

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
ESCOLA DE ADMINISTRAÇÃO  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ADMINISTRAÇÃO – PPGA**

**Gabriel Machado Braido**

**OTIMIZAÇÃO DA REDE DE UMA CADEIA DE SUPRIMENTOS COM A  
UTILIZAÇÃO DE UMA HEURÍSTICA BASEADA EM BUSCA TABU**

**Porto Alegre  
2012**

**Gabriel Machado Braido**

**OTIMIZAÇÃO DA REDE DE UMA CADEIA DE SUPRIMENTOS COM A  
UTILIZAÇÃO DE UMA HEURÍSTICA BASEADA EM BUSCA TABU**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Administração da Universidade Federal do Rio Grande do Sul como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Administração.

Orientador: Prof. Dr. Denis Borenstein

**Porto Alegre  
2012**

## CIP - Catalogação na Publicação

Braido, Gabriel Machado

Otimização da rede de uma cadeia de suprimentos com a utilização de uma heurística baseada em Busca Tabu / Gabriel Machado Braido. -- 2012.  
94 f.

Orientador: Denis Borenstein.

Dissertação (Mestrado) -- Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de Administração, Programa de Pós-Graduação em Administração, Porto Alegre, BR-RS, 2012.

1. Otimização de rede de cadeia de suprimentos. 2. Gestão da cadeia de suprimentos. 3. Heurística. 4. Busca Tabu. I. Borenstein, Denis, orient. II. Título.

**Gabriel Machado Braido**

**OTIMIZAÇÃO DA REDE DE UMA CADEIA DE SUPRIMENTOS COM A  
UTILIZAÇÃO DE UMA HEURÍSTICA BASEADA EM BUSCA TABU**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Administração da Universidade Federal do Rio Grande do Sul como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Administração.

Orientador: Prof. Dr. Denis Borenstein

Conceito final: APROVADO

Aprovado em 24 de maio de 2012.

BANCA EXAMINADORA

---

Profa. Dra. Denise Lindstrom Bandeira – PPGA (UFRGS)

---

Profa. Dra. Márcia Jussara Hepp Rehfeldt – PPGECE (UNIVATES)

---

Prof. Dr. Marcus Rolf Peter Ritt – PPGC (UFRGS)

---

Orientador: Prof. Dr. Denis Borenstein – PPGA (UFRGS)

Aos meus pais, Sidney e Rosane, por todo apoio e incentivo ao longo desta caminhada, e ao meu padrinho Marcelo (*in memoriam*), que mesmo em outra dimensão, vem iluminando os meus caminhos.

## AGRADECIMENTOS

Eu tenho certeza que não teria concluído essa caminhada sozinho... Por isso, quero expressar os meus agradecimentos a todas as pessoas que me apoiaram e contribuíram para a realização desse meu grande sonho de ser mestre. Meus mais sinceros agradecimentos:

- A Deus, pela força e luz;

- Aos meus pais, pelo apoio incondicional e compreensão ao longo dessa caminhada. Com certeza são os maiores motivadores pela busca dos meus sonhos.

- Às minhas avós e ao meu avô de coração, pois é um privilégio para poucos poder comemorar essas vitórias junto dessas pessoas tão queridas;

- À Monize e ao Gilmar, que foram muito mais que apenas colegas durante o curso, foram verdadeiros amigos, sempre prontos para motivar e dar forças nas horas mais difíceis. Nossa relação, com certeza, teve uma função multiobjetivo: maximizar a amizade e os conhecimentos e minimizar as dificuldades. Obrigado por tudo, “amadinhos”!

- A todos os colegas do PPGA, em especial aos da área de Sistemas de Informação e Apoio à Decisão, em especial, ao Everton, por gentilmente ceder as instâncias para realização desta pesquisa;

- Aos professores e funcionários do PPGA, em especial ao professor Dr. Denis Borenstein, meu orientador, por ter acreditado em mim e me escolhido para trabalhar com ele. Obrigado pelos ensinamentos compartilhados ao longo do curso;

- Aos professores da banca da proposta de dissertação, Dr. Marcus Rolf Peter Ritt e Dra. Denise Lindstrom Bandeira, pelas excelentes contribuições apresentadas na defesa do trabalho, as quais facilitaram a execução desta pesquisa;

- À professora Dra. Márcia Jussara Hepp Rehfeldt, minha primeira professora de Pesquisa Operacional (em 2009, na Univates), por aceitar o convite para participar da banca de dissertação;

- À professora Dra. Cristina Dai Prá Martens, orientadora de graduação e grande incentivadora na minha busca pelo mestrado;

- Ao CNPq, por financiar os meus estudos;

A todas essas pessoas e às demais que contribuíram com a realização deste trabalho através de uma palavra amiga, uma crítica ou um conselho, o meu muito obrigado!

*“A melhor de todas as coisas é aprender. O dinheiro pode ser perdido ou roubado, a saúde e a força podem falhar, mas o que você dedicou à sua mente é seu para sempre”.*

Louis L. Amour

## RESUMO

O desenho e a gestão de uma cadeia de suprimentos apresentam-se, hoje, como um dos problemas mais importantes e de difícil resolução encontrado pelos gestores. A gestão da cadeia de suprimentos é uma das áreas de maior interesse da Pesquisa Operacional aplicada, buscando determinar a melhor estratégia de produção, transporte e estoque com menor custo e tempo possíveis. Esta dissertação apresenta os resultados de um estudo que objetivou implementar e avaliar uma heurística baseada em Busca Tabu para otimização de uma rede de cadeia de suprimentos. Para tanto, foi utilizada uma modelagem *single-source* proposta por Farias e Borenstein (2012). O problema foi resolvido com uma adaptação do método de Lee e Kwon (2010), buscando por meio de operações de troca de centros de distribuição (CDs) e arcos encontrar a configuração de menor custo para uma rede de cadeia de suprimentos. Foram resolvidas as 22 instâncias propostas por Farias e Borenstein (2012) e os resultados comprovam 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, as soluções obtidas pela heurística apresentaram custos médios 4,98% superiores aos 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 um tempo inferior a 2 minutos de processamento.

**PALAVRAS-CHAVE:** Otimização de rede de cadeia de suprimentos; Gestão da cadeia de suprimentos; Heurística; Busca Tabu.



## ABSTRACT

The design and supply chain management are currently one of the most important and difficult problems encountered by business managers. Supply chain management is one of the most engaging areas in applied Operations Research, which seeks to determine the best strategy regarding production, shipping and storage at the lowest cost and shortest time possible. This thesis shows the results of a research that aimed to implement and evaluate a heuristic based on Tabu Search to optimize a supply chain network. For this purpose, a single-source model proposed by Farias and Borenstein (2012) was used. The problem was solved by adapting the Lee and 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 and Borenstein (2012) were resolved and the results indicate that, for these scenarios, the applied method had a good computational performance, getting results with 81.03% of reduction in 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 to the optimal results. Finally, the problem was solved for four other instances with real features, proving the efficiency of the heuristic for large-scale problems, since all solutions were obtained in a time less than 2 minutes of processing.

**KEY-WORDS:** Supply Chain Network Optimization; Supply Chain Management; Heuristic; Tabu Search.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Algoritmo geral da Busca Tabu.....	35
Figura 2 – Comportamento da lista tabu no início do processo de busca.....	35
Figura 3 – Comportamento da lista tabu totalmente ocupada .....	36
Figura 4 – Modelo de rede de cadeia de suprimentos .....	38
Figura 5 – Modelo Single-Source.....	38
Figura 6 – Heurística para solução do problema.....	42
Figura 7 – Procedimento heurístico para geração da solução inicial .....	43
Figura 8 – Procedimento heurístico para troca de CDs.....	44
Figura 9 – Geração de vizinhança pelo método de troca de CD .....	44
Figura 10 – Procedimento heurístico para troca de arcos.....	45
Figura 11 – Tela de execução da heurística.....	49
Figura 12 – Resultados da instância 1 .....	50
Figura 13 – Resultados da instância 2 .....	51
Figura 14 – Resultados da instância 3 .....	52
Figura 15 – Resultados da instância 4 .....	52
Figura 16 – Resultados da instância 5 .....	53
Figura 17 – Resultados da instância 6 .....	55
Figura 18 – Resultados da instância 7 .....	56
Figura 19 – Resultados da instância 8 .....	57
Figura 20 – Resultados da instância 9 .....	59
Figura 21 – Resultados da instância 10 .....	60
Figura 22 – Resultados da instância 11 .....	60
Figura 23 – Resultados da instância 12 .....	63
Figura 24 – Resultados da instância 13 .....	64
Figura 25 – Resultados da instância 14 .....	64
Figura 26 – Resultados da instância 15 .....	67
Figura 27 – Resultados da instância 16 .....	67
Figura 28 – Resultados da instância 17 .....	68
Figura 29 – Resultados da instância 18 .....	70
Figura 30 – Resultados da instância 19 .....	71
Figura 31 – Resultados da instância 20 .....	71
Figura 32 – Resultados da instância 21 .....	73

<b>Figura 33 – Resultados da instância 22 .....</b>	<b>74</b>
<b>Figura 34 – Resultados da instância com características reais A .....</b>	<b>82</b>
<b>Figura 35 – Resultados da instância com características reais B .....</b>	<b>83</b>
<b>Figura 36 – Resultados da instância com características reais C .....</b>	<b>84</b>
<b>Figura 37 – Resultados da instância com características reais D .....</b>	<b>85</b>

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Tamanho das listas tabu consideradas em cada instância .....	46
Tabela 2 – Configuração da cadeia de suprimentos do cenário 1 .....	50
Tabela 3 – Comparativo entre solução inicial e final no cenário 1 .....	53
Tabela 4 – Comparativo entre a solução ótima e a heurística no cenário 1.....	54
Tabela 5 – Configuração da cadeia de suprimentos do cenário 2.....	55
Tabela 6 – Comparativo entre solução inicial e final no cenário 2 .....	57
Tabela 7 – Comparativo entre a solução ótima e a heurística no cenário 2.....	57
Tabela 8 – Configuração da cadeia de suprimentos do cenário 3.....	59
Tabela 9 – Comparativo entre solução inicial e final no cenário 3 .....	61
Tabela 10 – Comparativo entre a solução ótima e a heurística no cenário 3.....	61
Tabela 11 – Configuração da cadeia de suprimentos do cenário 4 .....	63
Tabela 12 – Comparativo entre solução inicial e final no cenário 4 .....	65
Tabela 13 – Comparativo entre a solução ótima e a heurística no cenário 4.....	65
Tabela 14 – Configuração da cadeia de suprimentos do cenário 5 .....	66
Tabela 15 – Comparativo entre solução inicial e final no cenário 5 .....	68
Tabela 16 – Comparativo entre a solução ótima e a heurística no cenário 5.....	69
Tabela 17 – Configuração da cadeia de suprimentos do cenário 6 .....	70
Tabela 18 – Comparação entre solução inicial e final no cenário 6.....	72
Tabela 19 – Comparativo entre a solução ótima e a heurística no cenário 6.....	72
Tabela 20 – Configuração da cadeia de suprimentos do cenário 7 .....	73
Tabela 21 – Comparação entre solução inicial e final no cenário 7.....	75
Tabela 22 – Comparativo entre a solução ótima e a heurística no cenário 7.....	75
Tabela 23 – Comparativo entre solução inicial e final das 22 instâncias.....	76
Tabela 24 – Comparativo do número de CDs abertos nas 22 instâncias.....	77
Tabela 25 – Comparativo dos valores ótimos e heurísticos das 22 instâncias.	78
Tabela 26 – Comparativo do tempo de execução.....	80
Tabela 27 – Configuração das instâncias com características reais.....	82
Tabela 28 – Tamanho das listas tabu consideradas para cada instância .....	82
Tabela 29 – Comparativo entre solução inicial e final .....	86
Tabela 30 – Tempo de execução das instâncias com características reais .....	86

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Notação do modelo matemático.....	24
Quadro 2 – Variáveis de decisão do modelo .....	24
Quadro 3 – Periódicos de origem e número de artigos .....	29
Quadro 4 – Conjuntos utilizados no modelo .....	39
Quadro 5 – Parâmetros utilizados no modelo .....	39
Quadro 6 – Variáveis de decisão do modelo .....	39

## LISTA DE GRÁFICOS

<b>Gráfico 1 – Valor da função objetivo nas instâncias.....</b>	<b>79</b>
<b>Gráfico 2 – Comparativo do tempo de execução para as instâncias .....</b>	<b>81</b>

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>16</b>
<b>2</b>	<b>REFERENCIAL TEÓRICO.....</b>	<b>20</b>
2.1	PROJETO DE REDE DE CADEIA DE SUPRIMENTOS .....	20
2.2	HEURÍSTICAS E META-HEURÍSTICAS.....	26
2.3	HEURÍSTICAS UTILIZADAS PARA OTIMIZAÇÃO DE REDES DE CADEIA DE SUPRIMENTOS .....	28
2.4	BUSCA TABU .....	34
<b>3</b>	<b>PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS.....</b>	<b>37</b>
3.1	DEFINIÇÃO DO PROBLEMA.....	37
3.2	CONSTRUÇÃO DO MODELO .....	38
3.3	SOLUÇÃO DO MODELO .....	41
<b>3.3.1</b>	<b>Geração de solução inicial .....</b>	<b>42</b>
<b>3.3.2</b>	<b>Geração da vizinhança: decomposição da demanda.....</b>	<b>43</b>
3.3.2.1	Troca de CDs .....	43
3.3.2.2	Troca de arcos .....	45
<b>3.3.3</b>	<b>Procedimento tabu.....</b>	<b>46</b>
<b>3.3.4</b>	<b>Crítérios de parada.....</b>	<b>47</b>
<b>3.3.5</b>	<b>Decomposição de suprimento .....</b>	<b>47</b>
<b>3.3.6</b>	<b>Instâncias resolvidas .....</b>	<b>48</b>
<b>3.3.7</b>	<b>Implementação e execução computacional.....</b>	<b>48</b>
<b>4</b>	<b>APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS .....</b>	<b>49</b>
4.1	CENÁRIO 1 .....	50
4.2	CENÁRIO 2 .....	55
4.3	CENÁRIO 3 .....	58
4.4	CENÁRIO 4 .....	62
4.5	CENÁRIO 5 .....	66
4.6	CENÁRIO 6 .....	69
4.7	CENÁRIO 7 .....	73
4.8	COMPARAÇÃO ENTRE CENÁRIOS.....	76
4.9	INSTÂNCIAS COM CARACTERÍSTICAS REAIS .....	81
<b>5</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>88</b>
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>91</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Uma cadeia de suprimentos consiste em um conjunto de instalações, fornecedores, consumidores, produtos e métodos de gestão de estoques, compras e distribuição, sendo responsável pela ligação entre fornecedores e consumidores, iniciando com a produção da matéria-prima e finalizando com a entrega do produto acabado ao consumidor final (ALTIPARMAK *et al.*, 2006).

O objetivo de uma cadeia de suprimentos, de acordo com Chopra e Meindl (2003), é a maximização do valor global gerado, onde este é a diferença entre o valor final do produto entregue ao cliente e o esforço realizado para atender ao seu pedido, sendo que na maioria das cadeias de suprimento comerciais, o valor está diretamente ligado ao lucro, que pode ser considerado como a diferença entre a receita gerada pelo cliente e o custo total ao longo da cadeia.

O grande desafio da gestão da cadeia de suprimentos está na necessidade de movimentação de produtos e materiais rapidamente e de maneira confiável entre empresa e clientes. Essa movimentação não é linear do fornecedor ao cliente, normalmente ela faz um caminho por diferentes países até chegar ao destino final. Assim, a gestão da cadeia de suprimentos deve administrar de maneira integrada diversas funções empresariais, 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). Altiparmak *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. Como consequência da necessidade de um gerenciamento mais eficiente, técnicas de Pesquisa Operacional (PO) vêm sendo cada vez mais utilizadas na otimização logística a fim de encontrar a melhor solução para a otimização das redes das cadeias de suprimentos. Modelos de localização de instalações, por exemplo, estão sendo gradualmente propostos no contexto da cadeia de suprimentos, permitindo a inclusão da PO em um campo interessante (MELO; NICKEL; SALDANHA-DA-GAMA, 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 (TRAGANTALERNGSAK; HOLT; RÖNNQVIST, 1997). 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 de localização de instalações é designá-las para determinados locais de maneira que a soma dos custos fixos de abertura de novas instalações e os custos variáveis de designar clientes com determinadas demandas às instalações já operantes seja minimizado (TRAGANTALERNGSAK; HOLT; RÖNNQVIST, 1997).

Do ponto de vista prático, o conceito de cadeia de suprimentos surgiu de uma série de mudanças no ambiente produtivo, incluindo o aumento dos custos de produção, redução dos recursos disponíveis, o ciclo de vida mais curto dos produtos e a globalização das economias de mercado (BEAMON, 1998). Ghiani, Laporte e Musmanno (2004) consideram que a globalização tem permitido às empresas aproveitar das vantagens de baixo custo de produção (matéria-prima e mão de obra) em diversos países do mundo, o que acarreta no aumento da capacidade de transportes, na complexidade das redes e, conseqüentemente, nos custos totais de transporte.

O elevado custo do transporte das mercadorias faz com que a gestão de transportes seja considerada um elemento crítico da gestão da cadeia de suprimentos. O gasto das empresas norte-americanas em transporte, em 2004, representou cerca de 63% dos custos logísticos totais (GOLDSBY; CRUM; SUTHERLAND, 2007), enquanto que no Brasil, de acordo com o relatório “Custos Logísticos no Brasil – 2010” apresentado pelo ILOS (Instituto de Logística e *Supply Chain*), as empresas tiveram, em 2009, gastos em transportes correspondentes a 53% do seu custo logístico total.

De forma geral, a estratégia de distribuição é influenciada pelo conjunto de produtos disponibilizados em cada planta, pelo abastecimento de matéria-prima dos fornecedores e pela distribuição de produtos acabados para diferentes regiões através dos centros de distribuição (CDs). Indústrias que desejam ser competitivas e eficientes precisam definir seu projeto logístico considerando os custos associados

nas relações entre os atores da cadeia de suprimentos, bem como otimizar fluxos de produtos e adequar processos que tragam eficiência às operações.

