros

$CDmin$: quantidade mínima de CDs ativos

$CDmax$: quantidade máxima de CDs ativos

d_l^p : demanda do cliente l pelo produto p

q_f^p : capacidade de produção do produto p na fábrica f

$$af_{cl} = \begin{cases} 1 & \text{se a alocação de } l \text{ está forçada a } c \\ 0 & \text{caso contrário} \end{cases}, \text{ com } c \in C \text{ e } l \in L$$

t_{cl} : tempo de deslocamento entre o CD c até o cliente l

i_c : tipo de CD do candidato c , com $i_c \in I$ para todo $c \in C$

o_c : local do candidato a CD $c \in C$ e $o_c \in O$

$Vmin_i$: volume mínimo para abertura de CD do tipo i

$Vmax_i$: capacidade do CD do tipo i

$tmax_i$: tempo máximo de deslocamento permitido entre o CD que atende até o cliente l

M : um número inteiro suficientemente grande

$cprod_f^p$: custo unitário de produção do produto p na fábrica f
 fc_{fc}^p : custo unitário de transferência do produto p entre fábrica f e CD c
 ccc_{ce}^p : custo unitário de transferência do produto p entre CDs c e e
 ccl_{cl} : custo unitário de distribuição deste CD c até o cliente l
 cm_i : custo unitário de movimentação de produtos em CD do tipo i
 cf_i : custo fixo de operação de CD do tipo i

4.2.3 Variáveis de decisão

$$z_c = \begin{cases} 1 & \text{se o CD } c \text{ deve estar aberto} \\ 0 & \text{caso contrário} \end{cases}, \text{ com } c \in \mathbf{C}$$

$$y_{cl} = \begin{cases} 1 & \text{se o cliente } l \text{ é atendido pelo CD } c \\ 0 & \text{caso contrário} \end{cases}, \text{ com } c \in \mathbf{C} \text{ e } l \in \mathbf{L}$$

fc_{fc}^p : quantidade do produto p que é transportado entre a fábrica f e o CD c , com $f \in \mathbf{F}$, $c \in \mathbf{C}$ e $i_c \in \mathbf{I} \setminus \mathbf{X}$

cc_{ce}^p : quantidade do produto p que é transportado entre os CDs c e e , com $c \neq e$, $c \in \mathbf{C}$ e $e \in \mathbf{C}$

Função Objetivo

Minimizar:

$$\begin{aligned}
 & \left(\sum_{f \in \mathbf{F}} \sum_{c \in \mathbf{C}} \sum_{p \in \mathbf{P}} (cprod_f^p + fc_{fc}^p) \cdot fc_{fc}^p \right) + \left(\sum_{c \in \mathbf{C}} \sum_{e \in \mathbf{C}} \sum_{p \in \mathbf{P}} (cm_{i_c} + ccc_{ce}^p) \cdot cc_{ce}^p \right) \\
 & + \left(\sum_{c \in \mathbf{C}} cf_{i_c} \cdot z_c \right) + \left(\sum_{c \in \mathbf{C}} \sum_{l \in \mathbf{L}} \sum_{p \in \mathbf{P}} (cm_{i_c} + ccl_{cl}) \cdot d_l^p \cdot y_{cl} \right)
 \end{aligned} \tag{1}$$

A função objetivo (1) é composta por quatro parcelas principais. A primeira parcela é referente ao custo de produção mais o custo de transferência entre as fábricas e os CDs que ela abastece. A segunda parcela é referente ao custo de manuseio mais o custo de transferência entre CDs do volume que passa por um CD e é

enviado a outro CD. A terceira parcela é referente ao custo fixo associado aos CDs estarem abertos, independentemente da quantidade movimentada por cada um deles. A quarta e última parcela é referente ao custo de movimentação e custo de distribuição do volume que é enviado dos CDs aos clientes.

4.2.4 Restrições

$$fc_{fc}^p \leq M \cdot z_c, c \in \mathbf{C}, f \in \mathbf{F}, p \in \mathbf{P} \tag{2}$$

$$cc_{ce}^p \leq M \cdot z_e, c \in \mathbf{C}, e \in \mathbf{C}, p \in \mathbf{P} \tag{3}$$

$$\sum_{c \in \mathbf{C}} z_c = 1, o_c \in \mathbf{O} \tag{4}$$

$$\sum_{c \in \mathbf{C}} fc_{fc}^p \leq q_f^p, f \in \mathbf{F}, p \in \mathbf{P} \tag{5}$$

$$\sum_{f \in F} fc_{fc}^p + \sum_{e \in C \setminus c} cc_{ec}^p - \sum_{e \in C \setminus c} cc_{ce}^p = \sum_{l \in L} y_{cl} \cdot d_l^p, c \in C, p \in P \quad (6)$$

$$\sum_{f \in F} \sum_{p \in P} fc_{fc}^p + \sum_{e \in C} \sum_{p \in P} cc_{ec}^p \geq V \min_{i_c} \cdot z_c, c \in C \quad (7)$$

