



Otimização da rede de uma cadeia de suprimentos com a utilização de uma heurística baseada em Busca Tabu

Supply chain network optimization using a Tabu Search based heuristic

Gabriel Machado Braido^{1,2*}
Denis Borenstein^{3,4}
Gilmar D'Agostini Oliveira Casalinho⁵

Resumo: Este artigo discute a implementação e avaliação de uma heurística baseada em Busca Tabu para otimizar uma rede de cadeia de suprimentos. Para tanto, o modelo *single-source* proposto por Farias & Borenstein (2012) foi implementado. O problema foi resolvido por uma adaptação do método de Lee & Kwon (2010), substituindo centros de distribuição (CDs) e arcos a fim de encontrar o menor custo para uma rede de cadeia de suprimentos. Foram resolvidas as 22 instâncias propostas por Farias & Borenstein (2012) e os resultados indicam que, para esses cenários, o método aplicado teve um bom desempenho computacional, obtendo resultados com uma redução de 81,03% no tempo médio de processamento. Contudo, houve um aumento de 4,98% no custo médio das soluções obtido pelo método heurístico quando comparado com os resultados ótimos. Por fim, o problema foi resolvido para outras quatro instâncias com características reais, comprovando a eficiência da heurística para problemas de grande escala, visto que todas as soluções foram obtidas em menos de 2 minutos de processamento.

Palavras-chave: Otimização de rede de cadeia de suprimentos; Gestão da cadeia de suprimentos; Heurística; Busca Tabu.

Abstract: *This paper discusses the implementation and evaluation of a heuristic based on Tabu Search to optimize a supply chain network. To this end, a single-source model proposed by Farias & Borenstein (2012) was implemented. The problem was solved by adapting the Lee & Kwon method (2010), exchanging distribution centers (DCs) and arcs to find the lowest cost for a supply chain network. Twenty-two instances proposed by Farias & Borenstein (2012) were solved and the results indicate that, for the scenarios, the method applied presented good computational performance, obtaining results with 81.03% reduction of the average processing time. However, there was an increase of 4.98% in the average cost of the solutions obtained through the heuristic method when compared with the optimal results. Finally, the problem was solved for four other instances with real features, proving the efficiency of this heuristic for large-scale problems, considering that all solutions were obtained in less than 2 minutes of processing.*

Keywords: *Supply chain network optimization; Supply chain management; Heuristic; Tabu Search.*

1 Introdução

Nos últimos anos, as cadeias de fornecimento intraempresas têm crescido de maneira significativa, abrangendo produção e locais de distribuição em todo o mundo e, ao mesmo tempo, o aumento da concorrência global tem gerado uma forte demanda por novas ferramentas de apoio à decisão nos níveis estratégico, tático e operacional (Almeder et al., 2008).

O grande desafio da gestão da cadeia de suprimentos está na necessidade de movimentação de produtos e materiais de maneira rápida e confiável entre empresa e clientes de maneira competitiva (Viana et al., 2014). Porém, essa movimentação não é linear, visto que, diversas vezes, faz um caminho por diferentes países até chegar ao destino final. Assim, a gestão da cadeia

¹ Programa de Pós-graduação em Administração – PPGAdm, Universidade do Vale do Rio dos Sinos – UNISINOS, Avenida Unisinos, 950, Cristo Rei, CEP 93022-750, São Leopoldo, RS, Brasil, e-mail: gabrielb@univates.br

² Centro Universitário Univates – UNIVATES, Rua Avelino Tallini, 171, Bairro Universitário, CEP 95900-000, Lajeado, RS, Brasil

³ Facultad de Ciencias Económicas y Administrativas, Universidad de Cuenca, Av. 12 de Abril, s/n, Agustín Cueva, Cuenca, Ecuador, e-mail: denisb@ea.ufrgs.br

⁴ Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS, Rua Washington Luis, 855, Centro, CEP 90010-460, Porto Alegre, RS, Brasil

⁵ Programa de Pós-graduação em Administração – PPGA, Escola de Administração – EA, Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS, Rua Washington Luis, 855, Centro, CEP 90010-460, Porto Alegre, RS, Brasil, e-mail: gilmarcasalinho@gmail.com

Recebido em Fev. 24, 2014 - Aceito em Nov. 19, 2015

Suporte financeiro: CNPq e Senescyt.

de suprimentos deve administrar de maneira integrada diversas funções, como transportes, distribuição e tecnologia de informação (TI), visando à otimização da produção e à entrega de produtos aos membros da cadeia de abastecimento (Rezende et al., 2002). Altıparmak et al. (2006) consideram que as empresas devem manter altos níveis de serviço ao cliente e, ao mesmo tempo, são forçadas a reduzir os seus custos e a permanecer com as mesmas margens de lucro.

Beamon (1998) destaca que, durante anos, vários pesquisadores e profissionais têm investigado individualmente os diversos processos da cadeia de suprimentos; no entanto, recentemente, tem crescido o interesse no desempenho, desenho e análise da cadeia como um todo (Visentini & Borenstein, 2014). Este crescente interesse explica-se pela necessidade de visão integrada da gestão da cadeia de suprimentos. Além disso, técnicas de pesquisa e análises das cadeias logísticas estão mais maduras, permitindo uma análise mais criteriosa e, inclusive, levando em consideração um número maior de variáveis relacionadas a questões primordiais das cadeias de suprimento, tais como custo, rapidez e preço (Poli & Pureza, 2012). Como consequência, técnicas de Pesquisa Operacional (PO) vêm sendo cada vez mais utilizadas para a gestão da cadeia de suprimentos (Melo et al., 2009).

Em uma cadeia de suprimentos, o fluxo de mercadorias entre fornecedores e clientes passa por diversos estágios, que são constituídos por diferentes instalações (Sabri & Beamon, 2000), podendo ser centros de serviço, fábricas, armazéns ou depósitos. Em geral, um projeto de rede da cadeia de suprimentos começa com a identificação de locais potencialmente interessantes e que sustentem as capacidades necessárias para as novas instalações. O principal intuito do problema é determinar a localização de facilidades de maneira que a soma dos custos fixos de abertura de novas instalações e dos custos variáveis de designar clientes com determinadas demandas às instalações já operantes seja minimizada (Tragantalerngsak et al., 1997).

Ombuki et al. (2006) sugerem que nos casos em que os modelos se tornam muito complexos estes sejam solucionados por meio de técnicas não necessariamente exatas, podendo-se, por exemplo, utilizar meta-heurísticas a fim de buscar soluções aproximadas em tempo polinomial, em vez de soluções exatas de alto custo, adequando-se à resolução de problemas complexos.

Dentre as meta-heurísticas, destaca-se a Busca Tabu (BT), uma técnica que utiliza a exploração estratégica e memória flexível como guia na busca em um espaço de soluções (Arenales et al., 2007), determinando-se a direção da busca baseada nas propriedades da solução corrente e no seu histórico. O método possui uma memória de soluções visitadas, impedindo que soluções inferiores às já encontradas sejam revisitadas.

Considerando a necessidade de redução dos custos logísticos e a complexidade de problemas com instâncias reais, o objetivo deste artigo consistiu em implementar e avaliar uma heurística baseada em Busca Tabu para a otimização do projeto da cadeia de suprimentos.

A fim de descrever o problema em maiores detalhes, apresentar o método utilizado para a sua solução e os resultados obtidos, este artigo está estruturado em cinco seções. Neste introdutório considerou-se o contexto, justificativa e objetivo do estudo. A segunda seção consiste na revisão da literatura, abordando o projeto de cadeia de suprimentos e métodos heurísticos. A seguir, abordam-se os procedimentos metodológicos adotados na pesquisa, detalhando o problema resolvido e a heurística utilizada para sua solução. Na quarta seção, são apresentados e discutidos os resultados da pesquisa. Finalizando, a seção 5 apresenta as considerações finais da pesquisa.

2 Referencial teórico

Neste capítulo, será apresentada a fundamentação teórica utilizada neste artigo, compreendendo o projeto de rede de cadeia de suprimentos e métodos heurísticos.

2.1 Projeto de redes de cadeias de suprimento

O Projeto de uma Rede da Cadeia de Suprimentos é um dos problemas mais abrangentes relacionados à gestão da cadeia de suprimentos, envolvendo decisões em níveis operacionais, táticos e estratégicos. Este problema envolve determinar o número, a localização e a capacidade das facilidades, bem como estabelecer os canais de distribuição e os fluxos de materiais e produtos que serão produzidos e enviados aos fornecedores em cada nível de consumo da cadeia.