Goldbarg e Luna (2005) sugerem que nos casos onde os modelos se tornam muito complexos, estes sejam solucionados por meio de técnicas não necessariamente exatas, denominadas heurísticas, sacrificando o ideal da perfeição sugerida pela otimização em troca de uma melhoria na eficiência de um processo de busca. Meta-heurísticas, de acordo com Arenales *et al.* (2007), são técnicas que guiam e modificam heurísticas de modo a produzir soluções além daquelas geradas por heurísticas, sendo que cada técnica utiliza diferentes estratégias para explorar o espaço de busca. A otimização combinatória baseada em meta-heurísticas busca soluções aproximadas em tempo polinomial, em vez de soluções exatas de alto custo, sendo adequadas para a resolução de problemas complexos (OMBUKI; ROSS; HANSHAR, 2006).

Dentre as meta-heurísticas, destaca-se a Busca Tabu, que vem sendo utilizada para resolução de problemas complexos, como o de otimização de redes de cadeias de suprimento (KESKIN; USTER, 2007). A Busca Tabu é um procedimento que utiliza uma solução inicial como ponto de partida para a busca de soluções melhoradas em diferentes regiões do espaço de soluções (MONTANÉ; GALVAO, 2006). Essa técnica utiliza a exploração estratégica e memória flexível como guia na busca em um espaço de soluções (ARENALES *et al.*, 2007). Conforme esses autores, por meio da exploração estratégica, determina-se a direção da busca baseada nas propriedades da solução corrente e no seu histórico. A memória tem estruturas de curto e longo prazo, sendo que a primeira armazena atributos de soluções recentemente visitadas e, assim, impede que estas sejam revisitadas, evitando a formação de ciclos e direcionando a busca para outras regiões ainda não exploradas, enquanto que a segunda contém uma história seletiva de soluções e atributos, sendo utilizada para estimular a geração de soluções com as mesmas características presentes nas soluções de boa qualidade e com características pouco exploradas (ARENALES *et al.*, 2007).

Krajewska e Kopfer (2009) consideram que uma vantagem da Busca Tabu é que boas soluções podem ser obtidas em um tempo consideravelmente reduzido. Colin (2007) revela que mesmo sendo uma técnica relativamente nova, os resultados obtidos em problemas complexos ao utilizá-la são extremamente

promissores na maioria das vezes, porém não há provas matemáticas sobre as características de convergência desta ao ótimo global.

Considerando a necessidade de redução dos custos logísticos e a complexidade de problemas com instâncias reais, o objetivo desta dissertação consistiu em **implementar e avaliar uma heurística baseada em Busca Tabu para otimização de uma rede de cadeia de suprimentos.**

Para alcançar o objetivo geral proposto, foram definidos os seguintes objetivos específicos para o estudo:

- a) implementar uma heurística baseada em Busca Tabu para solução do problema;
- b) resolver o problema com as mesmas instâncias propostas por Farias e Borenstein (2012);
- c) comparar e avaliar os resultados obtidos pela heurística com os valores ótimos de Farias e Borenstein (2012);
- d) resolver o problema para instâncias com características reais.

A fim de descrever o problema em maiores detalhes, apresentar o método utilizado para a sua solução e os resultados obtidos, esta dissertação está estruturada em cinco capítulos. Neste capítulo introdutório considerou-se o contexto, justificativa e objetivos do estudo. O segundo capítulo consiste na revisão da literatura, conceituando o projeto de cadeia de suprimentos, heurísticas, meta-heurísticas, estudos que desenvolveram heurísticas para solução do problema e a meta-heurística Busca Tabu. O terceiro capítulo aborda os procedimentos metodológicos adotados na pesquisa, detalhando o problema resolvido e a heurística utilizada para sua solução. No quarto capítulo são apresentados e discutidos os resultados da pesquisa e, finalizando, o quinto capítulo compreende as considerações finais da pesquisa.

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

Neste capítulo será apresentada a fundamentação teórica utilizada nesta dissertação, compreendendo o projeto de rede de cadeia de suprimentos, conceitos de heurísticas e meta-heurísticas, algumas pesquisas que desenvolveram heurísticas para solução do problema de projeto de rede de cadeia de suprimento e a meta-heurística Busca Tabu.

### 2.1 PROJETO DE REDE DE CADEIA DE SUPRIMENTOS

Nos últimos anos, as cadeias de fornecimento intraempresas têm crescido significativamente, abrangendo produção e os locais de distribuição em todo o mundo. Ao mesmo tempo, a concorrência global tem aumentado, de modo que há uma forte demanda por novas ferramentas de apoio à decisão nos níveis estratégico, tático e operacional (ALMEDER; PREUSSER; HARTL, 2008). Mesmo as pequenas e médias empresas devem estar cientes de que o seu sucesso futuro depende das decisões de localização e distribuição subjacentes à sua cadeia logística (BELENGUER *et al.*, 2011).

Ballou (2006) considera que a gestão da cadeia de suprimentos preocupa-se com os fluxos externos à empresa, visando à coordenação e ao controle de materiais, informações e finanças desde o fornecedor até o consumidor, passando por fabricantes, atacadistas e varejistas. Com planejamento, organização e controle efetivo de atividades corporativas, a logística visa a prover um melhor nível de serviço, reduzindo custos operacionais e contribuindo com a prosperidade do negócio (BOWERSOX; CLOSS; COOPER, 2006).

A otimização da cadeia de suprimentos é fundamental para o sucesso do negócio diante da crescente concorrência global, das rápidas mudanças no mercado e do ciclo de vida cada vez mais curto dos produtos; assim, um projeto eficiente de uma cadeia significa uma melhor localização das instalações de produção e distribuição, bem como uma melhor capacidade tecnológica e de planejamento, facilitando o acesso aos mercados consumidores e auxiliando na tomada de decisões em níveis tático e operacional (ELHEDHLI; GZARA, 2008).

Calvete, Galé e Oliveros (2011) classificam as cadeias de suprimentos como sistemas complexos, que exigem decisões em várias etapas, as quais incluem a

localização de fábricas ou armazéns, a aquisição de matérias-primas, o processo de produção, controle de estoque, entregas de mercadorias, entre outras. Cordeau, Laporte e Pasin (2008) consideram, ainda, em um projeto de rede de cadeia de suprimentos, o fluxo de matérias-primas e de produtos acabados ao longo da cadeia, de modo a satisfazer a demanda do cliente, minimizando a soma dos custos fixos e variáveis associados aos contratos, habitação, produção, conservação e transporte.

Para Shen (2005), a gestão de uma cadeia de suprimentos é um dos problemas mais importantes e de difícil resolução encontrado pelos gestores. Reville, Marks e Liebman (1970) já destacavam que a resolução de problemas para definição de redes de cadeia de suprimento correspondia a uma importante linha de pesquisa. A gestão da cadeia de suprimentos é uma das principais áreas de interesse de pesquisa na pesquisa operacional aplicada, tendo como objetivo fundamental determinar a melhor estratégia de produção, transporte e estoque com o menor tempo e custo possíveis (GOLMOHAMMADI *et al.*, 2010).

Entre as principais preocupações da gestão da cadeia de suprimentos, Lee e Kim (2002) destacam o planejamento da produção-distribuição, que deve ser resolvido dentro de uma estrutura integrada. Um projeto de rede da cadeia de suprimentos envolve frequentemente decisões adicionais sobre aquisição de tecnologias, seleção de modais de transporte ou níveis de estoque e, em modelos de redes multinacionais, também deve-se considerar fatores como taxas de câmbio, preços de transferência e impostos (CORDEAU; LAPORTE; PASIN, 2008). Melo, Nickel e Saldanha-da-Gama (2009) consideram, ainda, as decisões de *layout* de armazéns e a gestão e roteamento de veículos. Em suma, um problema de projeto de rede da cadeia de suprimentos pode ser definido como um conjunto de potenciais fornecedores, fábricas potenciais com capacidades de produção e localizações variadas, centros de distribuição com várias configurações possíveis e clientes com demandas determinísticas (GOETSCHALCKX; VIDAL; DOGAN, 2002).

No que se refere aos custos de produção, Hsu e Li (2009) destacam que em uma fábrica, esses dependem principalmente da utilização da capacidade instalada de todas as plantas, ou seja, da capacidade de produção e atribuição de produção entre as plantas, sendo que a demanda do mercado é quem regula o montante total da produção.

Aos armazéns cabe o recebimento de mercadorias, armazenamento, separação de pedidos e envio aos clientes (GHIANI; LAPORTE; MUSMANNO, 2004). Estes autores ainda ressaltam a importância da determinação de uma estratégia de armazenamento, podendo ser centralizada (um único armazém servindo todo o mercado) ou descentralizada (o mercado é dividido em várias zonas de demanda, sendo cada uma atendida por um armazém diferente).

A distribuição e o processo logístico determinam como os produtos são recuperados e transportados a partir da fábrica ou do CD ao cliente, sendo este processo responsável pela gestão de estoques, transporte e entrega do produto final (BEAMON, 1998). Lee e Kwon (2010) destacam que como a demanda dos clientes é dinâmica, a operação de um centro de distribuição pode desempenhar um papel importante no sucesso das operações.

A concepção de um sistema de distribuição eficaz e eficiente torna-se uma questão estratégica para muitas indústrias, haja vista que os custos logísticos representam uma fração importante das despesas empresariais (BELENGUER *et al.*, 2011). Tan *et al.* (2001) consideram que uma boa gestão de transportes garante uma economia considerável de custos de distribuição a uma empresa, podendo ser a redução do custo de transporte por caminhão, devido ao conhecimento das rotas com distâncias mais curtas, por exemplo.

Lee e Kim (2002) destacam que para a implementação da gestão da cadeia de suprimentos no mundo real, as cadeias devem ser modeladas de forma analítica, utilizando métodos determinísticos ou estocásticos; no entanto, a maioria dos problemas do mundo real não são simples de serem modelados através de abordagens analíticas, pois a integração da produção e distribuição no modelo pode ocasionar uma larga variedade de comportamentos dinâmicos.

Cordeau, Laporte e Pasin (2008) relatam que após o trabalho pioneiro de projeto de rede de distribuição de *multi-commodities* de Geoffrion e Graves (1974) um grande número de modelos tem sido proposto para localização de instalações, incorporando recursos naturais, produção e aspectos de transporte. Assim, um projeto de rede da cadeia de suprimentos pode ser visto como uma generalização do problema clássico de localização de instalações capacitadas, considerando múltiplos estágios (ou escalões) ligados entre si por fluxos de produtos (CORDEAU; LAPORTE; PASIN, 2008).

O problema de localização de instalações é um clássico da otimização combinatória para determinar o número e a localização de um conjunto de instalações (armazéns, CDs, fábricas, máquinas, etc.) e alocação de clientes, de tal forma que o custo total da rede seja minimizado (WU; ZHANG; ZHANG, 2006). Esse problema, de acordo com Yao *et al.* (2010), tem uma história relativamente longa, iniciando com o estudo de Cooper (1963), o qual apresenta um problema de localização de armazéns e distribuição a clientes, dadas as demandas locais e das zonas de consumo.

O problema de localização de instalações aborda dois tipos de custos: o de abertura (quando uma instalação é aberta) e o de ligação (quando um cliente é alocado à instalação aberta). Assim, ao apurar os custos totais de uma instalação, deve-se considerar os custos fixos de sua abertura e os custos de transporte associados ao envio dos produtos desta aos clientes (WU; ZHANG; ZHANG, 2006). Esses autores ainda destacam que o problema possui duas variações: se um número arbitrário de clientes pode ser conectado a uma instalação, o problema é de localização de instalações não capacitadas (do inglês, *uncapacitated facility location problem*); se cada unidade tem uma capacidade de atendimento, torna-se um problema de localização de instalações capacitadas (do inglês, *capacitated facility location problem*), sendo ambos problemas de dificuldade NP-difícil e extensivamente estudados, para os quais diversos algoritmos exatos e heurísticos vem sendo desenvolvidos nas últimas décadas (WU; ZHANG; ZHANG, 2006).

Um projeto de rede de cadeia de suprimentos inicia com a seleção de locais potenciais para a instalação de facilidades e a capacidade necessária de cada instalação. Melo, Nickel e Saldanha-da-Gama (2009) destacam que a abertura de novas plantas produtivas requer um grande investimento e, assim, espera-se que estas operem por um longo tempo. A localização das plantas tem efeito a longo prazo sobre o funcionamento da cadeia de suprimentos, sendo essa uma das decisões estratégicas mais importantes em um projeto logístico (ZHU; CHU; SUN, 2010).

Os modelos de localização de instalações estão no cerne da concepção estratégica de uma cadeia de suprimentos, e sua importância é corroborada através de uma quantidade substancial de pesquisas sobre modelos de localização que vem sendo desenvolvidas na última década, o que tem acarretado no surgimento de diversos modelos, desde os mais simples de localização de instalações não

capacitadas até os mais complexos, englobando multiestágios, *multi-commodities* e plantas capacitadas (ELHEDHLI; GZARA, 2008).

Kazemi, Zarandi e Husseini (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 simples para um único produto até os modelos mais complexos, não lineares ou estocásticos.

Jayaraman e Pirkul (2001) propuseram um modelo que trabalha com três estruturas de custo: custos fixos e variáveis da operação das fábricas, fixos e variáveis relativos ao transporte de matérias-primas dos fornecedores às fábricas e custos fixos e variáveis de distribuição dos produtos acabados das fábricas aos clientes, através dos armazéns. A notação utilizada no modelo é ilustrada no Quadro 1.

**Quadro 1 – Notação do modelo matemático**

$I$	conjunto de zonas de consumo;
$J$	conjunto de centros de distribuição;
$K$	conjunto de fábricas (plantas);
$L$	conjunto de grupos de produtos;
$R$	conjunto de matérias-primas;
$V$	conjunto de fornecedores;
$o_j$	custo fixo anual de operação do centro de distribuição $j$ ;
$g_k$	custo fixo anual para operar a fábrica $k$ ;
$v_j$	custo unitário de transferência do centro de distribuição $j$ ;
$v_{lk}$	custo unitário de produção do produto $l$ na fábrica $k$ ;
$t_{vkr}$	custo unitário de transporte e compra da matéria-prima $r$ a partir do fornecedor $v$ para a fábrica $k$ ;
$c_{ijkl}$	custo unitário de transporte do produto $l$ da fábrica $k$ através do centro de distribuição $j$ para a zona de consumo $i$ ;
$a_{il}$	demanda do produto $l$ para a zona de consumo $i$ ;
$W_j$	processamento anual do centro de distribuição $j$ ;
$D_k$	capacidade de produção da fábrica $k$ ;
$SUP_{vr}$	capacidade de fornecimento do fornecedor $v$ da matéria-prima $r$ ;
$u_{rl}$	taxa de utilização da matéria-prima $r$ por produto $l$ ;
$s_l$	taxa de utilização da capacidade por unidade do produto $l$ ;
$W$	número máximo de armazéns em operação;
$P$	número máximo de fábricas em operação.

Fonte: adaptado de Jayaraman e Pirkul (2001)

As variáveis de decisão utilizadas no modelo são apresentadas no Quadro 2.

**Quadro 2 – Variáveis de decisão do modelo**

$z_j$	variável binária, sendo: 1 se o CD $j$ está aberto; 0 caso contrário;
$p_k$	variável binária, sendo: 1 se a fábrica $k$ está aberta; 0 caso contrário
$y_{ij}$	variável binária, sendo: 1 se o armazém $j$ serve a zona de consumo $i$ ; 0 caso contrário;
$b_{vkr}$	quantidade de matéria-prima $r$ transportada do fornecedor $v$ para a fábrica $k$ ;
$x_{lk}$	quantidade de do produto $l$ produzido na fábrica $k$ ;
$q_{ijkl}$	quantidade de do produto $l$ transportado da fábrica $k$ que passa pelo centro de distribuição $j$ para a zona de consumo $i$ .

Fonte: adaptado de Jayaraman e Pirkul (2001)



A formulação do modelo matemático é a seguinte:

$$\begin{aligned} \min \sum_j o_j + \sum_i \sum_j \sum_l v_j a_{il} y_{ij} + \sum_k g_k p_k + \sum_l \sum_k v_{lk} x_{lk} + \sum_v \sum_k \sum_r t_{vkr} b_{vrk} \\ + \sum_i \sum_j \sum_k \sum_l c_{ijkl} q_{ijkl} \end{aligned} \quad (1)$$

Sujeito a:

$$\sum_j y_{ij} = 1 \quad \forall i \quad (2)$$

$$\sum_i \sum_j a_{il} y_{ij} \leq W_j z_j \quad \forall j, l \quad (3)$$

$$\sum_j z_j \leq W \quad (4)$$

$$\sum_k q_{ijkl} = a_{il} y_{ij} \quad \forall i, j, l \quad (5)$$

$$\sum_k b_{vkr} \leq \text{SUP}_{vr} \quad \forall v, r \quad (6)$$

$$\sum_l u_{rl} x_{lk} \leq \sum_k b_{vkr} \quad \forall r, k, v \quad (7)$$

$$\sum_l s_l x_{lk} \leq \sum_k D_k p_k \quad \forall k \quad (8)$$

$$\sum_i \sum_j q_{ijkl} \leq x_{lk} \quad \forall l, k \quad (9)$$

$$\sum_k p_k \leq P \quad (10)$$

$$z_j \in \{0,1\} \quad \forall j \quad (11)$$

$$p_k \in \{0,1\} \quad \forall k \quad (12)$$

$$y_{ij} \in \{0,1\} \quad \forall i, \quad (13)$$

$$b_{vkr} \geq 0 \quad \forall v, k, r \quad (14)$$

$$x_{lk} \geq 0 \quad \forall k, l \quad (15)$$

$$q_{ijkl} \geq 0 \quad \forall i, j, k, l \quad (16)$$

A função objetivo (1) busca minimizar o custo total da cadeia de suprimentos, considerando o custo fixo de operação e abertura de fábricas e centros de distribuição, o custo variável de produção e distribuição, custo de transporte de matérias-primas dos fornecedores às fábricas e dos produtos acabados a partir das fábricas até os clientes, passando pelos armazéns.

A restrição (2) impõe que cada cliente deve ser atendido por um único armazém, enquanto a (3) limita o volume de processamento anual de cada armazém. A restrição (4) estabelece o número máximo de armazéns que podem ser abertos. Em (5) são consideradas as demandas de cada cliente para cada produto. A restrição (6) aborda as condições de fornecimento de matérias-primas, enquanto as necessidades de matérias-primas são representadas em (7). A capacidade de produção de cada fábrica é estabelecida na restrição (8). A restrição (9) garante que o total de produtos enviados de uma fábrica a uma zona de consumo não excederá o seu limite de produção. Em (10) é limitado o número de fábricas abertas. As restrições (11), (12) e (13) estabelecem a integralidade das variáveis de decisão  $z_j$ ,  $p_k$  e  $y_{ij}$ . As restrições (14), (15) e (16) garantem a não negatividade das variáveis  $b_{vkr}$ ,  $x_{lk}$  e  $q_{ijkl}$ .