$$\sum_{f \in F} \sum_{p \in P} fc_{fc}^p + \sum_{e \in C} \sum_{p \in P} cc_{ec}^p \leq V \max_{i_c} \cdot z_c, c \in C \quad (8)$$

$$\sum_{c \in C} y_{cl} = 1, l \in L \quad (9)$$

$$y_{cl} \leq z_c, c \in C, l \in L \quad (10)$$

$$y_{cl} \geq af_{cl}, c \in C, l \in L \quad (11)$$

$$y_{cl} = 0, c \in C, l \in L, \text{ tal que } t_{cl} \geq t \max_i \quad (12)$$

$$\sum_{c \in C} z_c \geq CDMin \quad (13)$$

$$\sum_{c \in C} z_c \leq CDMax \quad (14)$$

$$z_c \in B^n, \text{ para todo } c \in C \quad (15)$$

$$y_{cl} \in B^m, \text{ para todo } c \in C \text{ e } l \in L \quad (16)$$

As restrições (2) e (3) garantem que apenas CDs abertos podem ser abastecidos por outras fábricas e outros CDs, respectivamente. As restrições (4) impõem a abertura de CDs em locais forçados. As restrições (5) garantem que a quantidade de determinado tipo de produto que sai de uma fábrica não pode superar a capacidade de produção da fábrica para este produto. As restrições (6) são restrições de equilíbrio de fluxos no CD e impõem, para cada CD e produto, que o balanço do que entra no CD (proveniente de fábricas ou outros CDs) e do que é enviado para outros CDs seja igual à demanda dos clientes atendidos pelo CD. As restrições (7) fazem com que se um CD for selecionado todo o volume que ele recebe de fábricas ou de outros CDs deve ser maior ou igual ao volume mínimo necessário para sua abertura; analogamente as restrições (8) asseguram que o volume total que um CD selecionado recebe de fábricas ou de outros CDs não ultrapasse a sua

capacidade; se o mesmo não for selecionado, sua capacidade é nula. As restrições (9) garantem que todo cliente pode ser alocado a apenas um CD enquanto que as restrições (10) fazem com que cada cliente só possa ser alocado a um CD aberto. As restrições (11) permitem que sejam feitas alocações forçadas entre determinados clientes e CDs. Já as restrições (12) permitem apenas alocações que atendam o nível de serviço estipulado para cada cliente. Por fim, as restrições (13) e (14) garantem que a quantidade de CDs abertos deve ser maior ou igual ao valor mínimo definido e menor ou igual ao valor máximo definido e as restrições (15) e (16) definem os domínios de variáveis binárias.

O modelo foi implementado em linguagem de programação *Python* utilizando o software de otimização *Gurobi* (Gurobi Optimization, 2014).

5 APLICAÇÃO DO MODELO

O modelo foi rodado para o ano horizonte de 2015, sendo que a previsão de demanda e a capacidade de produção foram informadas pela própria empresa. O volume total de vendas previsto para o período foi de aproximadamente 1,5 milhões de m³. Os valores monetários e de quantidade foram alterados para garantir o sigilo da informação ainda que as proporções entre estes tenham sido mantidas, permitindo a comparação e análise dos resultados.

Ao todo foram considerados 890 clientes que representam todas as cidades atendidas pela empresa na região, 40 locais candidatos a CDs, com 4 tipos de CDs, sendo que um dos tipos de CD não pode ser abastecido diretamente pelas fábricas (pontos de *cross-docking*).

Para cada tipo de produto foram levantados fatores de equivalência com o fim de compatibilizar suas diferenças físicas a fim de tratar

todos os produtos com a mesma unidade de volume.

Com base nos dados de movimentação da empresa os 39 CDs (dos quais 7 pontos de *cross-docking*) foram classificados em quatro tipos, a saber: pequeno, médio, grande e pontos de *cross-docking*. Para cada um dos tipos os custos operacionais do período base foram detalhados para que a função de custos fosse estimada.

Esta análise permitiu que a curva de ganho de escala das operações nos CDs fosse representada por meio de funções lineares referentes a cada tipo de CD que se aproximam da curva de ganho de escala, representadas no exemplo na Figura 1. A quantidade de CDs por tipo, quantidade média de movimentação anual (m³), custos fixos anuais e custos unitário de movimentação são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 - Custo fixo e variável por tipo de CD

Tipo de CD	Quantidade de CDs	Movimentação anual média (mil m ³)	Custo fixo anual (\$ ¹ por CD)	Custo por unidade movimentada (\$/m ³)
Pequeno	12	11	8.421	7,1
Médio	16	44	36.842	5,3
Grande	4	142	100.000	4,4
Pontos de <i>cross-docking</i>	7	14	1.546	1,2

¹ Valor monetário multiplicado por um fator para garantia de sigilo da informação

O processo de decisão foi desenvolvido por meio de quatro rodadas do modelo. Inicialmente foi rodado o “*baseline* otimizado” com o volume referente ao ano corrente (2011) de modo a determinar os novos fluxos otimizados, sem alterar a configuração existente da rede em termos de CDs, sem abertura ou fechamento de CDs, nem mudança de tamanho. Seu resultado indicou que os fluxos atuais da empresa estavam otimizados, ou seja, a redução de custo operacional em relação aos custos reais foi praticamente nula.