Em geral, para solucionar o problema de projeto de rede, a rede é decomposta em sub-redes. Modelos matemáticos e metodologias de solução para cada sub-rede são então desenvolvidos, e estas são posteriormente integradas (Elhedhli & Gzara, 2008). A primeira sub-rede é a rede de todos os fornecedores de matérias-primas, peças e serviços para as fábricas. A segunda sub-rede inclui as fábricas em que os produtos finais são fabricados. Os produtos finais são enviados a partir das fábricas para os varejistas por canais de distribuição, utilizando facilidades de distribuição, como armazéns e centros de distribuição.

O projeto, portanto, envolve a apuração dos custos totais de uma instalação, incluindo os custos fixos de abertura de facilidades, os custos de transporte associados aos fluxos de materiais e produtos, os custos de suprimentos de materiais, bem como os custos de armazenagem e movimentação de materiais e produtos (Wu et al., 2006).

Cordeau et al. (2008) relatam que após o trabalho pioneiro de projeto de rede de distribuição de

multi-commodities de Geoffrion & Graves (1974), um grande número de modelos tem sido proposto para o projeto de cadeias de suprimento, incorporando recursos naturais, produção e aspectos de transporte (Visentini & Borenstein, 2014). Considerando o grande número de variáveis e restrições, este problema é de dificuldade NP-hard, para os quais diversos algoritmos exatos e heurísticos vêm sendo desenvolvidos nas últimas décadas (Wu et al., 2006). Kazemi et al. (2008) destacam que muitos pesquisadores têm abordado a otimização de redes de cadeia de suprimentos, os quais abrangem um amplo domínio de formulações que variam desde os mais simples, para um único produto, até modelos mais complexos, não lineares ou estocásticos. Com a complexidade desses modelos, se torna necessária a utilização de heurísticas ou meta-heurísticas para a sua resolução, assunto abordado na sequência.

2.2 Métodos heurísticos

Zaleta & Socorrás (2004) destacam que não existe um algoritmo capaz de resolver na otimalidade o problema do projeto de cadeia de suprimentos para grandes instâncias, em um período de tempo razoável. Lee & Kwon (2010) complementam que, embora a capacidade computacional tenha aumentado e uma série de *softwares* eficientes e poderosos para lidar com programação de grande porte seja oferecida no mercado, o tempo computacional para resolução de problemas com centenas de produtos e clientes, e dezenas de plantas, ainda é muito pesado. Para os autores, na prática, as decisões sobre operação

de centros de distribuição são avaliadas levando em consideração vários cenários de análise, sendo desejável que o tempo computacional para solucionar cada cenário não exceda 30 minutos.

O Quadro 1 apresenta alguns estudos que desenvolveram procedimentos heurísticos a fim de otimizar redes de cadeia de suprimentos. Essa abordagem de resolução mostra-se importante quando as redes se apresentam muito complexas e envolvem muitos dados e variáveis, sendo difícil ou até mesmo impossível a obtenção de uma solução ótima para o problema.

Pelo Quadro 1, observa-se que diferentes heurísticas foram aplicadas, desde métodos baseados em programação linear inteira até meta-heurísticas. Considerando a simplicidade do método e os bons resultados obtidos, selecionou-se a Busca Tabu dada a sua simplicidade e sua capacidade de encontrar soluções muito próximas às ótimas, em um tempo computacional muito pequeno (Pepin et al., 2008). Mesmo sendo uma técnica relativamente nova, os resultados obtidos em problemas complexos são geralmente extremamente promissores (Colin, 2007). Devido a estes fatos e à sua grande adaptação a problemas de otimização de redes de cadeia de suprimentos (Glover, 1989), esta técnica vem sendo aplicada com sucesso em diversos problemas com dezenas de milhares e até milhões de variáveis inteiras, encontrando soluções muito próximas ao ótimo global, incluindo-se problemas de logística, como de localização, transporte, projetos de rede de cadeia de suprimentos, roteamento de veículos e distribuição (Keskin & Uster, 2007).

Quadro 1. Abordagens heurísticas para otimização de redes de cadeias de suprimento.

	REFERÊNCIA	PROBLEMA	ABORDAGEM HEURÍSTICA
1	Pirkul & Jayaraman (1996)	Minimização dos custos de uma cadeia <i>single-source multi-commodity</i>	Relaxamento Lagrangeano
2	Holmberg & Hellstrand (1998)	Resolução exata ótima de um projeto de rede de cadeia de suprimentos multimodal com instalações não capacitadas	Lagrange em uma estrutura <i>branch-and-bound</i>
3	Jayaraman & Pirkul (2001)	Minimização dos custos de uma cadeia <i>single-source</i> com diversos estágios	Relaxamento Lagrangeano
4	Altiparmak et al. (2006)	Encontrar um conjunto de melhores soluções possíveis para otimização de um projeto da rede de uma cadeia de suprimentos multiobjetivo	Algoritmos genéticos e <i>Simulated Annealing</i>
5	Cordeau et al. (2006)	Resolução de um problema de seleção de fornecedores, localização de fábricas e armazéns e o fluxo de mercadorias por meio da rede	Método <i>branch-and-bound</i> e Decomposição de Bender
6	Lee et al. (2008)	Resolver um problema de planejamento de distribuição para uma rede de cadeia de suprimentos multinível	Decomposição da rede e utilização de um método de busca pós-melhoria baseado em Busca Tabu
7	Li et al. (2009)	Determinar a localização de plantas capacitadas incorporadas a um problema de fluxo de <i>multi-commodities</i>	Heurística Lagrangeana, otimização subgradiente e Busca Tabu

Fonte: elaborado pelos autores.

Quadro 1. Continuação...

	REFERÊNCIA	PROBLEMA	ABORDAGEM HEURÍSTICA
8	Amrani et al. (2009)	Extensão <i>multi-commodity</i> em dois estágios para o problema de localização de instalações capacitadas com <i>single-source</i>	Método de busca na vizinhança integrada a um procedimento tabu
9	Bidhandi et al. (2009)	Projeto da rede de uma cadeia de suprimentos <i>multi-commodity</i> em um único período	Decomposição de Bender
10	Hsu & Li (2009)	Projeto da rede de abastecimento da cadeia de uma empresa, buscando explorar os impactos das economias de escala decorrentes da utilização da capacidade ideal e da quantidade de produção de cada facilidade	Heurística baseada em <i>Simulated Annealing</i>
11	Javid & Azad (2010)	Otimização simultânea da localização, alocação, capacidades, estoques e roteamento em uma cadeia de suprimentos estocástica, em que cada cliente possui uma demanda incerta e cada CD possui determinada quantidade de estoque de segurança	Método baseado em Busca Tabu e <i>Simulated Annealing</i>
12	Yao et al. (2010)	Problema de localização-alocação de instalações e estoques, permitindo a utilização de múltiplas fontes de armazéns	Método heurístico iterativo com utilização de técnicas de aproximação e transformação
13	Shimizu & Fujikura (2010)	Otimização estratégica de um projeto de rede logística para melhorar a eficiência de uma cadeia de suprimentos	Busca Tabu Híbrida
14	Lee & Kwon (2010)	Problema de localização de instalações e o plano de distribuição em uma cadeia de suprimentos <i>single-source</i>	Heurística baseada em Busca Tabu
15	Kim & Kim (2010)	Determinar a localização de facilidades de cuidado de pacientes com o objetivo de balancear o número de pacientes designados às facilidades	<i>Branch and bound</i>
16	Asken & Aras (2012)	Localização de facilidades com cargas fixas para o planejamento de um sistema para prover serviços públicos a consumidores.	Busca-Tabu
17	Sun (2012)	Localização de facilidades capacitadas	Busca-Tabu
18	Badri et al. (2013)	Desenho e planejamento estratégico e tático de uma rede de cadeias de suprimentos	Relaxação Lagrangeana
19	Addis et al. (2013)	Resolver uma generalização do problema de localização de facilidades na qual dois níveis de facilidades devem ser localizados	Neighborhood search
20	Rahmani & Mirhassani (2014)	Onde localizar as facilidades e como movimentar as <i>commodities</i> de forma a minimizar os custos	Algoritmo Genético
21	Li et al. (2014)	Localização de facilidades multiproduto. Minimizar os custos, alocando depósitos, determinando o fluxo de produtos nas plantas e abrindo centros de distribuição para outros clientes.	Relaxação Lagrangeana e Dantzig-Wolfe
22	Arrondo et al. (2015)	Localização de facilidades biobjetivas	FEMOEA, Algoritmo Evolucionário
23	Ho (2015)	Determinar um subconjunto de facilidades capacitadas a serem abertas a fim de satisfazer as demandas dos clientes de forma que os custos sejam minimizados.	Busca-Tabu

Fonte: elaborado pelos autores.