Apresentado o problema do projeto de rede de cadeia de suprimentos, na próxima seção discorre-se sobre heurísticas e meta-heurísticas.

## 2.2 HEURÍSTICAS E META-HEURÍSTICAS

Nos últimos anos tem se observado o surgimento de um significativo conjunto de técnicas e algoritmos computacionalmente eficientes, mas que não garantem a solução ótima de um problema de programação linear inteira, sendo estes denominados heurísticos ou aproximativos (GOLDBARG; LUNA, 2005). De acordo com esses autores, a palavra “heurística” é derivada do grego *heuriskein*, que significa descobrir ou achar, porém o significado na PO vai mais além de sua raiz etimológica, sendo definido da seguinte forma:

Uma heurística é uma técnica que busca alcançar uma boa solução utilizando um esforço computacional considerado razoável, sendo capaz de garantir a viabilidade ou a otimalidade da solução encontrada ou, ainda, em muitos casos, ambas, especialmente nas ocasiões em que essa busca partir de uma solução viável próxima ao ótimo (GOLDBARG; LUNA, 2005, p. 196).

Arenales *et al.* (2007) consideram que várias são as situações que podem tornar interessante a utilização de heurísticas para resolução de um problema, entre elas, as em que um método de resolução exato não está disponível ou exige um tempo computacional ou quantidade de memória além dos recursos do computador disponível; situações em que pode não valer a pena o esforço e/ou custo envolvidos

na busca de uma solução ótima, visto que não representará um ganho relevante em relação à solução heurística; e situações onde a heurística é utilizada em conjunto com um método exato.

Quanto às vantagens das heurísticas em relação aos métodos exatos, Arenales *et al.* (2007) destacam uma maior flexibilidade no tratamento das características de um problema, principalmente quando são difíceis de ser incorporadas em um modelo de otimização matemática; e a possibilidade de uma heurística oferecer mais de uma solução, permitindo a ampliação das possibilidades de decisão, principalmente em situações onde fatores intangíveis não podem ser agregados aos modelos, mas precisam ser considerados. No que se refere às desvantagens, os autores consideram o fato de a heurística não garantir o encontro de uma solução viável ou ótima e, em geral, não ser possível conhecer a qualidade da solução encontrada (sua proximidade da solução ótima).

Muitos estudos realizados na área de PO têm desenvolvido novos algoritmos e sua validação compete com outros métodos através do *benchmarking* de problemas. As aplicações mais simples obtêm resultados mais facilmente, porém, com o aumento considerável do problema para instâncias reais, sua dificuldade também aumenta, tornando praticamente impossível a sua solução exata por meio de qualquer *software* disponível (SHIMIZU; FUJIKURA, 2010).

A otimização combinatória baseada em meta-heurísticas busca soluções aproximadas em tempo polinomial, em vez de soluções exatas de alto custo, sendo adequadas para a resolução de problemas complexos (OMBUKI; ROSS; HANSHAR, 2006).

Quanto à avaliação de heurísticas, Bräysy e Gendreau (2005) consideram que ela está sujeita à comparação de uma série de critérios que se relacionam com vários aspectos do desempenho do algoritmo, podendo ser o tempo de execução, qualidade da solução encontrada, facilidade da implementação, robustez e flexibilidade. O tempo que uma heurística leva para produzir boas soluções pode ser crucial na escolha entre diferentes técnicas, da mesma forma que a qualidade da solução final, mensurada pelo resultado da função objetivo (BRAYSY; GENDREAU, 2005). Esses autores ainda complementam que o quanto uma solução final se aproxima do resultado ótimo é uma medida padrão de qualidade e geralmente há um conflito entre o tempo de execução de uma heurística e a qualidade da solução encontrada, pois quanto maior o tempo, melhor a qualidade da solução final; assim,

é desejável que uma heurística produza soluções de boa qualidade em um tempo de execução razoável.

Zaleta e Socorrás (2004) consideram que o objetivo do problema de desenho da cadeia de suprimento está em encontrar a melhor configuração de rede que satisfaça a todos os conjuntos de restrições, tendo o problema recebido muita atenção de pesquisadores devido à sua relevância em múltiplas aplicações. Os autores destacam que não existe um algoritmo capaz de resolver na otimalidade o problema para grandes instâncias, comum em diversas aplicações, em um período de tempo razoável; no entanto, procedimentos heurísticos podem ser utilizados quando uma solução ótima não pode ser encontrada, garantindo a obtenção de uma solução com qualidade aceitável.

Lee e 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 de possíveis instalações, milhares de clientes e dezenas de plantas ainda é muito pesado. Para os autores, na prática, as decisões sobre operação de centros de distribuição são avaliadas em muitos cenários com muitos tipos de dados possíveis para se chegar a uma solução aceitável, sendo desejável que o tempo computacional não exceda 30 minutos.

Destacada a importância do desenvolvimento de heurísticas para otimização de cadeias de suprimento, apresentam-se na próxima seção alguns estudos que abordaram essa temática.

### 2.3 HEURÍSTICAS UTILIZADAS PARA OTIMIZAÇÃO DE REDES DE CADEIA DE SUPRIMENTOS

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

O Quadro 3 ilustra os periódicos onde os estudos analisados nesta seção foram publicados e quantidade de artigos provenientes de cada um.

**Quadro 3 – Periódicos de origem e número de artigos**

Periódico	Nº de artigos
Computers & Industrial Engineering	3
European Journal of Operational Research	3
International Journal of Production Economics	2
Annals of Operations Research	1
Computers & Operations Research	1
Expert Systems with Applications	1
Journal of Advanced Mechanical Design, Systems and Manufacturing	1
Operations Research	1
OR Spectrum	1
Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review	1
Transportation Science	1

Fonte: do autor.

Pirkul e Jayaraman (1996) desenvolveram um modelo de programação inteira mista para localização de fábricas e CDs com o objetivo de minimizar os custos de uma cadeia de suprimentos *multi-commodity*, onde cada consumidor só pode ser atendido por um CD (*single-source*). Para a solução matemática do modelo, os autores aplicaram técnicas de relaxamento lagrangeano e uma heurística, que possibilitaram bom desempenho em termos de proximidade da solução ótima e tempo de execução do algoritmo.

Holmberg e Hellstrand (1998) apresentaram uma heurística lagrangeana inserida em uma estrutura *branch-and-bound* como método para solução exata ótima de um problema de desenho da rede de uma cadeia de suprimentos multimodal com instalações não capacitadas. Embora o problema seja o mais simples da classe, os autores destacam que mesmo assim é classificado como NP-Difícil, e o método heurístico proposto apresentou-se eficiente, tendo sido aplicado em problemas de diversos tamanhos e superado resultados da literatura em tempo de solução e tamanho do problema.

Jayaraman e Pirkul (2001) propuseram um modelo de programação inteira mista para minimização de custos sujeitos às restrições de fornecimento de matérias-primas e capacidade das fábricas e dos centros de distribuição para atender às demandas de zonas de consumo, englobando três grandes estruturas de custos: custos de produção (fixos e variáveis de operação das fábricas), custos fixos e variáveis relativos ao transporte de matérias-primas dos fornecedores às fábricas, e custos fixos e variáveis de distribuição dos produtos acabados a partir das fábricas para as zonas de consumo através dos CDs. Nesse modelo, as zonas de consumo recebem produtos de um único centro de distribuição, sendo caracterizado como *single-source*. Um procedimento heurístico que utiliza soluções geradas a partir de

uma relaxação Lagrangeana foi proposto pelos autores, tendo seu desempenho avaliado quanto à qualidade da solução encontrada e performance do algoritmo. Analisando várias instâncias, o algoritmo foi capaz de gerar soluções bem próximas aos resultados ótimos em baixo tempo computacional (JAYARAMAN; PIRKUL, 2001).

Jang *et al.* (2002) abordaram uma rede de suprimento com uma estrutura de produtos global composta por quatro módulos: otimização do desenho da cadeia de suprimentos, planejamento para produção e distribuição (desde os fornecedores de matérias-primas até as zonas de consumo), gerenciamento do modelo e gerenciamento dos dados. Os dois primeiros módulos foram resolvidos por uma heurística Lagrangeana e algoritmos genéticos, respectivamente. Os módulos de gerenciamento do modelo e dos dados foram desenvolvidos para auxiliar os gestores na difícil tarefa de lidar com dados e modelos matemáticos. Os resultados obtidos apontam que uma rede de suprimentos com essas características pode ser otimizada com a adoção das estratégias e algoritmos propostos.

Altıparmak *et al.* (2006) propuseram uma abordagem heurística baseada em algoritmos genéticos para encontrar um conjunto de melhores soluções possíveis para otimização de um projeto da rede de cadeia de suprimentos multiobjetivo. O estudo dos autores foi realizado com a utilização de dados reais de uma empresa produtora de plásticos na Turquia, onde foi comparado o número de soluções Pareto-ótimas obtidas, e sua qualidade, através de algoritmos genéticos com uma abordagem utilizando *Simulated Annealing*, concluindo que o método baseado em algoritmos genéticos mostrou-se mais eficiente.

Cordeau, Pasin e Solomon (2006) apresentaram uma formulação flexível para o problema do projeto de rede logística em um contexto determinístico, em um único país e para um único período, integrando decisões de localização e capacidades de plantas e armazéns com seleção de fornecedores e transporte, bem como atribuição de linhas e fluxos de produtos. Para solucionar o problema, os autores utilizaram duas abordagens, sendo uma baseada em *branch-and-bound* e a outra no método de decomposição de Benders, concluindo que a segunda abordagem apresenta pequena vantagem em problemas mais difíceis.

Cordeau, Laporte e Pasin (2008) trabalharam com um projeto de rede logística com decisões relacionadas à seleção de fornecedores, localização de fábricas e armazéns, atribuição de atividades para estas instalações e os fluxos de

matérias-primas e produtos acabados na rede. Para solução do problema, os autores desenvolveram uma heurística denominada *Iterated Local Search (ILS)*, buscando explorar a natureza combinatória do problema com base em movimentos simples, combinados dentro de um algoritmo de descida, sendo que vários operadores de perturbação foram utilizados para obter uma exploração ampla do espaço de solução. O desempenho do algoritmo foi verificado com instâncias geradas aleatoriamente e as soluções foram avaliadas mediante comparação com os limites inferiores obtidos por meio da relaxação do problema.

Um problema de planejamento de distribuição para uma rede de cadeia de suprimentos multinível, onde produtos são fabricados nas plantas e entregues aos clientes através de armazéns e centros de distribuição, foi considerado por Lee, Kang e Lee (2008). Os autores propuseram um modelo de programação inteira mista com o objetivo de minimizar os custos de logística, tais como custos de reposição, manutenção de estoque e transporte. Para solução prática, foi utilizada uma heurística composta por duas etapas: uma primeira, de decomposição, que busca solucionar o problema na otimalidade considerando apenas as rotas de transporte obtidas inicialmente pelo fluxo de custo mínimo, sendo o plano de abastecimento gerado pela aplicação de heurística de redução de custos na linha de produção, montagem e planejamento de transporte; a segunda heurística divide o modelo em períodos de tempo e resolve para um horizonte de tempo móvel. Um método de busca pós-melhoria baseado em Busca Tabu foi utilizado e o desempenho avaliado, constatando que as soluções puderam ser obtidas em um tempo computacional razoável e apresentaram um *gap* de cerca de 10% a partir do limite inferior das soluções ótimas (LEE; KANG; LEE, 2008).

Li, Chu e Prins (2009) abordaram o problema de localização de plantas capacitadas incorporado ao problema de fluxo *multi-commodities*, englobando a localização das fábricas com capacidade, respeitando as restrições de capacidade de cada fábrica e o atendimento da demanda de cada consumidor. Para solução, foi desenvolvido um método que inclui uma relaxação e heurística Lagrangeana e otimização subgradiente para obtenção dos limites inferiores e superiores do modelo e, então, foi empregada uma Busca Tabu para melhorar ainda mais os limites obtidos pela abordagem Lagrangeana. Os resultados computacionais demonstram que o método proposto é efetivo, visto que a diferença entre os limites superiores e inferiores ficou em média de 2%.

Amrani *et al.* (2009) abordaram uma extensão *multi-commodity* em dois estágios do problema de localização de instalações capacitadas com *single-source*, considerando transferências diretas das unidades produtivas, configurações alternativas de instalações e custos de armazenamento. Os autores formularam um modelo de programação inteira mista e apresentaram uma solução heurística baseada em um método de busca na vizinhança integrado a um procedimento tabu. Os experimentos foram realizados com características reais, comparando o desempenho da heurística com os resultados obtidos pela otimização no *software* CPLEX. As maiores instâncias consideradas não puderam ser resolvidas com o CPLEX, mas foram solucionadas em um tempo razoável com a heurística proposta, o que indica que essa abordagem é promissora para resolução de problemas de projeto de rede de cadeias de suprimento complexas (AMRANI *et al.*, 2009).

Bidhandi *et al.* (2009) propõem um modelo de programação linear inteira mista para solução de um problema de projeto de rede de uma cadeia de suprimentos *multi-commodities* em um único período. O modelo integra decisões de localização e capacidade dos fornecedores, seleção de plantas e armazéns, atribuição de linhas de produtos e fluxos de produção, sendo que as decisões sobre abrir ou não instalações são variáveis binárias, enquanto o fluxo de produção e transporte são variáveis de decisão contínuas. Para resolução do modelo, os autores aplicaram uma versão modificada da Decomposição de Benders, capaz de gerar uma solução inicial quase ótima, buscando reduzir o número de iterações.

Hsu e Li (2009) desenvolveram um modelo de programação não linear inteira mista para determinar o projeto da rede de abastecimento da cadeia de uma empresa de alta tecnologia, buscando explorar os impactos das economias de escala decorrentes da utilização da capacidade ideal e da quantidade de produção de cada facilidade. Para solução, os autores utilizaram uma abordagem heurística baseada em *Simulated Annealing* e os resultados obtidos mostraram que ao invés de operar várias plantas de pouca capacidade produtiva é mais rentável a abertura de poucas plantas de grande capacidade produtiva e menor utilização, quando a demanda dos clientes for suficientemente grande para compensar o alto custo de capital despendido (HSU; LI, 2009).

Javid e Azad (2010) apresentaram um modelo para otimização simultânea da localização, alocação, capacidades, estoques e roteamento em uma cadeia de suprimentos estocástica, onde cada cliente possui uma demanda incerta,



determinada por meio de uma distribuição normal e cada CD possui determinada quantidade de estoque de segurança. Para resolução do problema os autores utilizaram um método heurístico baseado em Busca Tabu e *Simulated Annealing* e os resultados mostram que a heurística proposta é consideravelmente efetiva e eficaz para diversos tamanhos de problemas.

Yao *et al.* (2010) consideraram um problema de locação-alocação de instalações e estoques, que permite a utilização de múltiplas fontes de armazéns. Múltiplos produtos são produzidos em diversas fábricas e os armazéns podem ser abastecidos por diversas fábricas devido às suas capacidades. A demanda dos clientes é estocástica e um estoque de segurança deve ser mantido para garantir determinado nível de serviço ao cliente. O problema consistiu na determinação do número e localização de armazéns, alocação das demandas dos clientes e determinação do nível de estoque de cada armazém. Para tanto, foi formulado um modelo de programação inteira não linear mista e, para sua solução, os autores desenvolveram um método heurístico iterativo com a utilização de técnicas de aproximação e transformação. Os resultados demonstraram que o método proposto possui um bom desempenho quando comparado com o limite inferior do problema.

Associado à otimização estratégica de um projeto de rede logística para melhorar a eficiência de uma cadeia de suprimentos, Shimizu e Fujikura (2010) propuseram um método denominado Busca Tabu Híbrida, o qual foi aplicado a vários problemas reais mediante imposição de condições práticas no modelo básico de acordo com cada situação. Os autores consideram que, devido à popularidade prática de problemas de *multi-commodities*, as decisões podem se tornar mais confiáveis e operacionais dentro de circunstâncias dinâmicas; portanto, o modelo foi estendido para lidar com esses aspectos que têm sido pouco considerados. Os experimentos revelaram a importância da gestão dos estoques no horizonte de planejamento e o método de solução proposto foi validado através da comparação com os resultados obtidos no CPLEX, mostrando-se promissor para solução de problemas reais, visto que os resultados são obtidos em tempos mais curtos de processamento e com a mesma qualidade (SHIMIZU; FUJIKURA, 2010).

Um problema de localização de instalações e o plano de distribuição em uma cadeia de suprimentos sob a restrição de *single-source* foi estudado por Lee e Kwon (2010). Buscando minimizar a soma de transporte, a configuração das instalações e o transporte de produtos, os autores propuseram um modelo de programação inteira

mista e, para efeitos de execução mais prática, decompueram o problema e resolveram-no por meio de uma abordagem heurística baseada em Busca Tabu, utilizando como regra de prioridade um índice de custos. O desempenho da heurística foi avaliado mediante comparação com as soluções ótimas ou com as melhores soluções encontradas dentro do limite de tempo computacional do CPLEX (LEE; KWON, 2010).

Discorrido sobre alguns estudos que propuseram heurísticas para otimização de redes de cadeias de suprimento, na próxima seção será abordada a Busca Tabu, meta-heurística utilizada para solução do problema desta dissertação.

## 2.4 BUSCA TABU

A Busca Tabu (BT) é uma meta-heurística de busca local introduzida por Glover (1986) (BRÄYSY; GENDREAU, 2005) que procura melhorar uma solução corrente por meio da execução de movimentos dentro de uma vizinhança (CHIANG *et al.*, 2009). Para Colin (2007), esta é uma técnica iterativa que pode ser usada para guiar processos de busca e tem o objetivo de evitar a convergência da solução para os ótimos locais utilizando procedimentos que, embora permitam identificar ótimos locais, forcem a exploração em outras regiões do espaço de solução viáveis.