Em seguida, para as demandas e capacidades previstas para 2015 os três seguintes cenários foram rodados:

Baseline otimizado (BL 2015);
Green-Field (GF 2015);
Alternativa 1(A1 2015).

O *baseline* otimizado para o ano de 2015, a exemplo do *baseline* otimizado para o ano de 2011, foi gerado com apenas as unidades exis-

tentes atualmente como candidatas. Cada CD existente foi classificado segundo seu tipo/tamanho. O custo referente a este cenário foi considerado como base para estimativas de ganhos potenciais do estudo, sendo que as análises subsequentes de comparação entre os cenários são todas em relação a este cenário.

Para a rodada do segundo cenário toda a estrutura de redes de centros de distribuição existente foi desconsiderada e uma nova rodada foi feita, sem restrições de quantidade máxima e mínima de centros de distribuição, e sem nenhum CD ou alocação forçada. Este cenário foi chamado de *Green-Field* e foi considerado como o melhor resultado possível para a estrutura logística.

Finalmente houve uma rodada final considerando parâmetros definidos pela diretoria da empresa com o intuito de quantificar os impactos (em termos de custo operacional e nível de serviço) de decisões estratégicas, como forçar a seleção de alguns CDs existentes, garantir o nível de serviço a determinados clientes e

forçar a alocação de alguns clientes a determinados CDs. Este resultado foi denominado cenário Alternativa 1.

6 RESULTADOS

Os resultados de custos apresentados na Tabela 2 foram ajustados de forma que o custo total da solução para o cenário *baseline* otimi-

zado corresponda ao valor 100, de forma a não só preservar o sigilo de informações da empresa como também facilitar a comparação de ganhos das duas alternativas avaliadas. Os resultados indicam que o valor percentual de redução de custo operacional total obtido pelas soluções propostas foi de 8,3% para o *Green-Field* e 6,9% para a Alternativa 1.

Tabela 2 - Resumo dos custos para os cenários rodados

Custo	BL 2015	GF 2015	A1 2015
Transporte primário (\$)	24,9	24,6	24,9
Transporte secundário (\$)	50,7	47,2	49,5
Custo nos CDs (\$)	24,3	19,9	18,8
Custo total (\$)	100,0	91,7	93,1
Redução percentual (%)	0,0%	8,3%	6,9%

Os custos foram separados em três categorias, sendo elas: transporte primário, que é referente aos custos de transporte entre unidades, sejam elas fábricas ou CDs; transporte secundário, referente aos custos com a operação de distribuição aos clientes, partindo dos CDs; e custo nos CDs, composto das parcelas fixas e variáveis dos custos para cada tipo de

CD.

A Figura 2 mostra um resumo de cada cenário, com os valores de custos (detalhado nas três categorias definidas) e quantidade de CDs selecionados. É possível verificar que a redução dos custos se deu primordialmente nos custos nos CDs e custos de transporte secundário.

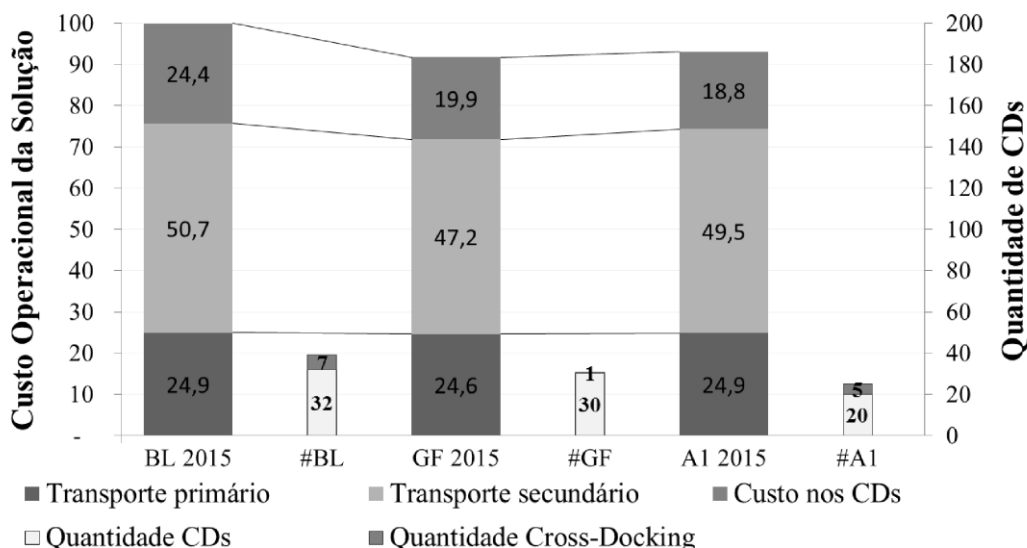


Figura 2 - Gráfico com custos e quantidade de CDs para cada cenário

O custo nos CDs foi a categoria que apresentou maior percentual de redução, tanto para o cenário *Green-Field*, com 18,1% de redução quanto para o cenário Alternativa 1, com 22,6%. Estas reduções podem ser verificadas em função da

redução da quantidade de CDs, bem como na melhor adequação dos tamanhos dos CDs para o volume de atendimento de cada região. A quantidade e tipo de CD proposto por cada cenário é apresentado na Tabela 3.