A BT é uma meta-heurística de busca local, introduzida por Glover (1986), que procura melhorar uma solução corrente por meio da execução de movimentos dentro de uma vizinhança (Chiang et al., 2009). A BT explora o espaço de solução de um problema movendo, a cada iteração, a solução atual para o seu melhor vizinho e, para evitar ciclos, alguns atributos da solução atual são armazenados em uma lista, e qualquer solução que possua os mesmos atributos é declarada como proibida (ou tabu) para um determinado número de iterações (Gendreau et al., 1999), objetivando impedir a ocorrência de ciclos na busca (Amrani et al., 2009).

3. Procedimentos metodológicos

3.1 Definição do problema

A cadeia de suprimentos analisada neste artigo é formada por fornecedores de matérias-primas, plantas produtoras (fábricas), CDs e zonas de consumos de produtos (clientes). As fábricas são responsáveis pela produção de um conjunto de produtos à base de borracha. Esses produtos possuem diversos tamanhos, propriedades e especificações diferentes, porém são basicamente constituídos pelas mesmas matérias-primas. As fábricas são abastecidas por diversos fornecedores. Os CDs recebem mercadorias de qualquer fábrica, enviando aos clientes as quantidades de cada produto de acordo com a demanda.

Um fator de grande impacto na minimização dos custos totais da cadeia de suprimentos é o transporte entre os atores. Assim, é necessário considerar os custos de transporte de matéria-prima (dos fornecedores às fábricas) e dos produtos acabados (das fábricas aos clientes, passando pelos CDs). Devido à quantidade de produtos envolvidos nos fluxos da cadeia, também é necessário considerar os limitadores de capacidade de produção em cada fábrica e de processamento nos

Quadro 2. Conjuntos do modelo.

W	conjunto de DCs;
F	conjunto de fábricas;
S	conjunto de produtos;
R	conjunto de matérias-primas;
V	conjunto de fornecedores;
C	conjunto de clientes.

Fonte: adaptado de Farias & Borenstein (2012).

Quadro 3. Variáveis de decisão do modelo.

x_{fvs}	quantidade de produto $s \in S$ enviada da fábrica $f \in F$ ao CD $w \in W$
y_{vfr}	quantidade de matéria-prima $r \in R$ enviada do fornecedor $v \in V$ para a fábrica $f \in F$
z_w	variável binária, em que: 1 se o CD $w \in W$ está selecionado; e 0 caso contrário;
g_{wc}	variável binária, em que: 1 se o CD $w \in W$ atende à demanda da zona de consumo $c \in C$; e 0 caso contrário.

Fonte: adaptado de Farias & Borenstein (2012).

CDs, bem como outros custos fixos e variáveis de cada instalação.

A localização dos fornecedores, das fábricas, dos CDs e dos clientes são conhecidas, sendo o objetivo deste problema determinar o conjunto de CDs que deverão ser abertos para que a empresa possa atender totalmente à demanda de seus clientes ao menor custo possível. Para tanto, é necessário considerar as quantidades de cada matéria-prima que devem ser adquiridas a partir de cada fornecedor e a quantidade a ser produzida em cada fábrica. Quanto à estratégia de distribuição, o problema considera uma abordagem *single-source*, em que cada cliente só pode receber produtos de um único CD.

3.2 Construção do modelo

Para a construção do modelo, Arenales et al. (2007) sugerem que o problema seja “traduzido” em relações lógicas de simulação, matemáticas ou uma combinação de ambas. Para a solução deste problema, foi utilizado o modelo *single-source* proposto por Farias & Borenstein (2012), no qual uma zona de consumo pode ser abastecida somente por um único CD. Os conjuntos utilizados no modelo são apresentados no Quadro 2, as variáveis de decisão no Quadro 3.

Os parâmetros utilizados no modelo são ilustrados no Quadro 4.

O modelo matemático utilizado é apresentado a seguir:

$$\min \sum_{w \in W} CT_w^o z_w + \sum_{w \in W} \sum_{c \in C} \sum_{s \in S} CT_w^g d_{sc} g_{wc} + \sum_{f \in F} \sum_{w \in W} \sum_{s \in S} CT_f^p x_{fws} + \sum_{v \in V} \sum_{f \in F} \sum_{r \in R} CT_{vf}^i y_{vfr} + \sum_{f \in F} \sum_{w \in W} \sum_{s \in S} CT_f^t x_{fws} + \sum_{w \in W} \sum_{c \in C} \sum_{s \in S} CT_{wc}^t d_{sc} g_{wc} \quad (1)$$

Sujeito a

$$\sum_{w \in W} g_{wc} = 1 \quad \forall c \in C \quad (2)$$

$$\sum_{c \in C} \sum_{s \in S} d_{sc} g_{wc} \leq CAP_w z_w \quad \forall w \in W \quad (3)$$

$$\sum_{w \in W} z_w \leq U_w \quad (4)$$

$$\sum_{c \in C} d_{sc} g_{wc} \leq \sum_{f \in F} x_{fws} \quad \forall w \in W, \forall c \in C, \forall s \in S \quad (5)$$

$$\sum_{f \in F} y_{vfr} \leq CAP_{vr} \quad \forall r \in R, \forall v \in V \quad (6)$$

$$\sum_{w \in W} \sum_{s \in S} u_{rs} x_{fws} \leq \sum_{v \in V} y_{vfr} \quad \forall r \in R, \forall f \in F \quad (7)$$

$$\sum_{w \in W} \sum_{s \in S} u_s x_{fws} \leq CAP_f \quad \forall f \in F \quad (8)$$

$$\sum_{f \in F} \sum_{s \in S} x_{fws} \geq u_{min} \quad \forall w \in W \quad (9)$$

$$z_w \in \{0,1\} \quad \forall w \in W \quad (10)$$

$$g_{wc} \in \{0,1\} \quad \forall w \in W, \forall c \in C \quad (11)$$

A função objetivo do Modelo 1 busca minimizar a soma dos custos anuais dos CDs, do processamento em cada CD, de produção nas fábricas, do transporte de matéria-prima até as fábricas e de produtos acabados até os clientes, passando pelos CDs. A abordagem *single-source* é expressa em 2, em que é garantido que cada cliente será atendido apenas por um único CD. A Restrição 3 assegura que a capacidade do CD não será violada, enquanto a 4 limita o número máximo de CDs a serem instalados. A Restrição 5 assegura que os CDs têm capacidade para atender à demanda, enquanto a 6 assegura que a capacidade de fornecimento de matéria-prima pelo fornecedor é respeitada. Em 7, é estabelecida a relação entre matérias-primas e produtos. A Restrição 8 garante que a capacidade das fábricas não será violada e a 9 determina uma utilização mínima para que um CD possa ser instalado. As Restrições 10 e 11 são as condições de integralidade das variáveis binárias do modelo.

3.3 Solução do modelo

Para a otimização da rede da cadeia de suprimentos desta pesquisa, foi adaptado o método heurístico baseado em Busca Tabu proposto por Lee & Kwon (2010). Esses autores aplicaram a heurística para uma cadeia de suprimentos considerando plantas, CDs e clientes, sendo que nesta pesquisa foram adicionados os fornecedores de matérias-primas. A heurística proposta realiza uma busca iterativa de soluções vizinhas, iniciando a partir de uma solução inicial, enquanto a checagem à lista tabu impede o retorno a uma solução recentemente visitada, sendo que a cada iteração a vizinhança é gerada por meio da troca de CDs e arcos de transporte, que são selecionados conforme regras de prioridade que representam um custo unitário médio para cada operação. O passo a passo da heurística pode ser observado na Figura 1.

Lee & Kwon (2010) consideram que as heurísticas utilizam a decomposição de redes para ganhar eficiência computacional, enquanto as meta-heurísticas, como a Busca Tabu, utilizam regras de prioridade para seleção de facilidade e/ou rotas em cada ponto de decisão. Assim, a rede foi decomposta em dois subproblemas: decomposição da demanda e decomposição de suprimentos, sendo o primeiro aplicado no estágio entre CDs e clientes, enquanto o segundo considera o restante da rede.

Na decomposição da demanda, os CDs e os arcos de transporte são trocados para formar uma solução vizinha com a utilização de um índice de prioridade e um mecanismo de controle tabu. Nessa etapa, são decididos os CDs que serão abertos e o plano de distribuição dos produtos dos CDs aos clientes.