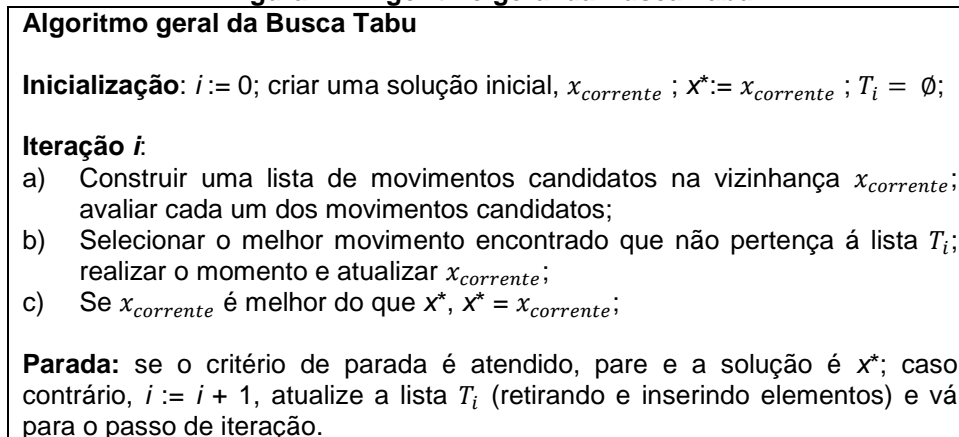
A filosofia da BT consiste em derivar e explorar os princípios da resolução inteligente de problemas, tendo como elemento fundamental subjacente o uso de uma memória flexível que, do ponto de vista do método, incorpora os processos de criação e exploração de estruturas, obtendo vantagens do histórico de iterações (LAGUNA, 1994). Goldberg e Luna (2005) destacam que seus procedimentos de busca são enriquecidos por estratégias de memória que buscam evitar que configurações já examinadas sejam revisitadas durante o desenvolvimento do algoritmo. A lista tabu, representada por uma memória de curto prazo, pode ser considerada como um elemento central da Busca Tabu (ZÄPFEL; BRAUNE; BÖGL, 2010).

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; LAPORTE; VIGO, 1999). A proibição de alguns

movimentos durante um determinado número de iterações objetiva impedir a ocorrência de ciclos na busca (AMRANI *et al.*, 2009).

O algoritmo geral da BT é apresentado na Figura 1.

**Figura 1 – Algoritmo geral da Busca Tabu**

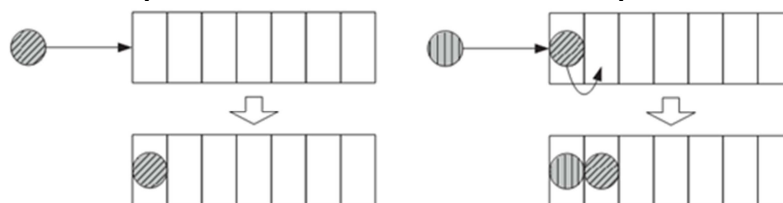


Fonte: Colin (2007, p. 429).

De forma geral, a BT é processada gerando diversas soluções, boas e más, sendo que de vez em quando aparece uma solução que é melhor do que todas as anteriores (COLIN, 2007). A lista tabu inicia vazia e, a cada iteração, uma solução é armazenada na lista fazendo com que os elementos antigos sejam deslocados até a sua extremidade (ZÄPFEL; BRAUNE; BÖGL, 2010).

O objetivo da lista tabu é permitir uma busca local escapando de um mínimo local, pois ao proibir soluções encontradas anteriormente, novas soluções devem ser exploradas. A diversificação pode ser controlada pelo tamanho da lista tabu; listas pequenas levam a uma maior intensificação já que a memória do processo de pesquisa é menor e abordagens mais avançadas de BT não armazenam soluções completas na lista, mas atributos da solução (ROTHLAUF, 2011). A Figura 2 representa o comportamento da lista no início do processo de busca.

**Figura 2 – Comportamento da lista tabu no início do processo de busca**

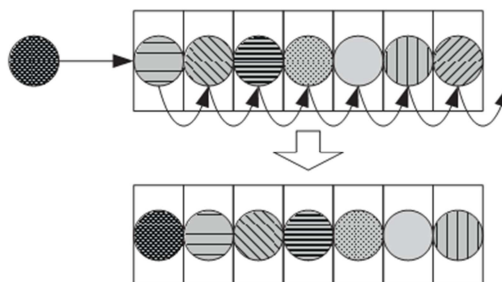


Fonte: Zäpfel, Braune e Bögl (2010).

Zäpfel, Braune e Bögl (2010, p. 104) explicam que a lista tabu é organizada com uma memória de capacidade fixa, fazendo com que, “quando a memória estiver totalmente ocupada e um novo elemento precisar ser adicionado, a solução mais

antiga seja removida para dar espaço a solução mais nova”. Este procedimento pode ser observado na Figura 3.

**Figura 3 – Comportamento da lista tabu totalmente ocupada**



Fonte: Zäpfel, Braune e Bögl (2010).

A finalização do algoritmo de busca ocorre quando alguma regra definida pelo usuário for atendida, sendo comum a utilização de um número máximo de iterações ou a não melhoria ao longo de um determinado número de iterações (COLIN, 2007). Como condições de parada, Amrani *et al.* (2009) consideram um tempo limite de processamento computacional, um número máximo de iterações ou um número máximo de iterações entre dois melhoramentos.

Apesar de ser uma técnica relativamente nova, os resultados encontrados nas aplicações da BT em problemas complexos são promissores na maioria das vezes, porém não há provas matemáticas claras sobre as características de convergência do método ao ótimo global (COLIN, 2007). Gendreau, Laporte e Vigo (1999) ressaltam que a BT é uma técnica genérica que deve ser cuidadosamente adaptada ao problema que se deseja resolver, a fim de obter bons resultados.

A BT foi aplicada com sucesso em diversos problemas com dezenas de milhares e até milhões de variáveis inteiras, encontrando soluções muito próximas ao ótimo global (COLIN, 2007), incluindo os de localização, transporte, projetos de rede de cadeia de suprimentos, roteamento de veículos e distribuição (KESKIN; USTER, 2007).

Apresentado o referencial teórico que guiou a execução desta pesquisa, são apresentados, no próximo capítulo, os procedimentos metodológicos utilizados.

### 3 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Neste capítulo serão apresentados os procedimentos metodológicos utilizados para realização desta dissertação, compreendendo a definição do problema, construção do modelo matemático e sua solução.

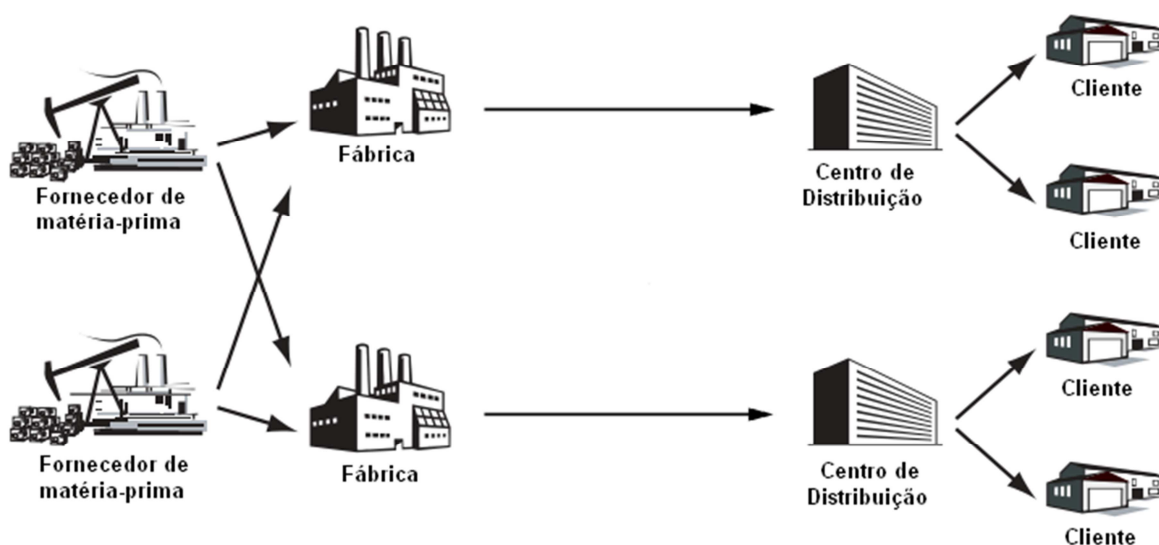
#### 3.1 DEFINIÇÃO DO PROBLEMA

A cadeia de suprimentos analisada nesta dissertação 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 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 a 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*, onde cada cliente só pode receber produtos de um único CD. A Figura 4 apresenta o modelo de rede de cadeia de suprimentos utilizado nesta dissertação.

Figura 4 – Modelo de rede de cadeia de suprimentos

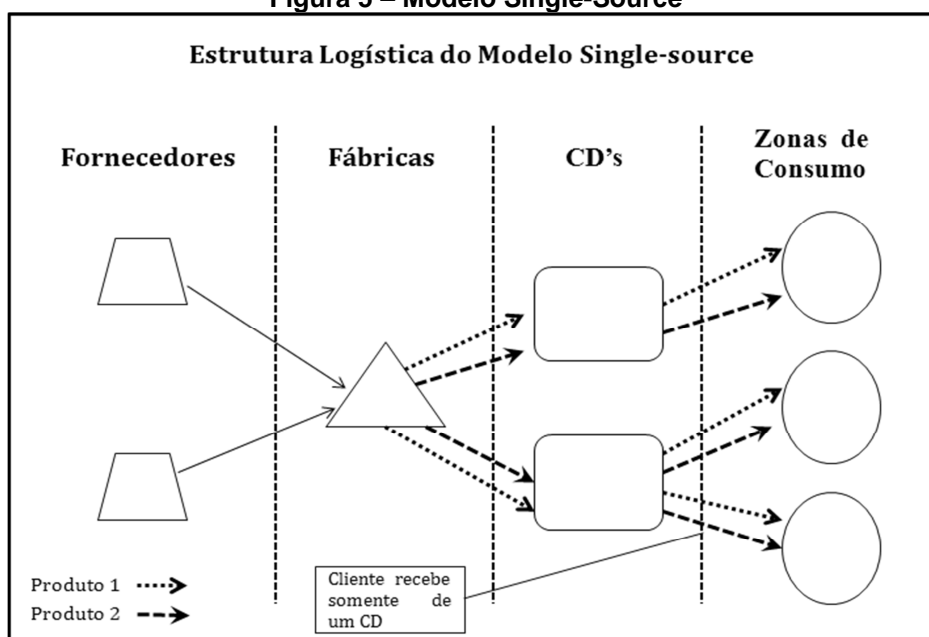


Fonte: adaptado de Ghiani, Laporte e Musmanno (2004).

### 3.2 CONSTRUÇÃO DO MODELO

Para 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 solução deste problema foi utilizado o modelo *single-source* proposto por Farias e Borenstein (2012), onde uma zona de consumo pode ser abastecida somente por um único CD, conforme ilustrado na Figura 5.

Figura 5 – Modelo Single-Source



Fonte: Farias e Borenstein (2012, p. 7).

Os conjuntos utilizados no modelo são apresentados no Quadro 4.

**Quadro 4 – Conjuntos utilizados no modelo**

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

Fonte: adaptado de Farias e Borenstein (2012).

Os parâmetros utilizados são expressos no Quadro 5.

**Quadro 5 – Parâmetros utilizados no modelo**

$d_{sc}$	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 a 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 e Borenstein (2012).

As variáveis de decisão do modelo são ilustradas no Quadro 6.

**Quadro 6 – Variáveis de decisão do modelo**

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

Fonte: adaptado de Farias e Borenstein (2012).

O modelo matemático utilizado é o seguinte:

$$\begin{aligned}
 \min \quad & \sum_{w \in W} CT_w^o z_w + \sum_{w \in W} \sum_{c \in C} \sum_{s \in S} CT_w^g d_{sc} g_{wc} + \sum_{f \in F} \sum_{w \in W} \sum_{s \in S} CT_{fs}^p x_{fws} \\
 & + \sum_{v \in V} \sum_{f \in F} \sum_{r \in R} CT_{fvr}^t y_{vfr} + \sum_{f \in F} \sum_{w \in W} \sum_{s \in S} CT_{fws}^t x_{fws} \\
 & + \sum_{w \in W} \sum_{c \in C} \sum_{s \in S} CT_{wcs}^t d_{sc} g_{wc} \quad (17)
 \end{aligned}$$

Sujeito a:

$$\sum_{w \in W} g_{wc} = 1 \quad \forall c \in C \quad (18)$$

$$\sum_{c \in C} \sum_{s \in S} d_{sc} g_{wc} \leq CAP_w z_w \quad \forall w \in W \quad (19)$$

$$\sum_{w \in W} z_w \leq U_w \quad (20)$$

$$\sum_{c \in C} d_{sc} g_{wc} \leq \sum_{f \in F} x_{fws} \quad \forall w \in W, \forall c \in C, \forall s \in S \quad (21)$$

$$\sum_{f \in F} y_{vfr} \leq CAP_{vr} \quad \forall r \in R, \forall v \in V \quad (22)$$

$$\sum_{w \in W} \sum_{s \in S} u_{rs} x_{fws} \leq \sum_{v \in V} y_{vfr} \quad \forall r \in R, \forall f \in F \quad (23)$$

$$\sum_{w \in W} \sum_{s \in S} u_s x_{fws} \leq CAP_f \quad \forall f \in F \quad (24)$$

$$\sum_{f \in F} \sum_{s \in S} x_{fws} \geq u_{min} \quad \forall w \in W \quad (25)$$

$$z_w \in \{0,1\} \quad \forall w \in W \quad (26)$$

$$g_{wc} \in \{0,1\} \quad \forall w \in W, \forall c \in C \quad (27)$$

A função objetivo do modelo (17) 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 (18), onde é garantido que cada cliente será atendido apenas por um único CD. A restrição (19) assegura que a capacidade do CD não será violada, enquanto a (20) limita o número máximo de CDs a serem instalados. A restrição (21) assegura que os CDs têm capacidade para atender à demanda, enquanto a (22) assegura que a capacidade de fornecimento de matéria-prima pelo fornecedor é respeitada. Em (23) é estabelecida a relação entre matérias-primas e produtos. A restrição (24) garante que a capacidade das fábricas não será violada e a (25) determina uma utilização mínima para que um CD possa ser instalado. As restrições (26) e (27) 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 dissertação, foi adaptado o método heurístico baseado em Busca Tabu proposto por Lee e Kwon (2010). Esses autores aplicaram a heurística para uma cadeia de suprimentos considerando plantas, CDs e clientes, sendo que nesta pesquisa adicionou-se os fornecedores de matérias-primas.

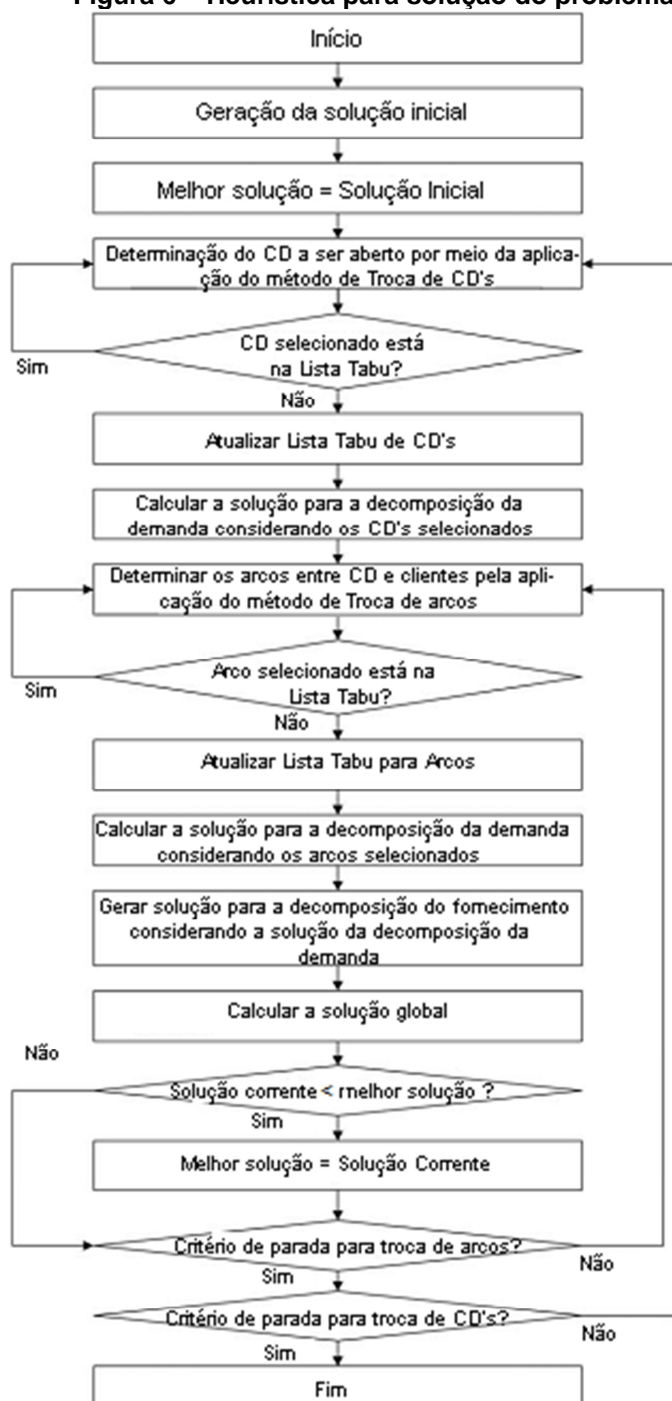
A heurística proposta é realizada uma busca iterativa de soluções vizinhas, iniciando a partir de uma solução inicial, enquanto a checagem à lista tabu impede o retorno a uma solução recentemente visitada, sendo que a cada iteração a vizinhança é gerada por meio da troca de CDs e arcos de transporte, que são selecionados conforme regras de prioridade que representam um custo unitário médio para cada operação.

Lee e 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 seleção dos CDs e dos arcos a serem trocados, Lee e Kwon (2010) sugerem a utilização 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 no 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.

A Figura 6 ilustra o procedimento da heurística aplicada nessa dissertação.

Figura 6 – Heurística para solução do problema



Fonte: adaptado de Lee e Kwon (2010).