Tabela 3 - Quantidade de tipos de CDs para cada cenário

Tipo de CD	BL 2015	GF 2015	A1 2015
Pequeno	12	4	2
Médio	16	23	15
Grande	4	3	3
Pontos de <i>cross-docking</i>	7	1	5
Total	39	31	25

A representação das diferentes estruturas de custo fixo e variável em função do tamanho de cada tipo de unidade se mostrou adequada uma vez que a aplicação do modelo propôs diferentes tipos de CDs. Isto permitiu que o ganho de escala fosse representado no modelo, que propõe endogenamente o tamanho de CD de forma que o valor da função de custo de seu tipo (cujo exemplo foi apresentado na Figura 1) seja o menor, dado o volume movimentado.

No cenário *Green-Field*, dos 31 CDs propostos, 12 já existem e devem manter o mesmo tamanho, 15 já existem e devem adequar o seu tamanho e 4 não existem atualmente e devem ser instalados. Já no cenário Alternati-

va 1, dos 25 CDs propostos, 10 já existem e devem manter o mesmo tamanho, 13 já existem e devem adequar o seu tamanho e 2 não existem atualmente e devem ser instalados.

Também houve uma significativa redução no custo de distribuição, explicado basicamente pela reconfiguração dos locais de CDs, causando sua aproximação aos clientes. A Figura 3 retrata esta aproximação, uma vez que mostra o percentual de volume entregue em rotas de 1, 2, 3 ou 4 dias. O percentual de volume entregue em rotas de 1 dia passou de 69,4% no cenário *baseline* Otimizado, para 72,3% no cenário *Green-Field*, e para 70,9% para o cenário Alternativa 1.

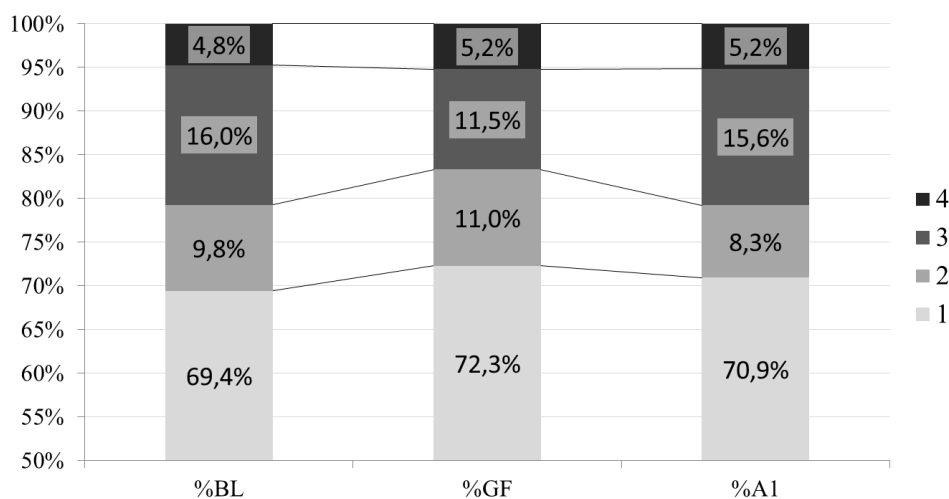


Figura 3 - Percentual de volume por nível de serviço para cada cenário

No caso do cenário *Green-Field*, em que houve uma redução no custo de transporte secundário de 6,9%, por mais que a quantidade total de unidades tenha diminuído a quantidade de cidades onde são previstos CDs, que totaliza 31 (em função da existência de mais de um CD em algumas cidades), se manteve a mesma. Com a maior proximidade dos CDs com os clientes, possibilitada pela realocação e instalação de novos CDs em áreas com alta demanda, foi possível a redução dos custos secundários.

Já no cenário Alternativa 1 a redução nos custos secundários não foi tão acentuada, com valor de 2,4%. Este impacto menor se deveu por causa da redução do número de cidades onde existem CDs, baixando de 31 no cenário atual para 25 no proposto. Com isso, por mais que tenha havido uma distribuição geográfica mais equilibrada dos CDs selecionados, não foi possível aumentar a proximidade dos CDs com os clientes de forma mais significativa.