Para a seleção dos CDs e dos arcos a serem trocados, Lee & Kwon (2010) sugerem a utilização

Quadro 4. Parâmetros utilizados no modelo matemático.

d_{sc}	demanda por produtos $s \in S$ pelo cliente $c \in C$;
U_w	máximo de CDs que podem ser abertos;
u_{rs}	taxa de utilização de matéria-prima $r \in R$ por unidade de produto acabado $s \in S$;
u_s	taxa de utilização de capacidade produtiva por unidade de produto $s \in S$;
CAP_w	capacidade de transferência do CD $w \in W$;
CAP_{vr}	capacidade de suprimento da matéria-prima $r \in R$ pelo fornecedor $v \in V$;
CAP_f	capacidade de produção da fábrica $f \in F$;
CT_w^o	custo fixo anual de funcionamento do CD $w \in W$;
CT_w^g	custo unitário de transferência do CD $w \in W$;
CT_{fs}^p	custo unitário de produção do produto $s \in S$ na fábrica $f \in F$;
CT_{fvr}^t	custo unitário de transporte da matéria-prima $r \in R$ do fornecedor $v \in V$ para fábrica $f \in F$;
CT_{fws}^t	custo unitário de transporte do produto $s \in S$ da fábrica $f \in F$ para o CD $w \in W$;
CT_{wcs}^t	custo unitário de transporte do produto $s \in S$ utilizando o CD $w \in W$ para o cliente $c \in C$;
u_{min}	demanda mínima para abertura do CD $w \in W$.

Fonte: adaptado de Farias & Borenstein (2012).

de um índice de prioridade, o *Unit Cost Ratio* (UCR), que, em tradução livre, pode ser chamado de taxa de custo unitário. Este índice engloba os custos mais importantes e influencia fortemente o resultado da função objetivo. Três tipos de índices são sugeridos: o *UCR-F*, utilizado para geração da solução inicial; o *UCR-O*, utilizado na troca de CDs; e o *UCR-S*, utilizado na troca de arcos.

3.3.1 Geração da solução inicial

Para a geração da solução inicial, os CDs são selecionados com base em um índice de prioridade, o *UCR-F*, que representa o custo de operação do CD por unidade de produto, sendo obtido pela divisão do custo de operação do CD pela capacidade total. Os CDs com menor índice têm prioridade de abertura e os clientes com maior demanda são alocados aos

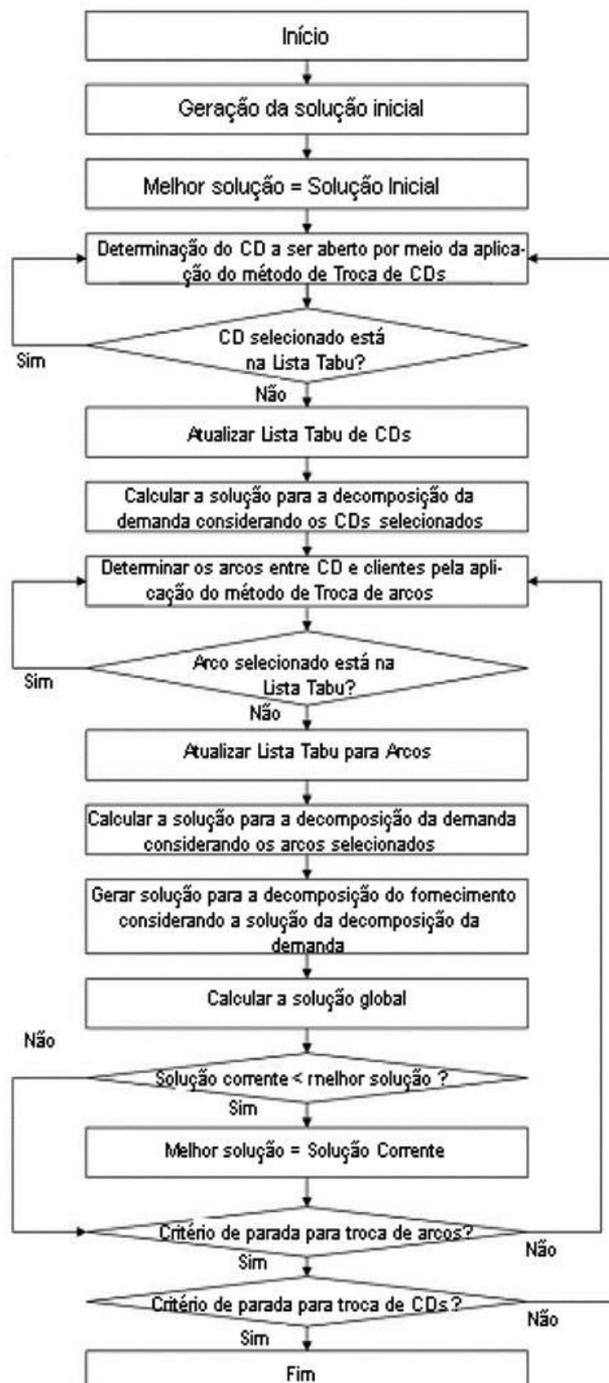


Figura 1. Heurística para solução do problema. Fonte: adaptado de Lee & Kwon (2010, p. 3097).

CDs de menor índice, enquanto a capacidade dos CDs não for excedida. O índice $UCR-F_w$ do CD $w \in W$ é determinado por 12:

$$UCR-F_w = \frac{CT_w^o}{CAP_w} \tag{12}$$

O procedimento para a geração da solução inicial é apresentado no Quadro 5.

3.3.2 Geração da vizinhança: decomposição da demanda

No procedimento de geração de vizinhança na decomposição da demanda, dois métodos são aplicados: troca de CDs e troca de arcos. O procedimento de troca de CDs é capaz de gerar novas vizinhanças pela substituição de CDs abertos por fechados, ou vice-versa. Para essa operação, é utilizado o índice $UCR-O$, que representa o custo unitário de operação do CD, sendo definido pela soma do custo de operação do CD, o custo de transporte entre fábricas e o CD, e o custo de transporte do produto aos clientes. Os CDs com menores valores de $UCR-O$ têm preferência de abertura, sendo que, no procedimento de troca, os CDs com maiores índices $UCR-O$ são fechados e substituídos por CDs fechados com menores índices. Esse procedimento pode ser observado no Quadro 6.

Em 13 é expressa a fórmula para determinar o valor de $UCR-O_w$ do CD $w \in W$.

$$UCR-O_w = \frac{\sum_f CT_{fws}^t}{NP_w} + \frac{\sum_c CT_{wcs}^t}{NC_w} + \frac{CT_w^o}{Q_w} \tag{13}$$

Em que:

- Q_w = quantidade de produtos passando pelo CD $w \in W$;
- NP_w = número de fábricas que abastecem o CD $w \in W$;
- NC_w = número de clientes atendidos pelo CD $w \in W$.

O método de troca de arcos é utilizado na geração de vizinhança por meio da substituição de dois arcos

no estágio de decomposição da demanda, buscando a redução no custo de transporte e manuseio de produtos pela troca de CD que atende a determinado cliente. Dois arcos são selecionados randomicamente e, então, é calculado o índice $UCR-S_{wc}$ para ambos. Se a soma do $UCR-S_{wc}$ depois da troca de arcos for menor que antes da troca, a substituição dos arcos é realizada. O $UCR-S_{wc}$ considera a soma de três termos: o custo de transporte unitário, o custo de operação do CD $w \in W$ dividido pelo número de arcos utilizados e o custo de manuseio de produtos divididos pelo número de arcos utilizados a partir do CD $w \in W$. O índice $UCR-S_{wc}$, para o arco (w,c) é determinado por 14:

$$UCR-S_{wc} = CT_{wcs}^t + \frac{CT_w^o}{NC_w * QA_{wc}} + \frac{\sum_s (CT_w^s / NC_w)}{QA_{wc}} \tag{14}$$

Em que:

- NC_w = número de clientes atendidos pelo CD $w \in W$;
- QA_{wc} = quantidade de produto transportado do CD $w \in W$ ao cliente $c \in C$.

No Quadro 7 é apresentado o procedimento para troca de arcos.

3.3.3 Procedimento tabu

Para resolução do problema foram utilizadas três listas tabu, sendo duas para o procedimento de troca de CDs e a terceira para o procedimento de troca de arcos. A cada iteração, é realizada uma troca de CDs e uma troca de arcos, sendo que estas são registradas nas listas tabu. O procedimento de busca é realizado de forma guiada, ou seja, a cada iteração serão selecionados o CD e o arco com menor custo entre os disponíveis para substituição.

A cada operação de troca de CDs, duas listas tabu são operadas: uma para os CDs fechados e outra para os CDs abertos, ou seja, cada vez que um CD é selecionado para ser fechado ou aberto na busca local,

Quadro 5. Procedimento heurístico para geração da solução inicial.