### 3.3.1 Geração da solução inicial

Para 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 do mesmo. Os CDs com menor índice têm prioridade de abertura e os clientes com maior demanda são alocados aos CDs de menor índice, enquanto a capacidade dos CDs não for excedida. O índice  $UCR - F_w$  (28) do CD  $w \in W$  é determinado por:

$$UCR - F_w = \frac{CT_w^o}{CAP_w} \quad (28)$$

Onde:

$CT_w^o$  = custo de operação do CD  $w \in W$  ;

$CAP_w$  = capacidade do CD  $w \in W$  .

O procedimento para geração da solução inicial é apresentado na Figura 7.

**Figura 7 – Procedimento heurístico para geração da solução inicial**

<p>Passo 1: Inicialização e computação dos índices de prioridade:          Passo 1.1: Considerar todos CDs fechados;          Passo 1.2: Calcular <math>UCR - F_w</math> para cada CD;          Passo 1.3: Classificar os CDs em ordem crescente de acordo com o índice calculado;          Passo 2: Solução da decomposição da demanda:          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;          Passo 3: Solução da decomposição de suprimento:          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.</p>
---

Fonte: adaptado de Lee e Kwon (2010).

### 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. Estes procedimentos serão relatados nas seções seguintes.

#### 3.3.2.1 Troca de CDs

O procedimento de troca de CDs é capaz de gerar novas vizinhanças pela substituição de CDs abertos por CDs 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 CD e o custo de transporte do produto aos clientes a partir do CD. 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 que tenham menores índices. Em (29) é expressa a fórmula para determinar o valor de  $UCR - O_w$  do CD  $w \in W$ .

$$UCR - O_w = \frac{\sum_f CT_{fws}^t}{NP_w} + \frac{\sum_c CT_{wcs}^t}{NC_w} + \frac{CT_w^o}{Q_w} \quad (29)$$

Onde:

$CT_{fws}^t$  = custo de transporte do produto  $s \in S$  da fábrica  $f \in F$  ao CD  $w \in W$ ;

$CT_{wcs}^t$  = custo de transporte do produto  $s \in S$  do CD  $w \in W$  ao cliente  $c \in C$ ;

$CT_w^o$  = custo de operação do CD  $w \in W$ ;

$Q_w$  = 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 procedimento heurístico de troca de CDs é apresentado na Figura 8:

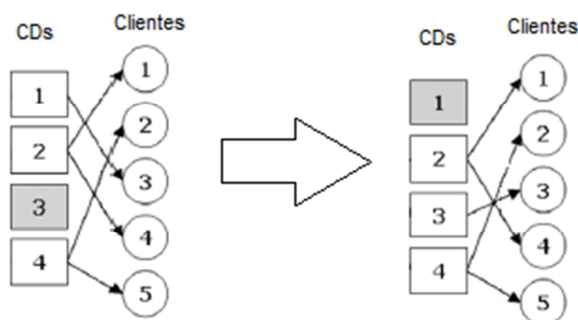
**Figura 8 – Procedimento heurístico para troca de CDs**

<p>Passo 1: Definição da condição inicial:          Passo 1.1: Classificar os CDs de acordo com seu status: aberto ou fechado;</p> <p>Passo 2: Cálculo do <math>UCR - O_w</math>:          Passo 2.1: Calcular <math>UCR - O_w</math> para cada CD aberto;          Passo 2.2: Classificar os CDs abertos em ordem decrescente de <math>UCR - O_w</math>;</p> <p>Passo 3: Troca de CDs:          Passo 3.1: Selecionar os CDs abertos sequencialmente de acordo com a classificação anterior;          Passo 3.1.1: Calcular o <math>UCR - O_w</math> para os CDs fechados de acordo com a quantidade transportada dos CDs selecionados no passo 2.1;          Passo 3.1.2: Classificar os CDs fechados em ordem crescente de <math>UCR - O_w</math>;          Passo 3.1.3: Selecionar os CDs fechados sequencialmente de acordo com a classificação anterior e verificar a viabilidade, comparando as capacidades do CD que se deseja abrir e do que se deseja fechar;          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;          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 procedimento desde que a troca de CDs não seja mais possível.</p>
---

Fonte: adaptado de Lee e Kwon (2010).

Um exemplo de troca de CD pode ser observado na Figura 9, onde o CD número 1 é fechado e o número 3 é aberto em seu lugar.

**Figura 9 – Geração de vizinhança pelo método de troca de CD**



Fonte: adaptado de Lee e Kwon (2010).

### 3.3.2.2 Troca de arcos

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 determinado cliente.

Na troca de arcos, um índice  $UCR - S$  é utilizado. Dois arcos são selecionados randomicamente e então é calculado o  $UCR - S$  para ambos. Se a soma do  $UCR - S$  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: 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 (30):

$$UCR - S_{wc} = CT_{wcs}^t + \frac{CT_w^o}{NC_w * QA_{wc}} + \frac{\sum_s (CT_w^g / NC_w)}{QA_{wc}} \quad (30)$$

Onde:

$CT_{wcs}^t$  = custo de transporte do produto  $s \in S$  do CD  $w \in W$  ao cliente  $c \in C$ ;

$CT_w^o$  = custo de operação do CD  $w \in W$ ;

$NC_w$  = número de clientes atendidos pelo CD  $w \in W$ ;

$QA_{wc}$  = quantidade de produto transportada do CD  $w \in W$  ao cliente  $c \in C$ .

$CT_w^g$  = custo unitário de transferência do CD  $w \in W$ ;

Este procedimento heurístico pode ser observado na Figura 10.

**Figura 10 – Procedimento heurístico para troca de arcos**

<p>Passo 1: Definir as condições iniciais:  Passo 1.1: Classificar os arcos em utilizados ou não;</p> <p>Passo 2: Calcular <math>UCR - S_{wc}</math>:  Passo 2.1: Calcular <math>UCR - S_{wc}</math> para cada arco utilizado;  Passo 2.2: Ordenar os arcos utilizados em ordem decrescente de acordo com o valor de <math>UCR - S_{wc}</math>.</p> <p>Passo 3: Troca de arcos:  Passo 3.1: Selecionar arcos utilizados sequencialmente de acordo com a lista de classificação:  Passo 3.1.1: Selecionar outro arco utilizado entre o conjunto de arcos utilizados restantes;  Passo 3.1.2: Assumindo que os arcos selecionados foram trocados, calcular <math>UCR - S_{wc}</math> para os arcos substituídos;  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.  Passo 3.1.4: Se a soma do <math>UCR - S_{wc}</math> calculada no passo 3.1.2 for menor do que a soma de <math>UCR - S_{wc}</math> 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.  Passo 3.2: Se existir arcos utilizados não selecionados anteriormente, voltar ao passo 3.1.3.</p>
--

Fonte: adaptado de Lee e Kwon (2010).

### 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 será selecionado 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, a lista correspondente é verificada para constatar a possibilidade da 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 e 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 afetava consideravelmente no 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.

**Tabela 1 – Tamanho das listas tabu consideradas em cada instância**

<u>Instância</u>	<u>CD</u>	<u>ARC</u>	<u>Instância</u>	<u>CD</u>	<u>ARC</u>
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: do autor.

Para Lee e Kwon (2010), a Busca Tabu se adapta perfeitamente ao método de solução proposto, visto 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 uma melhor solução.

### **3.3.4 Critérios de parada**

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

### **3.3.5 Decomposição de suprimento**

Após 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 fábricas, 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 fornecedores, sendo o custo de transporte mais importante para essa etapa.

Vale ressaltar que todas as decisões na decomposição de suprimento respeitam os limites de capacidade de fabricação e fornecimento de plantas e fornecedores, bem como atendem a 100% da demanda de produtos dos CDs.

### **3.3.6 Instâncias resolvidas**

A heurística anteriormente apresentada foi utilizada para resolver as 22 instâncias propostas por Farias e 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 e Kwon (2010).

As instâncias geradas 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. As configurações de cada instância e seu detalhamento são apresentados no capítulo 4.

### **3.3.7 Implementação e execução computacional**

A heurística proposta foi desenvolvida em linguagem de programação C ANSI e os resultados foram obtidos através da 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 dissertação, são apresentados e analisados, no próximo capítulo, seus resultados.



#### 4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Uma vez implementada, a heurística foi aplicada nas instâncias propostas por Farias e Borenstein (2012). A Figura 11 apresenta o modelo de exibição dos resultados na tela durante a execução da heurística. Neste caso, o sistema havia lido os dados da instância 10 e apresentado uma solução inicial no valor de \$32.813.048,00.

Figura 11 – Tela de execução da heurística

Parse OK!					
FACTORY	USED	OPEN DC	UCR-Fj	USED	DEMANDS
Factory 3	31%	Warehouse 4	0.2600	98%	47
Factory 1	64%	Warehouse 5	1.0000	92%	8
Factory 3	31%	Warehouse 6	1.0000	97%	13
Factory 3	31%	Warehouse 7	1.0000	98%	9
Factory 1	64%	Warehouse 8	1.0000	98%	11
Factory 1	64%	Warehouse 9	1.0000	88%	7
Factory 3	31%	Warehouse 10	1.0000	94%	11
Factory 3	31%	Warehouse 11	1.0000	91%	9
Factory 1	64%	Warehouse 12	1.0000	98%	13
Factory 1	64%	Warehouse 13	1.0000	97%	9
Factory 1	64%	Warehouse 14	1.0000	97%	9
Factory 1	64%	Warehouse 15	1.0000	40%	4
<b>TOTALS</b>					
TIME/μs		COST			
908		32813048			

Fonte: do autor.

Para melhor visualização e comparação dos resultados, as 22 instâncias foram divididas em sete cenários conforme a configuração da rede da cadeia de suprimentos.

Cabe destacar que a configuração da decomposição de suprimento é igual para todas as instâncias, sendo composta por 5 fornecedores de matérias-primas, 5 tipos de matérias-primas diferentes e 3 fábricas; enquanto que a decomposição de demanda varia de acordo com o cenário, compreendendo entre 10 e 50 CDs, responsáveis pelo atendimento a 150 clientes com demanda variando de 5 a 100 produtos.

Nas próximas seções serão apresentados e analisados os resultados obtidos em cada cenário.

#### 4.1 CENÁRIO 1

A cadeia de suprimentos analisada no primeiro cenário considera a existência de 5 produtos e 150 zonas de consumo, totalizando uma demanda de 1.000.000 de unidades e admitindo a possibilidade de abertura de 10, 20, 30, 40 e 50 CDs nas instâncias 1 a 5, respectivamente. A Tabela 2 apresenta a configuração da cadeia de suprimentos em cada instância do primeiro cenário.

**Tabela 2 – Configuração da cadeia de suprimentos do cenário 1**

Instância	Fornecedores	Matérias-Primas	Fábricas	CDs	Produtos	Clientes	Demanda
1	5	5	3	10	5	150	1.000.000
2	5	5	3	20	5	150	1.000.000
3	5	5	3	30	5	150	1.000.000
4	5	5	3	40	5	150	1.000.000
5	5	5	3	50	5	150	1.000.000

Fonte: do autor.

A primeira instância partiu de uma solução inicial de \$18.648.520 e, com a realização das operações de troca de CDs e arcos, foi possível diminuir o valor da função objetivo em 4,57%, encontrando a melhor solução no tempo de 0,66 segundos, ao custo de \$17.796.420, considerando a abertura de seis CDs.

**Figura 12 – Resultados da instância 1**

```

BEST SOLUTION :
-----
END
BEST ITER 478      COST 17796420      TIME 0.660s
-----
FACTORY           USED  OPEN DC           UCR-Fw           USED  DEMANDS
-----
Factory 2         9%   Warehouse 4         0.2600           99%  78
Factory 2         9%   Warehouse 5         1.0000           98%  14
Factory 1         31%  Warehouse 6         1.0000           96%  21
Factory 3         3%   Warehouse 7         1.0000           100% 15
Factory 1         31%  Warehouse 8         1.0000           98%  18
Factory 1         31%  Warehouse 9         1.0000           79%  4
-----

```

Fonte: do autor.

Conforme a Figura 12<sup>1</sup>, os CDs abertos serão atendidos por todas as fábricas. A fábrica 1 fornecerá produtos para os CDs 6, 8 e 9, com utilização de 31% de sua capacidade produtiva. Já a fábrica 2 irá atender aos CDs 4 e 5, utilizando 9% da sua

<sup>1</sup> No cabeçalho da Figura é apresentado o número da iteração onde foi possível encontrar o melhor resultado (BEST ITER), o custo total (COST) e o tempo total de execução (TIME). As colunas "FACTORY" e "USED" representam o número da fábrica que atende ao CD e sua capacidade total utilizada, respectivamente. A coluna "OPEN DC" apresenta os CDs abertos na solução, seguido do valor "UCR-F<sub>w</sub>" (conforme descrito na seção 3.3.1) de cada CD aberto. Finalizando, as colunas "USED" e "DEMAND" correspondem à capacidade utilizada do CD e ao número de clientes que ele atende. Essa forma de apresentação é válida para todas as figuras desta natureza apresentadas na sequência.

capacidade. Por fim, a fábrica 3 atenderá ao CD 7, com apenas 3% da sua capacidade.

Quanto à capacidade dos CDs, observa-se que o CD 7 tem 100% de sua capacidade utilizada atendendo a 15 clientes, enquanto que o CD 9 abastece apenas 4 clientes com utilização de 79% de sua capacidade. O CD 4 atende ao maior número de clientes (78) com utilização de 99% de sua capacidade. É interessante ressaltar que esse CD apresenta o menor índice  $UCR - F_w$ , ou seja, dentre todos os CDs esse é o que tem o menor custo de operação por unidade de produto, o que motivou a alocação da maior demanda a ele.

Para a instância 2 foi encontrado o resultado de \$16.750.500 a partir de um valor inicial de \$18.324.300, o que representa uma melhoria de 8,59% no valor da função objetivo. A Figura 13 ilustra o resultado final obtido em 0,252 segundos e considerando a abertura de seis CDs.

**Figura 13 – Resultados da instância 2**

BEST SOLUTION:

---

END  
BEST ITER 314      COST 16750500      TIME 0.252s

---

FACTORY	USED	OPEN DC	UCR-Fw	USED	DEMANDS
Factory 3	23%	Warehouse 4	0.2600	99%	78
Factory 1	29%	Warehouse 6	1.0000	96%	21
Factory 3	23%	Warehouse 10	1.0000	94%	18
Factory 1	29%	Warehouse 11	1.0000	63%	4
Factory 1	29%	Warehouse 14	1.0000	98%	15
Factory 3	23%	Warehouse 16	1.0000	73%	14

---

Fonte: do autor.

É possível observar na Figura 13 que apenas duas fábricas enviam produtos aos CDs abertos. A fábrica 1, com 29% de sua capacidade produtiva utilizada, atende aos CDs 6, 11 e 14. Já a fábrica 3 supre a necessidade de produtos dos CDs 4, 10 e 16, com utilização de 23% de sua capacidade de produção.

O CD 4 é responsável pelo atendimento do maior número de clientes, 78, com utilização de 99% de sua capacidade, fato justificado por ser o CD com menor índice  $UCR - F_w$ . Já o CD 11 é responsável pelo fornecimento de produtos a 4 clientes com utilização 63% de sua capacidade.

Na terceira instância o resultado de \$18.605.000 pôde ser obtido no tempo de 0,452 segundos, a partir de uma solução inicial com valor de \$21.141.500. Observou-se melhoria de 12% a partir da solução inicial, sendo o resultado final, que propõe a abertura de seis CDs, apresentado na Figura 14.

Figura 14 – Resultados da instância 3

BEST SOLUTION:

---

END  
BEST ITER 681      COST 18605000      TIME 0.452s

---

FACTORY	USED	OPEN DC	UCR-Fw	USED	DEMANDS
Factory 3	28%	Warehouse 4	0.2600	99%	78
Factory 3	28%	Warehouse 6	1.0000	96%	21
Factory 3	28%	Warehouse 13	1.0000	98%	15
Factory 1	8%	Warehouse 15	1.0000	85%	14
Factory 3	28%	Warehouse 24	1.0000	82%	18
Factory 2	1%	Warehouse 26	1.0000	69%	4

---

Fonte: do autor.

Observa-se na Figura 14 que os CDs abertos são atendidos por todas as fábricas. A fábrica 1, com 8% de sua capacidade produtiva utilizada, atende apenas ao CD 15; a fábrica 2 atende apenas ao CD 26 com 1% de sua capacidade; e a fábrica 3 é responsável pelo abastecimento dos demais CDs (4, 6, 13 e 24) com utilização de 28% da capacidade de produção.

Quanto à capacidade dos CDs, observa-se que o 4 tem 99% de utilização no suprimento de produtos a 78 clientes, sendo o CD com mais clientes alocados e apresentando um índice  $UCR - F_w$  inferior aos demais. O CD 26, com menor utilização (69%), supre a demanda de 4 clientes.

A instância 4 obteve como melhor resultado a solução inicial encontrada, com o valor de \$16.568.600, no tempo de 0,163 segundos, considerando a abertura de quatro CDs, conforme pode ser observado na Figura 15.

Figura 15 – Resultados da instância 4

BEST SOLUTION:

---

END  
BEST ITER 1      COST 16568600      TIME 0.163s

---

FACTORY	USED	OPEN DC	UCR-Fw	USED	DEMANDS
Factory 2	14%	Warehouse 4	0.2600	99%	78
Factory 1	5%	Warehouse 5	1.0000	63%	9
Factory 3	1%	Warehouse 6	1.0000	33%	1
Factory 2	14%	Warehouse 24	0.3276	99%	62

---

Fonte: do autor.

Os CDs abertos serão atendidos por todas as fábricas, conforme ilustrado na Figura 15. A fábrica 1 atende ao CD 5 com 5% de sua capacidade de produção; a fábrica 2, com 14% de sua capacidade utilizada atende aos CDs 4 e 24; e a fábrica 3 atende ao CD 6 com apenas 1% de utilização.

O CD 4 atende à demanda de 78 clientes com 99% de uso de sua capacidade, sendo o CD com o maior número de clientes atendidos e com o menor

custo unitário de abertura. Já o CD 6 supre a demanda de apenas 1 cliente, com utilização de 33% de sua capacidade de distribuição.

Para a instância 5 foi possível encontrar o melhor resultado com valor de \$15.857.900 em 0,444 segundos. Este resultado foi obtido com a redução de 4,58% no valor da solução inicial encontrada, onde o custo era de \$16.618.700. A Figura 16 ilustra o resultado final para essa instância, considerando a abertura de seis CDs.