Além de permitir reduções de custo no transporte secundário a maior proximidade entre os CDs e os clientes também proporcionou uma melhoria no nível de serviço aos clientes, uma vez que reduziu de uma maneira geral o tempo de entrega, com aumento do volume entregue no mesmo dia da saída do veículo de distribuição dos CDs. Este indicador foi utilizado por retratar alterações no *lead time* de entrega médio entre a realização do pedido de compra e o recebimento do produto que faz parte de um dos indicadores na gestão de nível de serviço da empresa.

De maneira similar a Figura 4 ilustra os impactos em nível de serviço através da quantidade de cidades que são atendidas para cada nível de serviço, representado pelas rotas de 1, 2, 3 e 4 dias. Por meio da análise conjunta das Figuras 3 e 4 observa-se que o volume das cidades atendidas em cada nível de serviço difere significativamente para cada cenário uma vez

que os gráficos não se comportaram da mesma forma. Como exemplo, pode-se notar que no cenário Alternativa 1 enquanto o volume entre-

gue por rotas de 1 dia aumenta em relação ao *Baseline* Otimizado a quantidade de cidades atendidas por este tipo de rota decresce.

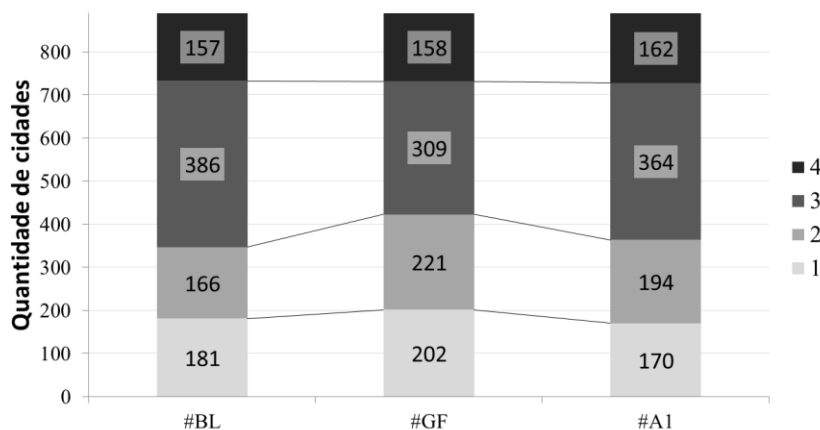


Figura 4 - Quantidade de cidades por nível de serviço para cada cenário

A Tabela 4 apresenta o volume médio anual de consumo das cidades atendidas em cada nível de serviço. Os dados confirmam que o tamanho médio das cidades, em termos de volume vendido, atendidas em cada nível de serviço tem diferenças significativas para cada cenário.

Para o cenário *Green-Field* o volume médio por cidade foi reduzido tanto para as rotas de 1 dia e 2 dias. Isso é reflexo da melhor distribuição dos CDs que conseguem atender cidades com menor volume (normalmente mais

afastadas dos grandes centros urbanos) em rotas menores e confirma que houve a aproximação dos CDs à demanda. Já no cenário Alternativa 1 o volume médio das cidade atendidas em rotas de 1 dia teve um aumento significativo enquanto o volume médio das cidades atendidas por rotas de 2 dias apresentou um valor menor, reflexo da redução do número de CDs. Isso aponta que os CDs foram localizados sobretudo nas proximidades de grandes centros de demanda.

Tabela 4 - Volume médio anual por cidades por nível de serviço (m³/ano/cidade)

Nível de Serviço	BL 2015	GF 2015	A1 2015
Rota de 1 dia	5.754	5.367	6.258
Rota de 2 dias	887	748	641
Rota de 3 dias	622	557	643
Rota de 4 dias	454	495	479

Os resultados do estudo indicam uma quebra de um paradigma de que para se obter reduções de custo deve-se sacrificar o nível de serviço. Por mais que o *trade-off* entre custo e nível de serviço seja real em diversas situações o estudo mostrou que isso não ocorre para todos os casos. Em função da estrutura de custos da empresa, que é altamente impactada pelos custos de distribuição, o modelo propôs soluções que reduzem o custo operacional e mantêm ou melhoram o nível de serviço prestado aos clientes.

Era esperado pela empresa como resultado do estudo que houvesse uma redução mais acentuada no número de CDs muito em parte pela existência de mais de um CD em diversas cidades. A expectativa da empresa era de possi-

velmente centralizar o estoque, com a definição de apenas alguns CD localizados em centros urbanos mais populosos. Também era esperado e aceito pela diretoria que o nível de serviço pudesse baixar um pouco para permitir a redução de custos.

O cenário livre de restrições comerciais (*Green-Field*) resultou um total de 31 CDs, mesma quantidade de cidades onde existem CDs atualmente. Já o cenário Alternativa 1, mesmo com a imposição de restrições comerciais, propôs 25 CDs, número maior que a expectativa inicial da empresa. Os dois cenários apresentaram reduções de custo operacionais totais (8,3% com o *Green-Field* e 6,9% com a Alternativa 1) além de melhorarem o nível de serviço (*Green-Field*) ou manterem o nível de

serviço atual (Alternativa 1).