<p>Passo 1: Inicialização e computação dos índices de prioridade:</p> <ul style="list-style-type: none"> Passo 1.1: Considerar todos CDs fechados. Passo 1.2: Calcular $UCR-F_w$ para cada CD. Passo 1.3: Classificar os CDs em ordem crescente de acordo com o índice calculado. <p>Passo 2: Solução da decomposição da demanda:</p> <ul style="list-style-type: none"> Passo 2.1: Selecionar os CDs sequencialmente de acordo com a lista ordenada em 1.3. Passo 2.2: Alocar os clientes com maior demanda aos CDs com menor índice, sem exceder as capacidades. Passo 2.3: Se todas as demandas foram alocadas a algum CD, parar. Se não, retornar ao passo 2.1. <p>Passo 3: Solução da decomposição de suprimento:</p> <ul style="list-style-type: none"> Passo 3.1: Geração da solução para a decomposição de suprimento e combinação com a solução da decomposição da demanda para completar a solução inicial.

Fonte: adaptado de Lee & Kwon (2010, p. 3097).

Quadro 6. Procedimento heurístico para troca de CDs.

<p>Passo 1: Definição da condição inicial:</p> <p>Passo 1.1: Classificar os CDs de acordo com seu status: aberto ou fechado;</p> <p>Passo 2: Cálculo do $UCR-O_w$:</p> <p>Passo 2.1: Calcular $UCR-O_w$ para cada CD aberto.</p> <p>Passo 2.2: Classificar os CDs abertos em ordem decrescente de $UCR-O_w$.</p> <p>Passo 3: Troca de CDs:</p> <p>Passo 3.1: Selecionar os CDs abertos sequencialmente de acordo com a classificação anterior.</p> <p>Passo 3.1.1: Calcular o $UCR-O_w$ para os CDs fechados de acordo com a quantidade transportada dos CDs selecionados no passo 2.1.</p> <p>Passo 3.1.2: Classificar os CDs fechados em ordem crescente de $UCR-O_w$.</p> <p>Passo 3.1.3: Selecionar os CDs fechados sequencialmente de acordo com a classificação anterior e verificar a viabilidade, comparando capacidades do CD que se deseja abrir e do que se deseja fechar.</p> <p>Passo 3.1.4: Se for viável, trocar os CDs e encerrar o procedimento. Se não, se existir um CD fechado que ainda não tenha sido selecionado anteriormente, retornar ao passo 3.1.3.</p> <p>Passo 3.2: Se existir algum CD aberto que não tenha sido selecionado anteriormente, retornar ao Passo 3.1 e repetir as etapas. Se não, finalizar o procedimento desde que a troca de CDs não seja mais possível.</p>
--

Fonte: adaptado de Lee & Kwon (2010, p. 3098).

Quadro 7. Procedimento heurístico para troca de arcos.

<p>Passo 1: Definir as condições iniciais:</p> <p>Passo 1.1: Classificar os arcos em utilizados ou não.</p> <p>Passo 2: Calcular $UCR-S_{wc}$:</p> <p>Passo 2.1: Calcular $UCR-S_{wc}$ para cada arco utilizado.</p> <p>Passo 2.2: Ordenar os arcos utilizados em ordem decrescente de acordo com o valor de $UCR-S_{wc}$.</p> <p>Passo 3: Troca de arcos:</p> <p>Passo 3.1: Selecionar arcos utilizados sequencialmente de acordo com a lista de classificação:</p> <p>Passo 3.1.1: Selecionar outro arco utilizado entre o conjunto de arcos utilizados restantes.</p> <p>Passo 3.1.2: Assumindo que os arcos selecionados foram trocados, calcular $UCR-S_{wc}$ para os arcos substituídos.</p> <p>Passo 3.1.3: Verificar a viabilidade por meio da comparação das capacidades dos CDs utilizados pelos arcos selecionados. Se for viável, realizar o passo 3.1.4. Se não, voltar ao passo 3.1.1 e repetir as etapas.</p> <p>Passo 3.1.4: Se a soma do $UCR-S_{wc}$ calculada no passo 3.1.2 for menor do que a soma de $UCR-S_{wc}$ calculada no passo 2, realizar a troca de arcos e encerrar o procedimento. Se não, voltar ao passo 3.1.1 e repetir as etapas.</p> <p>Passo 3.2: Se existirem arcos utilizados não selecionados anteriormente, voltar ao passo 3.1.3.</p>
--

Fonte: adaptado de Lee & Kwon (2010, p. 3099).

a lista correspondente é verificada para constatar a possibilidade de a operação ser realizada e, caso o CD selecionado já esteja na lista, é necessário que seja determinado outro CD para concluir a operação. Na troca de arcos, por sua vez, é registrado o par de arcos recentemente trocado e a lista tabu é utilizada para inibir a troca de arcos recentemente alterados, buscando explorar novos espaços de solução.

Quanto ao tamanho das listas, Lee & Kwon (2010) fixaram em 5 para os CDs e 20 para os arcos, pois observaram que são tamanhos apropriados e não

apresentaram grande variação durante a experimentação. No entanto, para esta pesquisa, o tamanho das listas foi determinado individualmente para cada instância, visto que o tamanho da lista afeta consideravelmente o valor da função objetivo. Desta forma, vários testes foram realizados até identificar o tamanho de lista que encontrava o melhor resultado para cada instância. A Tabela 1 apresenta o tamanho das listas tabu consideradas para resolução de cada instância.

Para Lee & Kwon (2010), a Busca Tabu se adapta perfeitamente ao método de solução proposto, visto

Tabela 1. Tamanho das listas tabu consideradas em cada instância.

Instância	CD	ARC	Instância	CD	ARC
1	5	9	12	7	20
2	6	18	13	7	50
3	7	25	14	7	100
4	8	26	15	8	25
5	9	50	16	8	50
6	5	9	17	8	120
7	5	25	18	9	24
8	5	40	19	9	44
9	6	20	20	9	150
10	6	50	21	6	20
11	6	110	22	6	100

Fonte: elaborado pelos autores.

que as regras de prioridade estabelecidas têm a tendência de ficarem concentradas em uma única região de solução, porém, com a utilização da lista tabu, a saída desta região do ótimo local é forçada, explorando novas regiões em busca de melhor solução.

Lee & Kwon (2010) utilizaram dois critérios de parada: 10 iterações consecutivas sem melhoria e o máximo de 1.000 iterações. Para a realização desta pesquisa, foram utilizadas como critério de parada 2.000 iterações máximas e 500 iterações seguidas sem melhoria.

Depois de conhecida a necessidade de produtos acabados em cada CD, resolveu-se o subproblema de decomposição de suprimento. Para determinar qual fábrica abastece cada CD, foi utilizado como critério o somatório dos custos de transporte e de produção dos produtos, sendo escolhido o CD que apresentar o menor valor dessa combinação.

Para seleção de fornecedores de matéria-prima, foi considerado o custo de transporte entre fornecedor e fábricas. Sabendo a necessidade de produtos em cada fábrica, é possível calcular a necessidade de matéria-prima para produção. Assim, as matérias serão adquiridas dos fornecedores que apresentarem menores custos de transporte. O custo da matéria-prima não foi considerado devido aos valores serem muito semelhantes para todos os fornecedores, sendo o custo de transporte mais importante para essa etapa.

3.3.4 Instâncias resolvidas

A heurística desenvolvida foi utilizada para resolver as 22 instâncias propostas por Farias & Borenstein (2012) e os resultados obtidos foram comparados com as soluções ótimas encontradas pelos autores com a utilização do CPLEX e com os resultados de Lee & Kwon (2010).

As instâncias geradas e apresentadas na Tabela 2 deram ênfase na aplicação de modelos em situações de diferentes quantidades de CDs, produtos e clientes; a quantidade de fornecedores, tipos de matérias-primas

e fábricas foram mantidas fixas em todas as instâncias, enquanto a capacidade de processamento e os custos fixos dos CDs foram estabelecidos de modo a apresentar um caráter realista para o problema abordado (Farias & Borenstein, 2012).

Além das instâncias propostas pelos autores, foram geradas e resolvidas outras quatro instâncias com características reais e mais complexas que as até então solucionadas a fim de verificar a eficiência da heurística em um cenário ainda mais realista. Suas configurações serão apresentadas no próximo capítulo.

A heurística proposta foi desenvolvida em linguagem de programação C ANSI e os resultados foram obtidos pela execução computacional em um microcomputador com processador Pentium Dual-Core T4300 2.10 GHz com 4 GB de memória RAM e sistema operacional Linux versão 3.0.0-12-generic com Ubuntu 11.11.

Expostos os procedimentos metodológicos utilizados para resolução do problema desta pesquisa, são apresentados e discutidos, no próximo capítulo, seus resultados.