**Figura 16 – Resultados da instância 5**

**BEST SOLUTION:**

---

**END**  
**BEST ITER 421      COST 15857900      TIME 0.444s**

---

FACTORY	USED	OPEN DC	UCR-Fw	USED	DEMANDS
Factory 3	16%	Warehouse 4	0.2600	99%	78
Factory 1	25%	Warehouse 5	1.0000	98%	14
Factory 2	4%	Warehouse 6	1.0000	96%	21
Factory 2	4%	Warehouse 8	1.0000	98%	18
Factory 1	25%	Warehouse 15	1.0000	91%	15
Factory 1	25%	Warehouse 44	1.0000	67%	4

---

Fonte: do autor.

Todas as fábricas são utilizadas no atendimento aos CDs, conforme pode ser observado na Figura 16. A fábrica 1, com 25% de sua utilização, atende aos CDs 5, 15 e 44; a fábrica 2 supre a demanda dos CDs 6 e 8 com 4% de sua capacidade produtiva; e a fábrica 3, com 16% de utilização, atende apenas ao CD 4.

O CD 4, que apresenta o menor índice  $UCR - F_w$  entre os CDs, atende ao maior número de clientes, 78, e tem 99% de sua capacidade utilizada. O CD 44 atende a apenas 4 clientes, com uso de 67% de sua capacidade.

A Tabela 3 apresenta um comparativo entre as soluções iniciais encontradas para cada instância e o valor da solução final obtida. Observa-se que na instância 4, o melhor resultado encontrado foi justamente a solução inicial, enquanto que a instância 3 teve uma redução de 12% nos custos com a realização dos procedimentos de troca de CDs e arcos. Em média, a solução final pôde ser melhorada em 5,95% neste primeiro cenário.

**Tabela 3 – Comparativo entre solução inicial e final no cenário 1**

Instância	Solução Inicial	Solução Final	Melhoria
1	18.648.520	17.796.420	4,57%
2	18.324.300	16.750.500	8,59%
3	21.141.500	18.605.000	12,00%
4	16.568.600	16.568.600	0,00%
5	16.618.700	15.857.900	4,58%
<b>Média</b>			<b>5,95%</b>

Fonte: do autor.

Os resultados obtidos nas instâncias 1 a 5 foram organizados e comparados com os resultados ótimos encontrados por Farias e Borenstein (2012), conforme apresentado na Tabela 4. O *gap* representa o percentual de diferença entre o valor da função objetivo obtida pela heurística e o resultado ótimo.

**Tabela 4 – Comparativo entre a solução ótima e a heurística no cenário 1**

Instância	Resultado Ótimo			Heurística			<i>gap</i>
	CDs	Custo (\$)	Tempo (s)	CDs	Custo (\$)	Tempo (s)	
1	7	16.970.300	2,07	6	17.796.420	0,66	4,87%
2	9	16.541.500	2,42	6	16.750.500	0,25	1,26%
3	4	17.484.800	4,06	6	18.605.000	0,45	6,41%
4	13	15.453.300	7,65	4	16.568.600	0,16	7,22%
5	10	15.051.100	4,86	6	15.857.900	0,44	5,36%
<b>Média</b>			<b>4,21</b>			<b>0,39</b>	<b>5,02%</b>

Fonte: do autor.

Observa-se que, em geral, a heurística proposta foi capaz de atender a toda a demanda dos clientes com a abertura de um número inferior de CDs. Na instância 4, enquanto o resultado ótimo considera a abertura de 13 CDs, a heurística sugere a abertura de apenas 4; em contrapartida, na instância 3, o resultado ótimo compreende a instalação de 4 CDs e a heurística de 6 CDs.

O tempo médio de execução das instâncias pelo CPLEX foi de 4,21 segundos, enquanto a heurística proposta obteve os resultados em apenas 0,39 segundos, o que corresponde a uma redução de 90,74% no tempo.

Quanto ao valor da função objetivo, na instância 2 obteve-se um resultado bem próximo ao valor ótimo, com *gap* de 1,26%, enquanto que para a instância 4, este valor ficou em 7,22%. Em média, o valor encontrado pela heurística foi 5,02% superior ao resultado ótimo das instâncias analisadas neste cenário.

Lee e Kwon (2010) resolveram uma instância semelhante a 1, considerando os mesmos 10 CDs e 5 produtos, porém com 5 fábricas e apenas 30 clientes atendidos. Os autores obtiveram um *gap* médio de 6,95% em relação ao resultado ótimo e tempo de execução de 27,89 segundos. Neste estudo, foi possível encontrar um resultado 4,87% superior ao ótimo em um tempo de 0,66 segundos, mostrando que, para uma instância semelhante, as alterações feitas no método (a não randomicidade na geração da solução inicial e a não utilização do CPLEX na decomposição de suprimento) foram capazes de reduzir em 29,93% o *gap* e em 97,63% o tempo de execução.

Uma configuração semelhante à da instância 2 também foi abordada por Lee e Kwon (2010), com 20 CDs e 5 produtos, porém com a existência de 10 fábricas e

apenas 60 clientes. Esses autores encontraram uma solução em média 5,62% distante do valor ótimo em um tempo médio de 125,09 segundos; nesta dissertação, foi possível resolver a instância com um tempo 99,80% menor, em apenas 0,25 segundos, e com um *gap* de apenas 1,26%, 77,58% inferior ao dos autores.

Esses resultados mostram que o método proposto nesta dissertação se mostrou eficiente, tanto no tempo de execução quanto na qualidade da solução obtida, se comparado com o resultado obtido para instâncias semelhantes resolvidas por Lee e Kwon (2010).

## 4.2 CENÁRIO 2

No segundo cenário foi considerada uma cadeia de suprimentos contemplando a possibilidade de abertura de 10 CDs, atendendo a 150 clientes, com demanda de 1.575.000 unidades de 10 produtos distintos na instância 6, 1.576.200 unidades de 50 produtos diferentes na instância 7, e 100 produtos com demanda total de 1.583.100 unidades na instância 8. A Tabela 5 ilustra a configuração desta cadeia de suprimentos.

**Tabela 5 – Configuração da cadeia de suprimentos do cenário 2**

Instância	Fornecedores	Matérias-Primas	Fábricas	CDs	Produtos	Clientes	Demanda
6	5	5	3	10	10	150	1.575.000
7	5	5	3	10	50	150	1.576.200
8	5	5	3	10	100	150	1.583.100

Fonte: do autor.

A instância 6 partiu de uma solução inicial de \$31.822.500, a qual foi reduzida em 1,88%, obtendo a melhor solução ao custo de \$31.224.000 em 0,526 segundos. O resumo da solução, que considera a abertura de sete CDs, é ilustrado na Figura 17.

**Figura 17 – Resultados da instância 6**

BEST SOLUTION:

END

BEST ITER 790

COST 31224000

TIME 0.526s

FACTORY

USED OPEN DC

UCR-Fw

USED DEMANDS

Factory 1	91%	Warehouse 2	1.1875	72%	55
Factory 2	11%	Warehouse 4	0.2600	98%	47
Factory 1	91%	Warehouse 5	1.0000	92%	8
Factory 1	91%	Warehouse 6	1.0000	97%	13
Factory 2	11%	Warehouse 7	1.0000	98%	9
Factory 1	91%	Warehouse 8	1.0000	98%	11
Factory 2	11%	Warehouse 9	1.0000	88%	7

Fonte: do autor.

Observa-se na Figura 17 que duas fábricas são responsáveis pelo abastecimento de toda a cadeia de suprimentos. A fábrica 1, com 91% de sua capacidade produtiva, fornece produtos aos CDs 2, 5, 6 e 8. Já a fábrica 2, com apenas 11% de sua capacidade de produção, distribui produtos aos CDs 4, 7 e 9.

O CD 4 atende a 47 clientes com utilização de 98% de sua capacidade, sendo o CD com menor valor de  $UCR - F_w$ . O CD com menor utilização de sua capacidade (72%) é o 2, justamente o que apresenta o maior valor do índice  $UCR - F_w$ . Cabe destacar, porém, que embora o CD 2 tenha menor utilização, é o CD que atende ao maior número de clientes.

Uma solução no valor de \$30.811.316 foi obtida em 1,462 segundos, considerando a abertura de dois CDs para a instância 7, sendo que o melhor resultado encontrado foi justamente a solução inicial. A Figura 18 apresenta o resumo do resultado desta instância.

**Figura 18 - Resultados da instância 7**

**BEST SOLUTION:**

---

**END**  
**BEST ITER 1**      **COST 30811316**      **TIME 1.462s**

---

<b>FACTORY</b>	<b>USED</b>	<b>OPEN DC</b>	<b>UCR-F<sub>w</sub></b>	<b>USED</b>	<b>DEMANDS</b>
Factory 1	44%	Warehouse 4	0.2600	88%	42
Factory 2	18%	Warehouse 6	0.1228	99%	108

---

Fonte: do autor.

Pode-se observar na Figura 18 que apenas duas fábricas são responsáveis pelo fornecimento de produtos aos CDs dessa instância. A fábrica 1, com 44% de sua capacidade produtiva, atende ao CD 4, enquanto que a fábrica 2, com 18% de sua capacidade, atende ao CD 6.

O CD 6, que apresenta menor índice  $UCR - F_w$ , tem 99% de sua capacidade usada na distribuição de produtos para 108 clientes. O CD 4, por sua vez, apresenta um  $UCR - F_w$  superior, e, portanto, tem sua utilização reduzida a 88% com atendimento às demandas de 42 clientes.

Na instância 8, a solução inicial encontrada tinha valor de \$30.044.222, que foi reduzido em 1,27%, obtendo a melhor solução com custo total de \$29.661.682 em 5,625 segundos. O resultado para esta instância considerando a abertura dos CDs 4 e 6 é ilustrado na Figura 19.



Figura 19 - Resultados da instância 8

BEST SOLUTION:

---

END  
 BEST ITER 1906      COST 29661682      TIME 5.625s

---

FACTORY	USED	OPEN DC	UCR-Fw	USED	DEMANDS
Factory 1	44%	Warehouse 4	0.2600	88%	42
Factory 2	18%	Warehouse 6	0.1228	99%	108

---

Fonte: do autor.

A Figura 19 demonstra que, como no resultado da instância anterior, apenas duas fábricas são responsáveis pela distribuição dos produtos aos CDs: a fábrica 1, com utilização de 44% de sua capacidade, atende ao CD 4; e a fábrica 2, com 18% de sua capacidade produtiva, atende ao CD 6.

Igualmente ao resultado obtido anteriormente, o CD 6, que apresenta menor índice  $UCR - F_w$ , tem 99% de sua capacidade usada na distribuição de produtos para 108 clientes, enquanto que o CD 4, que apresenta um valor maior de  $UCR - F_w$ , tem sua utilização reduzida a 88% com atendimento a demanda de 42 clientes.

A Tabela 6 apresenta um comparativo entre o valor da solução inicial e final obtidos para cada instância do cenário 2. O percentual médio de melhoria foi de apenas 1,05%, com destaque para a instância 7, onde a melhor solução encontrada foi justamente a solução inicial.

Tabela 6 - Comparativo entre solução inicial e final no cenário 2

Instância	Solução Inicial	Solução Final	Melhoria
6	31.822.500	31.224.000	1,88%
7	30.811.316	30.811.316	0,00%
8	30.044.222	29.661.682	1,27%
<b>Média</b>			<b>1,05%</b>

Fonte: do autor.

A Tabela 7 apresenta um comparativo entre os resultados obtidos com a heurística e os valores ótimos encontrados por Farias e Borenstein (2012). Observe-se que para as instâncias 6 e 7 foram encontrados valores muito próximos ao resultado ótimo, com *gap* de 0,41% e 0,18% respectivamente.

Tabela 7 - Comparativo entre a solução ótima e a heurística no cenário 2

Instância	Resultado Ótimo			Heurística			gap
	CDs	Custo (\$)	Tempo (s)	CDs	Custo \$	Tempo (s)	
6	4	31.098.000	2,45	7	31.224.000	0,53	0,41%
7	8	30.755.440	3,97	2	30.811.316	1,46	0,18%
8	7	29.169.246	9,61	2	29.661.682	5,63	1,69%
<b>Média</b>			<b>5,34</b>			<b>2,54</b>	<b>0,76%</b>

Fonte: do autor.

Em relação ao número de CDs abertos, na instância 6 o resultado ótimo considera a abertura de apenas 4, enquanto que a heurística necessitou abrir 7 CDs para conseguir uma melhor solução. Para as instâncias 7 e 8, a heurística abriu apenas 2 CDs, enquanto a solução ótima compreende a abertura de 8 e 7 CDs respectivamente.

Quanto ao tempo médio de execução, os resultados ótimos puderam ser obtidos pelo CPLEX em 5,34 segundos, enquanto a heurística resolveu as instâncias em 2,54 segundos, o que representa uma redução de 52,43% no tempo médio de execução para essas instâncias.

No que se refere ao valor da função objetivo, foi possível obter resultados em média 0,76% superiores às soluções ótimas encontradas pelo CPLEX, demonstrando que, para este cenário, a abordagem heurística proposta foi eficiente tanto no tempo de execução quanto na qualidade da solução encontrada.

Lee e Kwon (2010) trabalharam com seis instâncias que admitem a abertura de 10 CDs, sendo atendidos por 5 fábricas. Das seis instâncias, três consideram a existência de 20 clientes, e outras três, 30 clientes, com fornecimento de 3, 4 e 5 produtos distintos. Para as quatro estruturas de custos distintas abordadas pelos autores, o *gap* médio foi de 4,77% e tempo de execução de 17,35 segundos nestas instâncias.

Embora o cenário analisado nesta dissertação considere a existência de apenas 3 fábricas, os 10 CDs atendem a 150 clientes com demanda de 10, 50 e 100 produtos. Assim, pode-se concluir que as alterações realizadas no método proposto por Lee e Kwon (2010) e aplicadas nesta dissertação mostraram-se eficientes para o cenário em questão, visto que uma instância mais complexa pôde ser resolvida em um tempo 85,36% menor e com um *gap* 84,07% inferior ao desses autores.

### 4.3 CENÁRIO 3

No cenário 3 foi considerada uma cadeia de suprimentos com a possibilidade de instalação de até 20 CDs, atendendo a 150 clientes, com demanda de 1.575.000 unidades de 10 produtos distintos na instância 9, 1.576.000 unidades de 50 produtos diferentes na instância 10, e 100 produtos com demanda total de 1.583.100 unidades na instância 11. A Tabela 8 ilustra a configuração da cadeia de suprimentos considerada neste cenário.

**Tabela 8 - Configuração da cadeia de suprimentos do cenário 3**

Instância	Fornecedores	Matérias-Primas	Fábricas	CDs	Produtos	Clientes	Demanda
9	5	5	3	20	10	150	1.575.000
10	5	5	3	20	50	150	1.576.000
11	5	5	3	20	100	150	1.583.100

Fonte: do autor.

Na instância 9, a melhor solução, com valor de \$30.275.000, foi obtida em 1,090 segundos a partir de uma solução inicial de \$31.194.000, o que representa uma melhoria de 2,95% entre a solução inicial e a melhor solução. Um resumo dessa solução, que considera a abertura de doze CDs, é ilustrado na Figura 20.

**Figura 20 - Resultados da instância 9**

**BEST SOLUTION:**

---

**END**  
**BEST ITER 1632    COST 30275000    TIME 1.090s**

---

FACTORY	USED	OPEN DC	UCR-Fw	USED	DEMANDS
Factory 3	26%	Warehouse 4	0.2600	98%	47
Factory 1	77%	Warehouse 5	1.0000	92%	8
Factory 1	77%	Warehouse 6	1.0000	97%	13
Factory 3	26%	Warehouse 7	1.0000	98%	9
Factory 1	77%	Warehouse 8	1.0000	98%	11
Factory 3	26%	Warehouse 9	1.0000	88%	7
Factory 1	77%	Warehouse 10	1.0000	94%	11
Factory 3	26%	Warehouse 11	1.0000	91%	9
Factory 1	77%	Warehouse 12	1.0000	98%	13
Factory 1	77%	Warehouse 13	1.0000	97%	9
Factory 1	77%	Warehouse 14	1.0000	97%	9
Factory 3	26%	Warehouse 15	1.0000	40%	4

Fonte: do autor.

Na Figura 20, observa-se que os CDs abertos são atendidos por apenas duas fábricas: a 1, que com 77% de sua capacidade atende aos CDs 5, 6, 8, 10, 12, 13, e 14; e a 3, que com 26% da capacidade produtiva distribui produtos aos CDs 4, 7, 9, 11 e 15.

O CD 4, que apresenta o menor índice  $UCR - F_w$ , atende a 47 clientes com utilização de 98% de sua capacidade. O CD com menor utilização é o número 15, com 40% de capacidade no atendimento a 4 clientes.

O resultado da décima instância considera a abertura de doze CDs ao custo total de \$32.487.848, obtido no tempo de 2,162 segundos. A solução inicial encontrada para essa instância possuía o custo de \$32.813.048, podendo ser reduzida em 0,99% para a obtenção da melhor solução. A Figura 21 apresenta o resultado encontrado para a instância 10.

Figura 21 - Resultados da instância 10

BEST SOLUTION:

---

END  
BEST ITER 60      COST 32487848      TIME 2.162s

---

FACTORY	USED	OPEN DC	UCR-Fw	USED	DEMANDS
Factory 3	31%	Warehouse 4	0.2600	98%	47
Factory 1	64%	Warehouse 5	1.0000	92%	8
Factory 3	31%	Warehouse 6	1.0000	97%	13
Factory 3	31%	Warehouse 7	1.0000	98%	9
Factory 1	64%	Warehouse 8	1.0000	98%	11
Factory 1	64%	Warehouse 9	1.0000	88%	7
Factory 3	31%	Warehouse 10	1.0000	94%	11
Factory 3	31%	Warehouse 11	1.0000	91%	9
Factory 1	64%	Warehouse 12	1.0000	98%	13
Factory 1	64%	Warehouse 13	1.0000	97%	9
Factory 1	64%	Warehouse 14	1.0000	97%	9
Factory 1	64%	Warehouse 18	1.0000	50%	4

---

Fonte: do autor.

Observa-se que duas fábricas são responsáveis pelo abastecimento dos CDs. A fábrica 1, com 64% de sua capacidade produtiva utilizada, fornece produtos para os CDs 5, 8, 9, 12, 13, 14 e 18. A fábrica 3 atende aos CDs 4, 6, 7, 10 e 11 com 31% de utilização de sua capacidade.