Além disso, as novas configurações apresentam benefícios intangíveis uma vez que a redução do número de centros de distribuição acarreta na diminuição da complexidade na gestão inerente a uma estrutura logística com muitas unidades logísticas.

O modelo se mostrou eficaz na obtenção de novas configurações logísticas que permitissem a redução de custos operacionais em relação à configuração atual. Com sua funcionalidade de forçar a existência de unidades e definir faixa de quantidade de CDs abertos foi possível também desenvolver um cenário alternativo que considerava restrições comerciais.

A comparação destes cenários permitiu entender qual é o impacto tanto em custo (retratado pela função objetivo) quanto em nível de serviço (medido em tempo de atendimento) da aplicação das novas restrições no modelo de comparação livre das referidas restrições.

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho apresentou um modelo matemático que considera importantes aspectos práticos nos problemas de planejamento de rede logística, possibilitando a definição de locais de centros de distribuição e dos fluxos de transporte da operação.

Foi possível identificar que existe potencial de redução do custo operacional logístico com a utilização do modelo proposto, sendo que os resultados obtidos para o caso de aplicação apontaram uma redução de até 8,3%, que são bastante significativos considerando-se as baixas margens de lucro do setor e os altos custos logísticos em relação aos preços finais.

O modelo tem como principais características ser multiproduto, com múltiplas camadas, hierárquico e permitindo transferências entre unidades de mesma camada, com centros de distribuição capacitados e com custos fixos e variáveis.

A partir de uma análise na literatura científica foi possível identificar uma lacuna nos modelos de localização no que diz respeito ao ganho de escala nos custos das operações nos centros de distribuição. Uma vez que em geral muitos países da América Latina apresentam um padrão de municípios heterogêneo, com algumas regiões de grande concentração populacional e outras com vasto território com a

população menor e mais dispersa geograficamente, a necessidade de CDs de diferentes tamanhos e capacidades e sua modelagem considerando ganhos de escala é clara.

Por meio da definição de tipos de CDs foi possível considerar este aspecto no modelo, retratado por meio de custos fixos e variáveis diferentes para cada tipo de CD definido. Os resultados mostram que o modelo tornou possível a adequação da estrutura logística de empresas de alimentos que atuam na entrega a pontos de vendas à realidade demográfica destas regiões de forma a permitir que os custos operacionais fossem minimizados, garantindo o nível de serviço estipulado.

Além dos aspectos citados o modelo proposto considera restrições comerciais e de nível de serviço existentes nos processos reais de grandes corporações. Ao resolvê-lo é possível estimar os custos operacionais inerentes a tais tipos de decisão.

Um software comercial de otimização foi utilizado para a resolução de instâncias reais referentes ao caso de uma indústria de alimentos localizada na América Latina que atua em grande parte da cadeia de suprimentos. Os testes se mostraram satisfatórios em relação ao tempo de processamento para todos os cenários rodados uma vez que as instâncias de testes foram solucionadas em menos de 15 minutos.

Não foi abordada neste trabalho a decisão de quais anos-horizonte utilizar para as rodadas dos problemas, porém vale ressaltar que este é um aspecto importante e que pode apresentar impactos significativos em custo e nível de serviço a longo prazo.

Se o crescimento projetado da demanda não obedecer a um padrão homogêneo ou relativamente uniforme ao longo do tempo, é possível que a solução ótima encontrada para o curto prazo seja distinta daquela resultante para os cenários de longo prazo. Isso poderia fazer com que as decisões baseadas em demandas de curto prazo exigissem mudanças drásticas num horizonte futuro, incorrendo maiores investimentos para a operação.

Uma vez que decisões de localização de CDs se enquadram em decisões estratégicas que de maneira geral afetam grandemente aspectos de longo prazo, impactam em grande quantidade de alocação de recursos e não são tomadas frequentemente, sugere-se que este tipo de estudo seja feito para anos horizontes

maiores.

Esta questão traz à tona um aspecto prático que tem potencial para ser aprofundado em extensões futuras da presente pesquisa, que consiste em adicionar a dimensão temporal nas decisões de localização de instalações, possibilitando determinar não só o número e a localização dessas unidades, mas também quando devem ser abertas, e possivelmente ampliadas.

Adicionalmente, outros aspectos práticos, ainda não devidamente tratados na literatura científica, podem ser considerados em futuras extensões deste trabalho, com a finalidade de torná-las ainda mais aderentes à realidade, entre as quais se destacam:

Localização conjunta de unidades produtivas, o que implica a consideração não só de custos fixos das fábricas, como também custos variáveis de produção, de estoque e de transporte de matéria prima entre fornecedores e as fábricas;

Consideração de custos de capital imobilizado em virtude do estoque de produto acabado que pode variar em função de cada configuração logística proposta e impactar em qual é a solução ótima;

Restrições de orçamento para investimento em novas unidades, uma vez que geralmente há limitação de recursos financeiros para este tipo de investimento;

Custos de impostos e incentivos fiscais, que são muito distintos no caso brasileiro, em relação à realidade de outros países, e que em muitos casos podem ser representativos e ter impacto sobre as decisões de localização ótima;

Definição dos melhores tipos/tamanhos de veículos para os diferentes fluxos, que pode impactar outro tipo de ganho de escala, uma vez que os custos de transporte unitários costumam ser menores para veículos maiores;

Consideração de incertezas no modelo, de forma a permitir a determinação de soluções robustas, que apresentam bom desempenho em custo e nível de serviço mesmo com a variação de aspectos que impactam a operação, como demanda, custo e capacidade.