4 Apresentação e discussão dos resultados

Foram analisadas as soluções iniciais encontradas para cada instância e a solução final, ou seja, a melhor solução identificada durante o processo heurístico. Observou-se que, em média, as soluções iniciais geradas puderam ser melhoradas em 3,87% com a aplicação dos procedimentos de troca de arcos e CDs. No método proposto por Lee & Kwon (2010), a alocação de clientes aos CDs foi realizada de maneira aleatória, enquanto que, nesta pesquisa, optou-se por alocar as maiores demandas aos CDs que apresentassem menor valor de *UCR*, obtendo, assim, soluções iniciais já bastante próximas dos melhores resultados.

A Tabela 3 apresenta as soluções encontradas (em \$) e o tempo de CPU (em segundos) para cada uma das 22 instâncias, comparando os resultados obtidos pelo CPLEX com a BT implementada nessa pesquisa.

Fazendo um comparativo entre os valores ótimos e heurísticos para as 22 instâncias, foi possível constatar que o *gap* (diferença entre solução ótima e solução heurística) teve variação de 0,18% (instância 7) até 7,74% (instância 13), tendo valor médio de 4,98%. Lee et al. (2008) resolveram um problema com características semelhantes, utilizando o CPLEX para otimização de uma etapa do problema e um método de busca pós-melhoria baseado em Busca Tabu. Os autores consideraram uma rede com fábricas, armazéns e CDs e, como resultados, obtiveram um *gap* médio de 7,94%, com variação entre 3,05% e 13,57%. Considerando que o *gap* médio desta pesquisa foi de 4,98%, conclui-se que o método aqui utilizado foi capaz de encontrar resultados com *gap* 37,28% inferior aos dos autores.

É interessante ressaltar, ainda, que das 20 instâncias propostas por Lee et al. (2008), 10 consideravam

Tabela 2. Configuração das instâncias resolvidas.

Instância	Fornecedores	Matérias-primas	Fábricas	CDs	Grupos Produtos	Clientes
1	5	5	3	10	5	150
2	5	5	3	20	5	150
3	5	5	3	30	5	150
4	5	5	3	40	5	150
5	5	5	3	50	5	150
6	5	5	3	10	10	150
7	5	5	3	10	50	150
8	5	5	3	10	100	150
9	5	5	3	20	10	150
10	5	5	3	20	50	150
11	5	5	3	20	100	150
12	5	5	3	30	10	150
13	5	5	3	30	50	150
14	5	5	3	30	100	150
15	5	5	3	40	10	150
16	5	5	3	40	50	150
17	5	5	3	40	100	150
18	5	5	3	50	10	150
19	5	5	3	50	50	150
20	5	5	3	50	100	150
21	5	5	3	20	10	150
22	5	5	3	20	50	150

Fonte: elaborado pelos autores, adaptado de Farias & Borenstein (2012).

Tabela 3. Comparativo de solução e tempo de execução das instâncias.

Instância	Solução (\$)			Tempo de CPU (s)		
	CPLEX	BT	gap (%)	CPLEX	BT	Redução (%)
1	16.970.300	17.796.420	4,87%	2,07	0,66	-68,12%
2	16.541.500	16.750.500	1,26%	2,42	0,25	-89,59%
3	17.484.800	18.605.000	6,41%	4,06	0,45	-88,87%
4	15.453.300	16.568.600	7,22%	7,65	0,16	-97,87%
5	15.051.100	15.857.900	5,36%	4,86	0,44	-90,86%
6	31.098.000	31.224.000	0,41%	2,45	0,53	-78,53%
7	30.755.440	30.811.316	0,18%	3,97	1,46	-63,17%
8	29.169.246	29.661.682	1,69%	9,61	5,63	-41,47%
9	28.816.500	30.275.000	5,06%	3,93	1,09	-72,26%
10	30.880.456	32.487.848	5,21%	10,97	2,16	-80,29%
11	31.226.678	33.249.280	6,48%	39,62	4,82	-87,84%
12	27.681.500	29.284.500	5,79%	4,39	1,95	-55,69%
13	29.728.252	32.029.352	7,74%	13,54	2,53	-81,32%
14	27.813.526	29.738.192	6,92%	36,44	3,42	-90,62%
15	28.525.950	29.899.900	4,82%	10,74	0,32	-97,00%
16	29.947.862	31.839.320	6,32%	15,03	2,71	-81,99%
17	28.943.138	29.780.336	2,89%	54,42	3,99	-92,67%
18	27.532.500	29.234.500	6,18%	4,96	0,56	-88,77%
19	27.763.300	29.810.824	7,37%	17,45	3,64	-79,13%
20	27.935.264	29.855.046	6,87%	38,47	4,82	-87,48%
21	60.940.660	63.570.312	4,32%	7,12	0,67	-90,60%
22	63.771.168	67.760.184	6,26%	13,23	2,84	-78,53%
Média			4,98%	13,97	2,05	-81,03%

Fonte: elaborado pelos autores.

20 e 50 clientes e puderam ser resolvidas, enquanto que para as outras 10 instâncias, que continham 70 e 100 clientes, os autores não conseguiram encontrar resultados, pois o tempo computacional máximo determinado de 300 segundos foi atingido.

Lee & Kwon (2010), por sua vez, conseguiram resultados com *gap* médio de apenas 3,53% para todas as instâncias resolvidas, valor 29,12% inferior ao obtido nesta pesquisa. Cabe destacar que as instâncias de maior complexidade abordadas pelos autores consideraram apenas 20 CDs, 80 clientes e 5 produtos, enquanto este estudo abordou cenários com 50 CDs, 150 clientes e 100 produtos, além de compreender o fornecimento de matéria-prima, desconsiderado no problema dos autores. Outro motivo que merece destaque refere-se ao fato de Lee & Kwon (2010) terem utilizado o CPLEX para resolver a decomposição de suprimentos do problema, obtendo, assim, resultados ótimos nesta etapa. Nesta pesquisa, optou-se por não utilizar o CPLEX, visando à construção de uma heurística totalmente independente de *softwares* de mercado, o que pode ser mais útil à prática organizacional.

No que se refere aos tempos computacionais necessários para obtenção dos resultados ótimos pelo CPLEX e pela heurística, bem como o percentual de redução do tempo de execução comparando essas abordagens, observou-se que a heurística foi capaz de resolver as instâncias em tempos relativamente pequenos, visto que o percentual médio de redução do tempo de execução foi de 81,03%. Os tempos de execução obtidos nesta pesquisa variaram entre 0,16 (instância 4) e 5,63 segundos (instância 8), com média de 2,05 segundos, sendo que o CPLEX foi capaz de resolver as instâncias com média de 13,97 segundos e tempo variando entre 2,07 e 54,42 segundos, conforme pode-se observar na Tabela 3.

Lee & Kwon (2010) tiveram uma variação no tempo de execução da heurística entre 0,55 e 260,50 segundos, com um tempo médio de 42,75 segundos, valor 95,20% superior ao aqui obtido. Essa diferença expressiva entre os tempos de execução obtidos nesta pesquisa e os de Lee & Kwon (2010) pode ser justificada devido à utilização de elementos randômicos na geração da solução inicial dos autores, o que os obrigou a repetir 10 vezes a heurística para cada instância em busca de melhor resultado, penalizando no tempo total de execução.

Lee et al. (2008) determinaram como um dos critérios de parada 300 segundos de execução, sendo que 10 das 20 instâncias não puderam ser resolvidas dentro desse limite de tempo. Já no caso da heurística deste estudo, o tempo máximo de execução de uma instância foi de apenas 5,63 segundos, o que comprova a eficiência do método proposto quanto ao tempo computacional, sendo este um elemento crucial para escolha entre duas técnicas heurísticas, de acordo com Bräysy & Gendreau (2005).

4.1 Instâncias com características reais

Depois de analisado o desempenho da heurística para as instâncias de Farias & Borenstein (2012), foram propostas outras quatro instâncias com características reais, visto que a quantidade de dados envolvidos e cenários possíveis nesses problemas são maiores. Assim, pretendeu-se verificar a eficiência da heurística proposta resolvendo os problemas dessas dimensões, visto que o CPLEX não foi capaz de obter resultados para instâncias com essas características. A Tabela 4 apresenta a configuração das instâncias com características reais resolvidas.

As instâncias A, B e C consideraram a configuração de uma rede de cadeia de suprimentos real, sendo que os custos foram gerados de forma aleatória, e a instância D, que considera a possibilidade de abertura de 100 CDs que atendam à demanda de 1.000 clientes por 130 produtos distintos, foi criada para verificar o comportamento da heurística em um cenário em dimensões ainda maiores. Ressalta-se que na literatura investigada não foram encontrados estudos que tenham abordado uma rede com características similares a dessa instância.