Quanto à capacidade dos CDs, observa-se que 4 CDs (4, 7, 8 e 12) têm 98% de sua capacidade utilizada atendendo a um total de 80 clientes, sendo que o CD 4 atende sozinho à demanda de 47 clientes. Os demais CDs, com utilização de capacidade variando entre 50% (CD 18) até 97% (CDs 6, 13 e 14), distribuem produtos aos 70 clientes restantes.

A Figura 22 apresenta um resumo com os resultados obtidos para a instância 11 e a configuração da rede de menor custo, considerando a abertura de doze CDs.

Figura 22 - Resultados da instância 11

BEST SOLUTION:

---

END  
BEST ITER 144      COST 33249280      TIME 4.816s

---

FACTORY	USED	OPEN DC	UCR-Fw	USED	DEMANDS
Factory 2	15%	Warehouse 4	0.2600	99%	47
Factory 2	15%	Warehouse 5	1.0000	92%	8
Factory 3	9%	Warehouse 6	1.0000	98%	13
Factory 2	15%	Warehouse 7	1.0000	98%	9
Factory 3	9%	Warehouse 8	1.0000	99%	11
Factory 1	34%	Warehouse 10	1.0000	95%	11
Factory 1	34%	Warehouse 11	1.0000	92%	9
Factory 1	34%	Warehouse 12	1.0000	99%	13
Factory 2	15%	Warehouse 13	1.0000	97%	9
Factory 2	15%	Warehouse 14	1.0000	97%	9
Factory 3	9%	Warehouse 15	1.0000	40%	4
Factory 2	15%	Warehouse 17	1.0000	83%	7

---

Fonte: do autor.

Na instância 11, a solução inicial teve custo de \$34.651.948, o qual pôde ser reduzido 4,05% com os procedimentos adotados, resultando em uma solução final de \$33.249.280, em 4,816 segundos. Na Figura 22 pode-se constatar que todas as fábricas enviam produtos aos CDs nessa instância, sendo que a fábrica 1, com 34% de sua capacidade utilizada, atende aos CDs 10, 11 e 12; a fábrica 2, com 15% de sua capacidade supre as demandas dos CDs 4, 5, 7, 13, 14 e 17; e a fábrica 3, com 9% de utilização, distribui produtos para os CDs 6, 8 e 15.

Quanto aos CDs, observa-se que os mais utilizados (com 99% de uso), são o 4, que atende a 47 clientes, o 8, distribuindo para 11 clientes e o 12, que atende a 13 clientes; enquanto que o CD 15 atende apenas a 4 clientes com 40% de sua capacidade.

Na Tabela 9 é apresentado um comparativo entre o valor da solução inicial obtida para cada instância e o valor da melhor solução encontrada (solução final). Observa-se que o percentual de melhoria variou entre 0,99% (para a instância 10) e 4,05% (para a instância 11), com média de 2,66% de melhoria para as instâncias do terceiro cenário.

**Tabela 9 - Comparativo entre solução inicial e final no cenário 3**

Instância	Solução Inicial	Solução Final	Melhoria
9	31.194.000	30.275.000	2,95%
10	32.813.048	32.487.848	0,99%
11	34.651.948	33.249.280	4,05%
<b>Média</b>			<b>2,66%</b>

Fonte: do autor.

A Tabela 10 apresenta uma comparação entre os resultados obtidos pela heurística e os valores ótimos de Farias e Borenstein (2012). Observa-se que, embora os tempos de execução tenham sido reduzidos pelo procedimento heurístico, os custos finais foram expressivamente maiores.

**Tabela 10 - Comparativo entre a solução ótima e a heurística no cenário 3**

Instância	Resultado Ótimo			Heurística			gap
	CDs	Custo (\$)	Tempo (s)	CDs	Custo (\$)	Tempo (s)	
9	12	28.816.500	3,93	12	30.275.000	1,09	5,06%
10	13	30.880.456	10,97	12	32.487.848	2,16	5,21%
11	13	31.226.678	39,62	12	33.249.280	4,82	6,48%
<b>Média</b>			<b>18,17</b>			<b>2,69</b>	<b>5,58%</b>

Fonte: do autor.

Para este cenário, o número de CDs abertos na solução ótima e na heurística é semelhante, variando em apenas uma unidade nas instâncias 10 e 11, onde a solução ótima considera a abertura de 13 CDs e a heurística, 12.

Quanto ao tempo médio de execução, o CPLEX resolveu as instâncias em 18,17 segundos, enquanto a heurística conseguiu reduzir o tempo em 85,31%, obtendo resultados em 2,69 segundos. Em contrapartida, o valor da função objetivo encontrado pela heurística foi, em média, 5,58% superior ao valor obtido pelo CPLEX, indicando que, para este cenário, a heurística mostra-se eficiente no tempo de execução, porém, obtendo resultados distantes dos valores ótimos.

Lee e Kwon (2010) trabalharam com 6 instâncias que admitem a abertura de 20 CDs, sendo atendidos por 10 fábricas. Das 6 instâncias, 3 consideram a existência de 60 clientes, e as outras 3, 80 clientes, com fornecimento de 3, 4 e 5 produtos distintos. Os autores trabalharam com 4 estruturas de custo distintas e obtiveram um *gap* médio de 3,81% e tempo médio de execução de 117,52 segundos.

O método aplicado nesta dissertação foi capaz de reduzir os tempos de Lee e Kwon (2010) em 97,71%, porém o *gap* foi 46,46% superior. Um possível motivo para essa diferença expressiva refere-se à maior complexidade do cenário aqui considerado, pois enquanto os autores consideraram uma cadeia com no máximo 5 produtos e atendimento a 80 clientes, aqui foram considerados até 100 produtos distintos demandados por 150 clientes.

Outro motivo para essa diferença pode estar relacionado ao fato de os autores terem solucionado parte do problema na otimalidade, com a utilização do CPLEX, enquanto que nesta dissertação optou-se por resolver todo o problema de maneira heurística.

#### 4.4 CENÁRIO 4

A cadeia de suprimentos considerada no quarto cenário admite a instalação de até 30 CDs que atendam a 150 clientes, com demanda de 1.575.000 unidades de 10 produtos distintos na instância 12, 1.576.200 unidades de 50 produtos diferentes na instância 13, e 100 produtos com demanda total de 1.583.100 unidades na instância 14.

A Tabela 11 apresenta a configuração da cadeia de suprimentos considerada neste cenário.

**Tabela 11 - Configuração da cadeia de suprimentos do cenário 4**

Instância	Fornecedores	Matérias-Primas	Fábricas	CDs	Produtos	Clientes	Demanda
12	5	5	3	30	10	150	1.575.000
13	5	5	3	30	50	150	1.576.200
14	5	5	3	30	100	150	1.583.100

Fonte: do autor.

Para a instância 12 foi encontrada uma solução inicial com valor de \$30.930.500, que foi reduzida em 5,32%, obtendo o melhor resultado ao custo de \$29.284.500 em 1,945 segundos. A Figura 23 ilustra o resumo do resultado desta solução, que considera a abertura de doze CDs.

**Figura 23 - Resultados da instância 12**

BEST SOLUTION:

END					
BEST ITER 2389		COST 29284500		TIME 1.945s	
FACTORY	USED	OPEN DC	UCR-Fw	USED	DEMANDS
Factory 2	12%	Warehouse 4	0.2600	98%	47
Factory 2	12%	Warehouse 5	1.0000	92%	8
Factory 2	12%	Warehouse 6	1.0000	97%	13
Factory 3	10%	Warehouse 7	1.0000	98%	9
Factory 1	51%	Warehouse 8	1.0000	98%	11
Factory 1	51%	Warehouse 10	1.0000	94%	11
Factory 1	51%	Warehouse 11	1.0000	91%	9
Factory 3	10%	Warehouse 12	1.0000	98%	13
Factory 1	51%	Warehouse 13	1.0000	97%	9
Factory 1	51%	Warehouse 14	1.0000	97%	9
Factory 2	12%	Warehouse 17	1.0000	47%	4
Factory 3	10%	Warehouse 30	1.0000	76%	7

Fonte: do autor.

Na Figura 23 observa-se que três fábricas abastecem os CDs abertos. A fábrica 1, com 51% de sua capacidade utilizada, atende aos CDs 8, 10, 11, 13 e 14. A fábrica 2, com 12% de utilização, distribui produtos para os CDs 4, 5, 6 e 17. A fábrica 3 tem 10% de sua capacidade usada para suprir a necessidade de produtos dos CDs 7, 12 e 30.

Os CDs 4, 7, 8 e 12 necessitam de 98% de sua capacidade total para o atendimento a 80 clientes. Os outros clientes são atendidos pelos demais CDs, que utilizam entre 47% (CD 17) e 97% (CDs 6, 13 e 14) de suas capacidades.

Um resultado de \$32.029.352 foi encontrado para a instância 13 a partir de uma solução inicial de \$33.752.884 (com valor 5,11% superior ao melhor resultado). A melhor solução leva em conta a abertura de doze CDs e foi obtida em 2,529 segundos. Os resultados para essa instância são exibidos na Figura 24.

Três fábricas são utilizadas para suprir as necessidades de produtos da cadeia de suprimentos considerada nessa instância. Observa-se, na Figura 24, que 53% da capacidade da fábrica 1 é utilizada para abastecer os CDs 8, 10, 14, 21, 24

e 27; a fábrica 2 atende aos CDs 12 e 29 com apenas 3% de sua capacidade total; e a fábrica 3, com 26% de sua capacidade, distribui produtos para os CDs 4, 6, 7 e 22.

**Figura 24 - Resultados da instância 13**

**BEST SOLUTION:**

---

**END**  
**BEST ITER 906      COST 32029352      TIME 2.529s**

---

FACTORY	USED	OPEN DC	UCR-Fw	USED	DEMANDS
Factory 3	26%	Warehouse 4	0.2600	98%	47
Factory 3	26%	Warehouse 6	1.0000	97%	13
Factory 3	26%	Warehouse 7	1.0000	98%	9
Factory 1	53%	Warehouse 8	1.0000	98%	11
Factory 1	53%	Warehouse 10	1.0000	94%	11
Factory 2	3%	Warehouse 12	1.0000	98%	13
Factory 1	53%	Warehouse 14	1.0000	97%	9
Factory 1	53%	Warehouse 21	1.0000	88%	7
Factory 3	26%	Warehouse 22	1.0000	87%	8
Factory 1	53%	Warehouse 24	1.0000	68%	9
Factory 1	53%	Warehouse 27	1.0000	34%	4
Factory 2	3%	Warehouse 29	1.0000	63%	9

---

Fonte: do autor.

O CD 4, que apresenta o menor valor de  $UCR - F_w$ , atende a 47 clientes com utilização de 98% de sua capacidade total. Os CDs 7, 8 e 12 também utilizam 98% de sua capacidade na distribuição de produtos para 9, 11 e 13 clientes, respectivamente. Os demais CDs têm sua taxa de utilização de capacidade variando entre 34% (CD 27) e 97% (CDs 6 e 14).

A Figura 25 apresenta os resultados obtidos no tempo de 3,418 segundos para a instância 14. Partindo de uma solução inicial de \$31.429.914, foi possível melhorar o resultado em 5,38% com a aplicação dos procedimentos de troca de arcos e CDs, obtendo uma configuração de rede de cadeia de suprimentos ao custo de \$29.738.192 mediante abertura de doze CDs.

**Figura 25 - Resultados da instância 14**

**BEST SOLUTION:**

---

**END**  
**BEST ITER 343      COST 29738192      TIME 3.418s**

---

FACTORY	USED	OPEN DC	UCR-Fw	USED	DEMANDS
Factory 1	81%	Warehouse 4	0.2600	99%	47
Factory 1	81%	Warehouse 5	1.0000	92%	8
Factory 3	11%	Warehouse 6	1.0000	98%	13
Factory 2	7%	Warehouse 8	1.0000	99%	11
Factory 3	11%	Warehouse 9	1.0000	50%	4
Factory 2	7%	Warehouse 10	1.0000	95%	11
Factory 2	7%	Warehouse 11	1.0000	92%	9
Factory 1	81%	Warehouse 12	1.0000	99%	13
Factory 3	11%	Warehouse 13	1.0000	76%	7
Factory 1	81%	Warehouse 14	1.0000	97%	9
Factory 3	11%	Warehouse 25	1.0000	79%	9
Factory 2	7%	Warehouse 30	1.0000	98%	9

---

Fonte: do autor.



Na Figura 25 observa-se que as três fábricas estão sendo utilizadas, sendo que a 1, com 81% de sua capacidade de produção, atende aos CDs 4, 5, 12 e 14; a fábrica 2 utiliza apenas 7% de sua capacidade, suprimento a demanda dos CDs 8, 10, 11 e 30; e a fábrica 3, com 11% de sua capacidade produtiva, distribui produtos para os CDs 6, 9, 13 e 25.

Quanto à utilização dos CDs, constata-se que, como nas instâncias anteriores, o CD 4 é o mais utilizado, com 99% de sua capacidade total, no atendimento a 47 clientes. Com o mesmo percentual de utilização, os CDs 8 e 12 atendem a 11 e 13 clientes, respectivamente. Os CDs 6 e 30 distribuem produtos para 13 e 9 clientes, com 98% de uso de sua capacidade. Os demais CDs têm utilização variando entre 50% (CD 9) e 97% (CD 14).

Uma comparação entre as soluções iniciais e finais para cada instância do cenário 4 é ilustrada na Tabela 12. Observa-se que, em média, a solução inicial pode ser melhorada em 5,27% em relação à melhor solução encontrada nas instâncias, com percentual de melhoria variando entre 5,11% (instância 13) e 5,38% (instância 14).

**Tabela 12 - Comparativo entre solução inicial e final no cenário 4**

Instância	Solução Inicial	Solução Final	Melhoria
12	30.930.500	29.284.500	5,32%
13	33.752.884	32.029.352	5,11%
14	31.429.914	29.738.192	5,38%
<b>Média</b>			<b>5,27%</b>

Fonte: do autor.

Já a Tabela 13 realiza um comparativo entre a solução ótima e os tempos obtidos por Farias e Borenstein (2012) e o os resultados da heurística.

**Tabela 13 - Comparativo entre a solução ótima e a heurística no cenário 4**

Instância	Resultado Ótimo			Heurística			gap
	CDs	Custo (\$)	Tempo (s)	CDs	Custo (\$)	Tempo (s)	
12	14	27.681.500	4,39	12	29.284.500	1,95	5,79%
13	13	29.728.252	13,54	12	32.029.352	2,53	7,74%
14	13	27.813.526	36,44	12	29.738.192	3,42	6,92%
<b>Média</b>			<b>18,12</b>			<b>2,63</b>	<b>6,82%</b>

Fonte: do autor.

Comparados à solução ótima, os tempos de execução de cada instância pela heurística foram bastante reduzidos pela heurística, entretanto, o mesmo não ocorreu para o custo final fornecido pela função objetivo, sendo encontrados *gaps* significativos, acima de 5%. Outra observação interessante é que a solução ótima considerou a abertura de mais CDs do que a heurística, pois essa obteve as

melhores soluções com a abertura de doze CDs para todas as instâncias, total sempre maior para a solução ótima.

Quanto ao tempo médio de execução, enquanto o CPLEX levou 18,12 segundos para encontrar o resultado para as instâncias, a heurística os obteve em apenas 2,63 segundos; porém, os resultados obtidos pela heurística ficaram, em média, 6,82% acima do valor ótimo encontrado pelo CPLEX. Considera-se, portanto, que a heurística mostrou-se eficiente quanto ao tempo de execução, reduzindo-o em 85,49% neste cenário, porém com um *gap* significativo entre as soluções obtidas.

#### 4.5 CENÁRIO 5

O quinto cenário considera uma cadeia de suprimentos com a possibilidade de abertura de até 40 CDs com atendimento a 150 clientes com demanda total de 1.575.000 unidades de 10 produtos distintos na instância 15; 1.576.200 unidades de 50 produtos diferentes na instância 16; e 100 produtos com demanda total de 1.583.100 unidades na instância 17. Para cada uma das instâncias estão associados 5 fornecedores, 5 tipos de matéria-prima e três fábricas. A Tabela 14 detalha a configuração da cadeia de suprimentos considerada neste cenário.

**Tabela 14 - Configuração da cadeia de suprimentos do cenário 5**

Instância	Fornecedores	Matérias-Primas	Fábricas	CDs	Produtos	Clientes	Demanda
15	5	5	3	40	10	150	1.575.000
16	5	5	3	40	50	150	1.576.200
17	5	5	3	40	100	150	1.583.100

Fonte: do autor.

Na instância 15 foi encontrada uma solução inicial com valor de \$31.417.000, melhorada em 4,83%, gerando uma solução final ao custo de \$29.899.900 em 0,322 segundos, mediante abertura de nove CDs. As três fábricas distribuem produtos para os CDs abertos, sendo que a fábrica 1 utiliza 75% de sua capacidade de produção e envia produtos aos CDs 4, 10, 17 e 40; a fábrica 2 tem sua capacidade 8% utilizada, atendendo aos CDs 7 e 24; e a fábrica 3, com 11% de utilização, supre as demandas dos CDs 5, 6 e 8.

Observa-se que os CDs 4 e 24 apresentam valores de  $UCR - F_w$  inferiores aos demais CDs, sendo atribuídas a eles as demandas de 47 e 37 clientes, respectivamente. O CD 4 utiliza 98% de sua capacidade, enquanto o CD 24 tem 97% de sua capacidade utilizada. Constata-se, também, que o CD 40, que possui o

maior valor de  $UCR - F_w$  é o que tem a menor utilização, de 69%, distribuindo produtos a 7 clientes. Na Figura 26 pode-se observar os resultados delineados à instância 15.

**Figura 26 - Resultados da instância 15**

BEST SOLUTION:

---

END  
BEST ITER 126      COST 29899900      TIME 0.322s

---

FACTORY	USED	OPEN DC	UCR-Fw	USED	DEMANDS
Factory 1	75%	Warehouse 4	0.2600	98%	47
Factory 3	11%	Warehouse 5	1.0000	92%	8
Factory 3	11%	Warehouse 6	1.0000	97%	13
Factory 2	8%	Warehouse 7	1.0000	98%	9
Factory 3	11%	Warehouse 8	1.0000	98%	11
Factory 1	75%	Warehouse 10	1.0000	94%	11
Factory 1	75%	Warehouse 17	1.0000	83%	7
Factory 2	8%	Warehouse 24	0.3276	97%	37
Factory 1	75%	Warehouse 40	1.2680	69%	7

---

Fonte: do autor.