Os aspectos citados, bem como suas variações e combinações, entre outros, trazem mais

complexidade à modelagem matemática e apresentam desafios para o desenvolvimento futuro de modelos realistas que consideram aspectos práticos do planejamento logístico.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio à pesquisa pelo Serviço Nacional de Aprendizagem do Transporte, SENAT, e pelo Instituto de Transporte e Logística, ITL.

REFERÊNCIAS

- Aghezzaf, E. (2005) Capacity planning and warehouse location in supply chains with uncertain demands. *Journal of the Operational Research Society*, v. 56, n. 4, p. 453–462. DOI:10.1057/palgrave.jors.2601834.
- Altıparmak, F., Gen, M., Lin, L., Paksoy, T., Seo, Y., Takahashi, K., e Park, J. (2006) A genetic algorithm approach for multi-objective optimization of supply chain networks. *Computers & Industrial Engineering*, v. 51, n. 1, p. 196–215. DOI:10.1016/j.cie.2006.07.011.
- Ballou, R. (2001) Unresolved issues in supply chain network design. *Information Systems Frontiers*, v. 3, n. 4, p. 417–426. DOI:10.1023/A:1012872704057.
- Baumgartner, K., Fuetterer, A., e Thonemann, U. W. (2012) Supply chain design considering economies of scale and transport frequencies. *European Journal of Operational Research*, v. 218, n. 3, p. 789–800. DOI:10.1016/j.ejor.2011.11.032.
- Brandeau, M., e Chiu, S. (1989) An Overview of Representative Problems in Location Research. *Management Science*, v. 35, p. 645–674. DOI:10.1287/mnsc.35.6.645.
- Carlsson, D., e Rönnqvist, M. (2005) Supply chain management in forestry—case studies at Södra Cell AB. *European Journal of Operational Research*, v. 163, n. 3, p. 589–616. DOI:10.1016/j.ejor.2004.02.001.
- Cordeau, J. F., Pasin, F., e Solomon, M. M. (2006) An integrated model for logistics network design. *Annals of Operations Research*, v. 144, n. 1, p. 59–82. DOI: 10.1007/s10479-006-0001-3.
- Cunha, C. B. (2006) Contribuição à modelagem de problemas em logística e transportes. Tese (Livre Docência). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo.
- Current, J., Daskin, M., e Schilling, D. (2002) Discrete Network Location Models. Z. Drezner & H. Hamacher (Eds), *Facility Location: Applications and Methods* (pp. 81–118). Springer-Verlag, Berlin.
- Daskin, M. (1995) *Network and Discrete Location: Models, Algorithms, and Applications*. (p. 520). Wiley-Interscience.
- Drezner, Z. (2004) *Facility Location: Applications and Theory*. (2nd ed., p. 458). Springer.