Comparando as soluções iniciais e finais para os cenários com características reais, contata-se que o percentual de melhoria entre soluções variou de zero até 7,13%, com média de 3,42% de melhoria. O percentual médio de melhoria vai ao encontro do valor identificado nas instâncias anteriormente exploradas, em que a diferença entre soluções foi de 3,58%.

Quanto ao tempo de execução das instâncias com características reais resolvidas, observou-se que este variou entre 6,52 segundos para a instância B e 117,91 segundos para a instância D, sendo a instância A resolvida em 6,97 segundos e a C em 35,68 segundos.

Tabela 4. Configuração das instâncias com características reais.

Instância	Fornecedores	Matérias-primas	Fábricas	CDs	Grupos Produtos	Clientes
A	5	5	2	10	132	261
B	5	5	2	20	132	261
C	5	5	5	40	130	200
D	5	5	5	100	130	1000

Fonte: elaborado pelos autores.

A resolução das quatro instâncias com características reais permitiu comprovar a eficiência da heurística proposta para resolver problemas complexos de otimização de redes de cadeias de suprimento reais, podendo ser utilizada pelos gestores no processo decisório, tanto em nível estratégico (determinando os CDs a serem abertos), quanto em nível operacional (determinando a quantidade de produtos a ser transferida de uma fábrica a um CD).

5 Considerações finais

Embora existam diversos modelos para otimização de redes de cadeias de suprimento, os problemas reais tornam-se muito complexos de ser resolvidos, visto que grandes instâncias necessitam um grande tempo de execução computacional e, muitas vezes, não conseguem encontrar soluções. Dada a importância da redução de custos logísticos por meio da otimização de cadeias de suprimento e a complexidade de problemas com instâncias reais, o objetivo desta pesquisa consistiu em implementar e avaliar uma heurística baseada em Busca Tabu para otimização de uma rede de cadeia de suprimentos.

Para atingir esse objetivo, o método proposto por Lee & Kwon (2010) foi adaptado e implementado, conforme apresentado nos procedimentos metodológicos do estudo. Como principais alterações no método dos autores, destacam-se a opção por não trabalhar com randomicidade na geração da solução inicial e o acréscimo dos fornecedores de matérias-primas ao problema. Depois de implementada a heurística, o problema foi resolvido considerando as 22 instâncias propostas por Farias & Borenstein (2012), o que possibilitou a comparação e avaliação dos resultados encontrados pela heurística com os valores ótimos.

Por meio da análise dos resultados, foi possível concluir que a heurística implementada encontrou soluções com custo 4,98% superior aos valores ótimos, enquanto Lee & Kwon (2010) obtiveram resultados apenas 3,53% superiores, porém em instâncias diferentes. A diferença de resultados pode estar relacionada ao fato de as instâncias aqui abordadas serem de maior complexidade, visto que, em instâncias menores, como as do cenário 2, por exemplo, os resultados obtidos nesta pesquisa foram melhores que os de Lee & Kwon (2010), sendo possível encontrar soluções com *gap* de apenas 0,76% contra 4,77% dos autores com tempo de 2,54 segundos contra 17,35 segundos.

Constatou-se, também, que o método heurístico utilizado para resolver o problema foi capaz de encontrar resultados com um tempo médio de 2,05 segundos, valor relativamente pequeno se comparado ao tempo médio de Lee & Kwon (2010), que foi de 42,75 segundos para instâncias de menor complexidade. Essa redução substancial no tempo de execução deve-se à melhoria na geração da solução inicial proposta nesta pesquisa. Enquanto Lee & Kwon (2010) optaram pela alocação de clientes a CDs de forma aleatória, esta pesquisa buscou alocar as

maiores demandas aos CDs de menor custo, gerando uma solução inicial melhor e com valor fixo. Por ter trabalhado com aleatoriedade na solução inicial, os autores necessitaram repetir 10 vezes cada instância para obter melhores resultados, enquanto que, para esta pesquisa, os resultados foram encontrados com apenas uma única repetição.

O quanto uma solução final se aproxima do resultado ótimo é uma medida padrão de qualidade. Assim, pode-se concluir que a heurística implementada nesta pesquisa atende a esse requisito, pois, em um tempo de solução muito pequeno, é capaz de encontrar boas soluções, com valores, em média, 4,98% acima do resultado ótimo.

O problema também foi resolvido para quatro instâncias com características reais, buscando verificar o desempenho do método para problemas reais. A heurística foi capaz de resolver as quatro instâncias em tempos computacionais reduzidos, variando entre 6,52 segundos para uma rede com 2 fábricas, 20 CDs, 132 produtos e 261 clientes até 117,914 segundos para 5 fábricas, 100 CDs, 130 produtos e 1.000 clientes.

Assim, conclui-se que a heurística apresentada é eficiente para otimização de redes de cadeias de suprimentos complexas, sendo capaz de obter resultados aceitáveis em um tempo de execução computacional bastante otimizado.

Como limitação deste estudo, constata-se que a heurística implementada é capaz de resolver apenas o modelo *single-source* abordado, sendo que, para utilização em abordagens que não considerem essa restrição (comuns em diversas cadeias de suprimento reais), ela necessitaria de ajustes.

Por fim, alguns tópicos podem ser levantados como sugestões para pesquisas futuras, a saber: a possibilidade de inclusão de transporte multimodal (trem, caminhão, navio, avião, etc.) entre os atores da rede, visto que essa é a realidade de grande parte das cadeias de suprimento e pode aproximar ainda mais o modelo da realidade. Outra questão que pode ser investigada é a do índice *t* (tempo) ao modelo, pois várias cadeias de suprimento possuem a restrição de prazos de entrega, a qual deve ser respeitada. Uma abordagem que não considere a restrição de *single-source* também pode ser explorada em futuras investigações, bem como o desenvolvimento de outras abordagens heurísticas para resolução desse problema, visto que oportunizaria uma comparação entre as duas heurísticas para escolha do método que melhor se aplica a esse problema.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao CNPq e Senescyt, Equador, o apoio financeiro para a realização desta pesquisa.

Referências

Addis, B., Carello, G., & Ceselli, A. (2013). Combining very large scale and ILP based neighborhoods for a two-level location problem. *European Journal of*