- Fleischmann, B. (1993) Designing distribution systems with transport economies of scale. *European Journal of Operational Research*, v. 70, n. 1, p. 31–42. DOI: 10.1016/0377-2217(93)90230-K.
- Gurobi Optimization, I. (2014) Gurobi Optimizer Reference Manual. Obtido de <http://www.gurobi.com>
- Hinojosa, Y., Kalcsics, J., Nickel, S., Puerto, J., e Velten, S. (2008) Dynamic supply chain design with inventory. *Computers & Operations Research*, v. 35, n. 2, p. 373–391. DOI:10.1016/j.cor.2006.03.017.
- Hinojosa, Y., Puerto, J., e Fernández, F. R. (2000) A multiperiod two-echelon multicommodity capacitated plant location problem. *European Journal of Operational Research*, v. 123, n. 2, p. 271–291. DOI:10.1016/S0377-2217(99)00256-8.
- Jayaraman, V., e Pirkul, H. (2001) Planning and coordination of production and distribution facilities for multiple commodities. *European Journal of Operational Research*, v. 133, n. 2, p. 394–408. DOI:10.1016/S0377-2217(00)00033-3.
- Keskin, B. B., e Üster, H. (2007) Meta-heuristic approaches with memory and evolution for a multi-product production/distribution system design problem. *European Journal of Operational Research*, v. 182, n. 2, p. 663–682. DOI:10.1016/j.ejor.2006.07.034.
- Klose, A., e Drexl, A. (2005) Facility location models for distribution system design. *European Journal of Operational Research*, v. 162, n. 1, p. 4–29. DOI: 10.1016/j.ejor.2003.10.031.
- Lee, D. H., e Dong, M. (2008) A heuristic approach to logistics network design for end-of-lease computer products recovery. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, v. 44, n. 3, p. 455–474. DOI:10.1016/j.tre.2006.11.003.
- Levén, E., e Segerstedt, A. (2004) Polarica's wild berries: an example of a required storage capacity calculation and where to locate this inventory. *Supply Chain Management: An International Journal*, v. 9, n. 3, p. 213–218. DOI:10.1108/13598540410544908.
- Mazzola, J. B., e Neebe, A. W. (1999) Lagrangian-relaxation-based solution procedures for a multiproduct capacitated facility location problem with choice of facility type. *European Journal of Operational Research*, v. 115, n. 2, p. 285–299. DOI:10.1016/S0377-2217(98)00303-8.
- Melkote, S., e Daskin, M. S. (2001) Capacitated facility location/network design problems. *European Journal of Operational Research*, v. 129, n. 3, p. 481–495. DOI: 10.1016/S0377-2217(99)00464-6.
- Melo, M., Nickel, S., e Saldanha-Da-Gama, F. (2009) Facility location and supply chain management—A review. *European Journal of Operational Research*, v. 196, n. 2, p. 401–412. DOI:10.1016/j.ejor.2008.05.007.
- Melo, M. T., Nickel, S., e Saldanha da Gama, F. (2006) Dynamic multi-commodity capacitated facility location: a mathematical modeling framework for strategic supply chain planning. *Computers & Operations Research*, v. 33, n. 1, p. 181–208. DOI:10.1016/j.cor.2004.07.005.
- Mirchandani, P., e Francis, R. (1990) *Discrete location theory*. Wiley, New York.
- Novaes, A. (1989) *Sistemas logísticos: transporte, armazenagem e distribuição física de produtos*. (p. 372). Edgard Blücher, São Paulo.
- Pati, R., Vrat, P., e Kumar, P. (2008) A goal programming model for paper recycling system. *Omega*, v. 36, n. 3, p. 405–417. DOI:10.1016/j.omega.2006.04.014.
- ReVelle, C., e Eiselt, H. (2005) Location analysis: A synthesis and survey. *European Journal of Operational Research*, v. 165, n. 1, p. 1–19. DOI: 10.1016/j.ejor.2003.11.032.
- ReVelle, C., Eiselt, H., e Daskin, M. (2008) A bibliography for some fundamental problem categories in discrete location science. *European Journal of Operational Research*, v. 184, n. 3, p. 817–848. DOI:10.1016/j.ejor.2006.12.044.
- Şahin, G., e Süral, H. (2007) A review of hierarchical facility location models. *Computers & Operations Research*, v. 34, p. 2310–2331. DOI: 10.1016/j.cor.2005.09.005.
- Sridharan, R. (1995) The capacitated plant location problem. *European Journal of Operational Research*, v. 87, n. 2, p. 203–213. DOI:10.1016/0377-2217(95)00042-O.
- Syam, S. S. (2002) A model and methodologies for the location problem with logistical components. *Computers & Operations Research*, v. 29, n. 9, p. 1173–1193. DOI:10.1016/S0305-0548(01)00023-5.
- Troncoso, J. J., e Garrido, R. A. (2005) Forestry production and logistics planning: an analysis using mixed-integer programming. *Forest Policy and Economics*, v. 7, n. 4, p. 625–633. DOI:10.1016/j.forpol.2003.12.002.
- Tüshaus, U., e Wittmann, S. (1998) Strategic logistic planning by means of simple plant location: A case study. *Advances in distribution logistics* (pp. 241–263). Springer, Berlin. DOI:10.1007/978-3-642-46865-0_10.
- Vila, D., Martel, A., e Beauregard, R. (2006) Designing logistics networks in divergent process industries: A methodology and its application to the lumber industry. *International Journal of Production Economics*, v. 102, n. 2, p. 358–378. DOI:10.1016/j.ijpe.2005.03.011.
- Wang, Q., Batta, R., Bhadury, J., e Rump, C. (2003) Budget constrained location problem with opening and closing of facilities. *Computers & Operations Research*, v. 30, n. 13, p. 2047–2069. DOI:10.1016/S0305-0548(02)00123-5.
- Wouda, F., Beek, P. van, Vorst, J. van der, e Tacke, H. (2002) An application of mixed-integer linear programming models on the redesign of the supply network of Nutricia Dairy & Drinks Group in Hungary. *Or Spectrum*, v. 24, n. 4, p. 449–465. DOI:10.1007/s002910200112.
- Xu, S. (2013) Transport economies of scale and firm location. *Mathematical Social Sciences*, v. 66, n. 3, p. 337–345. DOI:10.1016/j.mathsocsci.2013.07.004.
- Yang, Z., Chu, F., e Chen, H. (2012) A cut-and-solve based algorithm for the single-source capacitated facility location problem. *European Journal of Operational Research*, v. 221, n. 3, p. 521–532. DOI:10.1016/j.ejor.2012.03.047.