- Operational Research*, 231(3), 535-546. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ejor.2013.06.010>.
- Almeder, C., Preusser, M., & Hartl, R. F. (2008). Simulation and optimization of supply chains: alternative or complementary approaches? *OR-Spektrum*, 31(1), 95-119. <http://dx.doi.org/10.1007/s00291-007-0118-z>.
- Altıparmak, F., Gen, M., Lin, L., & Paksoy, T. (2006). A genetic algorithm approach for multi-objective optimization of supply chain networks. *Computers & Industrial Engineering*, 51(1), 196-215. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cie.2006.07.011>.
- Amrani, H., Martel, A., Zufferey, N., & Makeeva, P. (2009). A variable neighborhood search heuristic for the design of multicommodity production–distribution networks with alternative facility configurations. *OR-Spektrum*, 33(4), 989-1007. <http://dx.doi.org/10.1007/s00291-009-0182-7>.
- Arenales, M., Armentano, V., Morabito, R., Yanesse, H. (2007). *Pesquisa operacional*. Rio de Janeiro: Elsevier.
- Arrondo, A., Redondo, J. L., Fernández, J., & Ortigosa, P. M. (2015). Parallelization of a non-linear multi-objective optimization algorithm: application to a location problem. *Applied Mathematics and Computation*, 255, 114-124. <http://dx.doi.org/10.1016/j.amc.2014.08.036>.
- Asken, D., & Aras, N. (2012). A bilevel fixed charge location model for facilities under imminent attack. *Computers & Operations Research*, 39(7), 1364-1381. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cor.2011.08.006>.
- Badri, H., Bashiri, M., & Hejazi, T. (2013). Integrated strategic and tactical planning in a supply chain network design with a heuristic solution method. *Computers & Operations Research*, 40(4), 1143-1154. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cor.2012.11.005>.
- Beamon, B. M. (1998). Supply chain design and analysis: models and methods. *International Journal of Production Economics*, 55(3), 281-294. [http://dx.doi.org/10.1016/S0925-5273\(98\)00079-6](http://dx.doi.org/10.1016/S0925-5273(98)00079-6).
- Bidhandi, H. M., Mohd Yusuff, R., Megat Ahmad, M. M. H., & Abu Bakar, M. R. (2009). Development of a new approach for deterministic supply chain network design. *European Journal of Operational Research*, 198(1), 121-128. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ejor.2008.07.034>.
- Bräysy, O., & Gendreau, M. (2005). Vehicle routing problem with time Windows, part II: metaheuristics. *Transportation Science*, 39(1), 119-139.
- Chiang, W. C., Russell, R., Xu, X., & Zepeda, D. (2009). A simulation/metaheuristic approach to newspaper production and distribution supply chain problems. *International Journal of Production Economics*, 121(2), 752-767. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijpe.2009.03.001>.
- Colin, E. C. (2007). *Pesquisa operacional: 170 aplicações em estratégia, finanças, logística, produção, marketing e vendas*. Rio de Janeiro: LTC.
- Cordeau, J. F., Laporte, G., & Pasin, F. (2008). An iterated local search heuristic for the logistics network design problem with single assignment. *International Journal of Production Economics*, 113(2), 626-640. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijpe.2007.10.015>.
- Cordeau, J.-F., Pasin, F., & Solomon, M. M. (2006). An integrated model for logistics network design. *Annals of Operations Research*, 144(1), 59-82. <http://dx.doi.org/10.1007/s10479-006-0001-3>.
- Elhedhli, S., & Gzara, F. (2008). Integrated design of supply chain networks with three echelons, multiple commodities and technology selection. *IIE Transactions*, 40(1), 31-44. <http://dx.doi.org/10.1080/07408170701246641>.
- Farias, E. S., & Borenstein, D. (2012). Using mathematical models for the design of the logistic network of a company. In *Proceedings of the 25th Conference of European Chapter on Combinatorial Optimization* (pp. 26-26). Antalya: Institute of Applied Mathematics of Middle East Antalya.
- Gendreau, M., Laporte, G., & Vigo, D. (1999). Heuristics for the traveling salesman problem with pick-up and delivery. *Computers & Operations Research*, 26(7), 699-714. [http://dx.doi.org/10.1016/S0305-0548\(98\)00085-9.<jm>](http://dx.doi.org/10.1016/S0305-0548(98)00085-9.<jm>).
- Geoffrion, A. M. & Graves, G. W. (1974). Multicommodity distribution system design by Benders decomposition. *Management Science*, 20(5), 822-844.
- Glover, F. (1986). Future paths for integer programming and links to Artificial Intelligence. *Computers and Operations Research*, 13, 533-549.
- Glover, F. (1989). Tabu search: part I. *ORSA Journal on Computing*, 1(3), 190-206. <http://dx.doi.org/10.1287/ijoc.1.3.190>.
- Ho, S. (2015). An iterated tabu search heuristic for the single source capacitated facility location problem. *Applied Soft Computing*, 27, 169-178. <http://dx.doi.org/10.1016/j.asoc.2014.11.004>.
- Holmberg, K. A. J., & Hellstrand, J. (1998). Solving the uncapacitated network design problem by a Lagrangean heuristic and branch-and-bound. *Operations Research*, 46(2), 247-259. <http://dx.doi.org/10.1287/opre.46.2.247>.
- Hsu, C. I., & Li, H. C. (2009). An integrated plant capacity and production planning model for high-tech manufacturing firms with economies of scale. *International Journal of Production Economics*, 118(2), 486-500. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijpe.2008.09.015>.
- Javid, A. A., & Azad, N. (2010). Incorporating location, routing and inventory decisions in supply chain network design. *Transportation Research Part E, Logistics and Transportation Review*, 46(5), 582-597. <http://dx.doi.org/10.1016/j.tre.2009.06.005>.
- Jayaraman, V., & Pirkul, H. (2001). Planning and coordination of production and distribution facilities for multiple commodities. *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).
- Kazemi, A., Zarandi, M. H. F., & Husseini, S. M. M. (2008). A multi-agent system to solve the production-distribution planning problem for a supply chain: a genetic algorithm approach. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 44(1-2), 180-193. <http://dx.doi.org/10.1007/s00170-008-1826-5>.
- Keskin, B., & Uster, H. (2007). Meta-heuristic approaches with memory and evolution for a multi-product production/distribution system design problem. *European Journal of Operational Research*, 182(2), 663-682. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ejor.2006.07.034>.
- Kim, D., & Kim, Y. (2010). A branch and bound algorithm for determining locations of long-term care facilities. *European Journal of Operational Research*, 206(1), 168-177. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ejor.2010.02.001>.
- Lee, B., Kang, K., & Lee, Y. (2008). Decomposition heuristic to minimize total cost in a multi-level supply chain network. *Computers & Industrial Engineering*, 54(4), 945-959. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cie.2007.11.005>.
- 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), 3094-3103. <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>.
- Li, J., Chu, F., Prins, C., & Zhu, Z. (2014). Lower and upper bounds for a two-stage capacitated facility location problem with handling costs. *European Journal of Operational Research*, 236(3), 957-967. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ejor.2013.10.047>.
- Melo, M., Nickel, S., & Saldanha-Da-Gama, F. (2009). Facility location and supply chain management: a review. *European Journal of Operational Research*, 196(2), 401-412. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ejor.2008.05.007>.
- Ombuki, B., Ross, B. J., & Hanshar, F. (2006). Multi-objective genetic algorithms for vehicle routing problem with time windows. *Applied Intelligence*, 24(1), 17-30. <http://dx.doi.org/10.1007/s10489-006-6926-z>.
- Pepin, A., Desaulniers, G., Hertz, A., Huisman, D. (2008). A Comparison of five heuristics for the multiple depot vehicle scheduling problem. *Journal of Scheduling*, (12), 17-30.
- 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>.
- Poli, G., & Pureza, V. (2012). Um algoritmo de busca tabu para o carregamento de contêineres com caixas idênticas. *Gestão & Produção*, 19(2), 323-326. <http://dx.doi.org/10.1590/S0104-530X2012000200007>.
- Rahmani, A., & Mirhassani, S. A. (2014). A hybrid firefly-genetic Algorithm for the capacitated facility location problem. *Information Sciences*, 283, 70-78. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ins.2014.06.002>.
- Rezende, A. C., Gasnier, D. G., Carillo, E. Jr. (2002). *Coletânea de artigos de logística*. São Paulo: IMAM.
- Sabri, E. H., & Beamon, B. M. (2000). A multi-objective approach to simultaneous strategic and operational planning in supply chain design. *Omega*, 28(5), 581-598. [http://dx.doi.org/10.1016/S0305-0483\(99\)00080-8](http://dx.doi.org/10.1016/S0305-0483(99)00080-8).
- Shimizu, Y., & Fujikura, T. (2010). A hybrid meta-heuristic approach for integrated capacitated multi-commodity logistics optimization over planning horizon. *Journal of Advanced Mechanical Design, Systems and Manufacturing*, 4(3), 716-727. <http://dx.doi.org/10.1299/jamdsm.4.716>.
- Sun, M. (2012). A tabu search heuristic procedure for the capacitated facility location problem. *Journal of Heuristics*, 18(1), 97-118. <http://dx.doi.org/10.1007/s10732-011-9157-3>.
- Tragantalerngsak, S., Holt, J., & Rönnqvist, M. (1997). Lagrangian heuristics for the two-echelon, single-source, capacitated facility location problem. *European Journal of Operational Research*, 102(3), 611-625. [http://dx.doi.org/10.1016/S0377-2217\(96\)00227-5](http://dx.doi.org/10.1016/S0377-2217(96)00227-5).
- Viana, F., Barros, J., No., & Añez, M. (2014). Gestão da cadeia de suprimentos e vantagem competitiva relacional nas indústrias têxtil e de calçados. *Gestão & Produção*, 21(4), 836-852. <http://dx.doi.org/10.1590/0104-530X1350/14>.
- Visentini, M., & Borenstein, D. (2014). Modelagem do projeto da cadeia de suprimentos global: considerações teóricas e perspectivas futuras. *Gestão & Produção*, 21(2), 369-387. <http://dx.doi.org/10.1590/S0104-530X2014005000008>.
- Wu, L. Y., Zhang, X. S., & Zhang, J. L. (2006). Capacitated facility location problem with general setup cost. *Computers & Operations Research*, 33(5), 1226-1241. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cor.2004.09.012>.
- Yao, Z., Lee, L. H., Jaruphongsa, W., Tan, V., & Hui, C. F. (2010). Multi-source facility location-allocation and inventory problem. *European Journal of Operational Research*, 207(2), 750-762. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ejor.2010.06.006>.
- Zaleta, N. C., & Socorrás, A. M. A. (2004). Tabu Search-based algorithm for capacitated multicommodity network design problem. In *Proceedings of the 14th International Conference on Electronics, Communications and Computers* (pp. 144-148). Veracruz: IEEE.