Para a instância 16, a solução inicial foi de \$33.209.832, reduzida em 4,13%, possibilitando solução final de \$31.839.320 em 2,707 segundos, a qual considera a abertura de nove CDs. A Figura 27 exibe os resultados dessa instância.

**Figura 27 - Resultados da instância 16**

BEST SOLUTION:

---

END  
BEST ITER 369      COST 31839320      TIME 2.707s

---

FACTORY	USED	OPEN DC	UCR-Fw	USED	DEMANDS
Factory 1	69%	Warehouse 4	0.2600	98%	47
Factory 2	6%	Warehouse 6	1.0000	97%	13
Factory 2	6%	Warehouse 7	1.0000	98%	9
Factory 3	16%	Warehouse 8	1.0000	98%	11
Factory 1	69%	Warehouse 10	1.0000	94%	11
Factory 1	69%	Warehouse 14	1.0000	86%	8
Factory 3	16%	Warehouse 24	0.3276	97%	37
Factory 2	6%	Warehouse 31	1.3311	91%	7
Factory 2	6%	Warehouse 34	1.3480	96%	7

---

Fonte: do autor.

As três fábricas suprem as necessidades de produtos dos CDs, sendo que a fábrica 1, que tem 69% de sua capacidade produtiva utilizada, envia sua produção aos CDs 4, 10 e 14. A fábrica 2, utilizando apenas 6% de sua capacidade total, atende a demanda dos CDs 6, 7, 31 e 34. Por fim, a fábrica 3, com 16% de utilização, distribui produtos aos CDs 8 e 24.

Observa-se, ainda, que as maiores demandas estão alocadas aos CDs com menores valores de  $UCR - F_w$ , como na instância anterior, onde o CD 4 está com 98% de sua capacidade total utilizada para atendimento de 47 clientes, e o CD 24,

com 97% de sua capacidade, atendendo a 37 clientes. Os CDs 31 e 34, por sua vez, apresentam os maiores valores de  $UCR - F_w$  e possuem as menores demandas, sendo responsáveis pelo atendimento das necessidades de 7 clientes cada.

Finalmente, a Figura 28 apresenta os resultados para a instância 17, resolvida em 3,99 segundos, com solução final de \$29.780.336, valor 3,31% inferior ao da solução inicial, de \$30.800.916, também necessitando a abertura de nove CDs.

**Figura 28 – Resultados da instância 17**

**BEST SOLUTION:**

---

**END**  
**BEST ITER 352      COST 29780336      TIME 3.990s**

---

FACTORY	USED	OPEN DC	UCR-Fw	USED	DEMANDS
Factory 1	91%	Warehouse 4	0.2600	99%	47
Factory 2	11%	Warehouse 5	1.0000	92%	8
Factory 1	91%	Warehouse 6	1.0000	98%	13
Factory 1	91%	Warehouse 8	1.0000	99%	11
Factory 1	91%	Warehouse 9	1.0000	89%	7
Factory 2	11%	Warehouse 10	1.0000	95%	11
Factory 1	91%	Warehouse 13	1.0000	97%	9
Factory 2	11%	Warehouse 24	0.3276	98%	37
Factory 2	11%	Warehouse 34	1.3480	97%	7

---

Fonte: do autor

Analisando a Figura 28 pode-se constatar que estão sendo utilizadas apenas as fábricas 1 e 2. A fábrica 1, com utilização de 91% de sua capacidade produtiva, atende aos CDs 4, 6, 8, 9 e 13, enquanto que a fábrica 2, com 11% de utilização, envia seus produtos aos CDs 5, 10, 24 e 34.

Os CDs 4 e 24 atendem a um número maior de clientes, 47 e 37, respectivamente, tendo o valor de  $UCR - F_w$  mais reduzido que os demais CDs. Em contrapartida, o CD 34, atende ao menor número de clientes, e o seu  $UCR - F_w$  apresenta valores superiores aos demais. Observa-se, ainda, que a taxa de utilização de CDs varia de 89% (CD 9) até 99% (CDs 4 e 8) para essa solução.

A comparação entre os valores das soluções iniciais e finais obtidas para cada instância do cenário 5 é realizada na Tabela 15. Observa-se que, em média, a solução inicial pode ser melhorada 4,09% neste cenário, apresentando variação de 3,31% (para a instância 17) a 4,83% (para a instância 15).

**Tabela 15 - Comparativo entre solução inicial e final no cenário 5**

Instância	Solução Inicial	Solução Final	Melhoria
15	31.417.000	29.899.900	4,83%
16	33.209.832	31.839.320	4,13%
17	30.800.916	29.780.336	3,31%
<b>Média</b>			<b>4,09%</b>

Fonte: do autor.

Um comparativo entre os resultados ótimos encontrados por Farias e Borenstein (2012) e os resultados obtidos nesta dissertação é apresentado na Tabela 16.

**Tabela 16 - Comparativo entre a solução ótima e a heurística no cenário 5**

Instância	Resultado Ótimo			Heurística			gap
	CDs	Custo (\$)	Tempo (s)	CDs	Custo (\$)	Tempo (s)	
15	17	28.525.950	10,74	9	29.899.900	0,32	4,82%
16	14	29.947.862	15,03	9	31.839.320	2,71	6,32%
17	15	28.943.138	54,42	9	29.780.336	3,99	2,89%
<b>Média</b>			<b>26,73</b>			<b>2,34</b>	<b>4,67%</b>

Fonte: do autor.

Enquanto a heurística encontrou soluções com a abertura de nove CDs para todas as instâncias, o resultado ótimo compreendeu a instalação de 17, 14 e 15 unidades nas instâncias 15, 16 e 17, respectivamente, indicando uma redução considerável no número de CDs abertos.

Quanto aos resultados, na instância 17 a heurística aproximou-se do valor ótimo, com diferença de 2,89%. Já para a instância 16, a diferença entre os valores ótimo e heurístico foi expressivamente maior, totalizando 6,32%. Em média, a diferença entre os resultados ótimos e heurísticos neste cenário foi de 4,67%.

Em relação ao tempo médio de execução, a heurística foi capaz de obter resultados em um tempo de 2,34 segundos, enquanto o CPLEX demorou 26,73 segundos, o que representa uma redução de 91,25% no tempo médio de execução. Assim, pode-se considerar que a heurística é eficiente no tempo de execução para o cenário analisado, sendo capaz de obter bons resultados em um tempo bastante reduzido.

#### 4.6 CENÁRIO 6

O cenário 6 considera uma cadeia de suprimentos com a possibilidade de abertura de até 50 CDs com atendimento a 150 clientes com demanda total de 1.575.000 unidades de 10 produtos distintos na instância 18, 1.576.200 unidades de 50 produtos diferentes na instância 19, e 100 produtos com demanda total de 1.583.100 unidades na instância 20. Os fornecedores, as matérias-primas e as fábricas são em igual quantidade para as três instâncias, configurando-se como 5, 5 e 3 respectivamente, conforme detalhado na Tabela 17.

**Tabela 17 - Configuração da cadeia de suprimentos do cenário 6**

Instância	Fornecedores	Matérias-Primas	Fábricas	CDs	Produtos	Clientes	Demanda
18	5	5	3	50	10	150	1.575.000
19	5	5	3	50	50	150	1.576.200
20	5	5	3	50	100	150	1.583.100

Fonte: do autor.

A instância 18 foi resolvida em 0,557 segundos, tendo uma solução inicial com custo de \$30.071.500 e a melhor solução igual a \$29.234.500, valor 2,78% inferior ao resultado inicial. A Figura 29 apresenta a melhor solução obtida, com a abertura de doze CDs.

**Figura 29 - Resultados da instância 18**

BEST SOLUTION:

---

END  
BEST ITER 165      COST 29234500      TIME 0.557s

---

FACTORY	USED	OPEN DC	UCR-Fw	USED	DEMANDS
Factory 2	11%	Warehouse 4	0.2600	98%	47
Factory 1	53%	Warehouse 6	1.0000	97%	13
Factory 1	53%	Warehouse 7	1.0000	98%	9
Factory 3	11%	Warehouse 8	1.0000	98%	11
Factory 2	11%	Warehouse 10	1.0000	94%	11
Factory 1	53%	Warehouse 11	1.0000	91%	9
Factory 1	53%	Warehouse 12	1.0000	98%	13
Factory 3	11%	Warehouse 13	1.0000	97%	9
Factory 2	11%	Warehouse 14	1.0000	97%	9
Factory 3	11%	Warehouse 23	1.0000	78%	8
Factory 1	53%	Warehouse 28	1.0000	64%	7
Factory 3	11%	Warehouse 33	1.0000	30%	4

Fonte: do autor.

Observa-se na Figura 29 que as 3 fábricas estão sendo utilizadas no resultado encontrado. A fábrica 1, com uso de 53% de sua capacidade produtiva, atende aos CDs 6, 7, 11, 12 e 28. A fábrica 2, com 11% de utilização, distribui produtos aos CDs 4, 10 e 14. A fábrica 3, por fim, atende aos CDs 8, 13, 23 e 33 com utilização de 11% de sua capacidade.

Quanto à distribuição de produtos, o CD 4 é que possui o maior número de clientes para atender, sendo o CD com o menor custo de operação. Assim, 98% de sua capacidade é utilizada na distribuição de produtos para 47 clientes. Os demais CDs possuem taxa de utilização variando entre 30% (CD 33) e 98% (CDs 7, 8 e 12).

Os custos identificados para a instância 19 partiram de \$31.586.148, sendo reduzidos em 5,62% com os procedimentos de troca de CDs e arcos, resultando em \$29.810.824, encontrado em 3,642 segundos, com a abertura de doze CDs. A Figura 30 ilustra esse resultado.

**Figura 30 - Resultados da instância 19**

**BEST SOLUTION:**

---

END  
**BEST ITER 663      COST 29810824      TIME 3.642s**

---

FACTORY	USED	OPEN DC	UCR-Fw	USED	DEMANDS
Factory 1	95%	Warehouse 4	0.2600	98%	47
Factory 2	5%	Warehouse 6	1.0000	97%	13
Factory 3	10%	Warehouse 11	1.0000	91%	9
Factory 1	95%	Warehouse 12	1.0000	98%	13
Factory 1	95%	Warehouse 13	1.0000	97%	9
Factory 2	5%	Warehouse 14	1.0000	97%	9
Factory 1	95%	Warehouse 16	1.0000	60%	7
Factory 3	10%	Warehouse 25	1.0000	96%	11
Factory 2	5%	Warehouse 32	1.0000	57%	8
Factory 1	95%	Warehouse 35	1.0000	97%	11
Factory 3	10%	Warehouse 39	1.0000	65%	9
Factory 1	95%	Warehouse 50	1.0000	50%	4

---

Fonte: do autor.

As três fábricas são utilizadas para suprimento das demandas na instância 19. A fábrica 1, com 95% de utilização de sua capacidade produtiva, atende aos CDs 4, 12, 13, 16, 35 e 50. A fábrica 2, com apenas 5% de utilização, distribui seus produtos aos CDs 6, 14 e 32. A fábrica 3, com uso de 10% de sua capacidade de produção, supre a necessidade dos CDs 11, 25 e 39.

Quanto ao atendimento aos clientes, observa-se que o CD 4 possui 47 clientes para atender, com 98% de sua capacidade de distribuição, enquanto o CD 50 possui apenas 4 clientes para atender, com utilização de 50% de sua capacidade total.

A vigésima instância foi resolvida em 4,816 segundos, obtendo um resultado com custo de \$29.855.046, 1,93% inferior ao valor da solução inicial encontrada, de \$30.444.006. O resultado para essa instância, que considera a abertura de doze CDs, é apresentado na Figura 31.

**Figura 31 - Resultados da instância 20**

**BEST SOLUTION:**

---

END  
**BEST ITER 158      COST 29855046      TIME 4.816s**

---

FACTORY	USED	OPEN DC	UCR-Fw	USED	DEMANDS
Factory 1	70%	Warehouse 4	0.2600	99%	47
Factory 3	21%	Warehouse 6	1.0000	98%	13
Factory 3	21%	Warehouse 7	1.0000	98%	9
Factory 3	21%	Warehouse 8	1.0000	99%	11
Factory 3	21%	Warehouse 10	1.0000	95%	11
Factory 3	21%	Warehouse 11	1.0000	92%	9
Factory 2	3%	Warehouse 12	1.0000	99%	13
Factory 3	21%	Warehouse 13	1.0000	97%	9
Factory 1	70%	Warehouse 14	1.0000	97%	9
Factory 1	70%	Warehouse 25	1.0000	35%	4
Factory 2	3%	Warehouse 26	1.0000	89%	8
Factory 1	70%	Warehouse 30	1.0000	76%	7

---

Fonte: do autor.

Os resultados da instância 20 consideram a utilização das 3 fábricas, sendo que a fábrica 1, com 70% de sua capacidade produtiva, é responsável pelo fornecimento de produtos aos CDs 4, 14, 25 e 30; a fábrica 2, com 3% de sua capacidade, atende aos CDs 12 e 26; e a fábrica 3, com 21% de utilização, supre as demandas dos CDs 6, 7, 8, 10, 11 e 13.

Com o menor custo de operação por unidade, expresso pelo índice  $UCR - F_w$ , o CD 4 utiliza 99% de sua capacidade total para atender a 47 clientes. Os CDs 8 e 12 também têm utilização de 99% e suprem a demanda de 11 e 13 clientes, respectivamente. Os demais CDs atendem a 79 clientes, com utilização de CDs variando entre 35% (CD 25) e 98% (CDs 6 e 7).

A Tabela 18 compara as soluções iniciais e finais para cada instância do cenário 6. Observa-se que a instância 19 apresentou maior variação, de 5,62%, enquanto o percentual médio de melhoria ficou em 3,45% para este cenário.

**Tabela 18 - Comparação entre solução inicial e final no cenário 6**

Instância	Solução Inicial	Solução Final	Melhoria
18	30.071.500	29.234.500	2,78%
19	31.586.148	29.810.824	5,62%
20	30.444.006	29.855.046	1,93%
<b>Média</b>			<b>3,45%</b>

Fonte: do autor.

Uma comparação entre os resultados obtidos nesta dissertação e os valores ótimos encontrados por Farias e Borenstein (2012) juntamente com os seus tempos de execução, é realizada na Tabela 19.

**Tabela 19 - Comparativo entre a solução ótima e a heurística no cenário 6**

Instância	Resultado Ótimo			Heurística			gap
	CDs	Custo (\$)	Tempo (s)	CDs	Custo (\$)	Tempo (s)	
18	14	27.532.500	4,96	12	29.234.500	0,56	6,18%
19	14	27.763.300	17,45	12	29.810.824	3,64	7,37%
20	15	27.935.264	38,47	12	29.855.046	4,82	6,87%
<b>Média</b>			<b>20,29</b>			<b>3,01</b>	<b>6,81%</b>

Fonte: do autor.

Neste cenário, a heurística encontrou as melhores soluções considerando a abertura de doze CDs em todas as instâncias, enquanto o resultado ótimo compreendeu a abertura de catorze CDs para as instâncias 18 e 19 e quinze CDs para a instância 20.

Quanto ao custo total, observa-se que em todas as instâncias o valor obtido pela heurística foi significativamente superior ao resultado ótimo encontrado pelo CPLEX, variando entre 6,18% (para a instância 18) e 7,37% (para a instância 19), com um *gap* médio de 6,81% para este cenário. Em contrapartida, o tempo médio de



execução pôde ser reduzido em 85,17%, passando de 20,29 segundos no CPLEX para apenas 3,01 segundos com a heurística. Conclui-se que, para este cenário, a heurística mostra-se eficiente quanto ao tempo de execução, mas os resultados obtidos estão distantes do ótimo encontrado.

#### 4.7 CENÁRIO 7

O sétimo cenário considera uma cadeia de suprimentos com a possibilidade de abertura de até 20 CDs com atendimento a 150 clientes com demanda total de 3.000.600 unidades de 10 produtos distintos na instância 21 e 3.152.400 unidades de 50 produtos diferentes na instância 22. A Tabela 20 apresenta a configuração da cadeia de suprimentos considerada neste cenário.

**Tabela 20 - Configuração da cadeia de suprimentos do cenário 7**

Instância	Fornecedores	Matérias-Primas	Fábricas	CDs	Produtos	Clientes	Demanda
21	5	5	3	20	10	150	3.000.600
22	5	5	3	20	50	150	3.152.400

Fonte: do autor.

A Figura 32 ilustra o resultado obtido para a instância 21, com a abertura de dezenove CDs. A melhor solução, no valor de \$63.570.312, foi obtida em 0,669 segundos, a partir de um valor inicial de \$63.788.948, o que representa uma melhoria de 0,34%.

**Figura 32 - Resultados da instância 21**

```

BEST SOLUTION:
-----
END
BEST ITER 478      COST 63570312      TIME 0.669s
-----
FACTORY           USED  OPEN DC           UCR-Fw           USED  DEMANDS
-----
Factory 3         48%  Warehouse 1         1.3000           20%  10
Factory 1         98%  Warehouse 2         1.1875           97%  39
Factory 2          9%  Warehouse 3         1.3333           13%  4
Factory 3         48%  Warehouse 4         0.2600           96%  24
Factory 1         98%  Warehouse 5         1.0000           87%  4
Factory 1         98%  Warehouse 6         1.0000           85%  6
Factory 3         48%  Warehouse 7         1.0000           83%  4
Factory 3         48%  Warehouse 8         1.0000           85%  5
Factory 3         48%  Warehouse 9         1.0000           96%  4
Factory 3         48%  Warehouse 10        1.0000           98%  6
Factory 3         48%  Warehouse 11        1.0000           97%  5
Factory 2          9%  Warehouse 12        1.0000           86%  6
Factory 2          9%  Warehouse 13        1.0000           82%  4
Factory 2          9%  Warehouse 14        1.0000           82%  4
Factory 3         48%  Warehouse 15        1.0000           95%  5
Factory 3         48%  Warehouse 16        1.0000           98%  6
Factory 3         48%  Warehouse 17        1.0000           90%  4
Factory 2          9%  Warehouse 19        1.0000           96%  4
Factory 2          9%  Warehouse 20        1.0000           89%  6

```

Fonte: do autor.

Observa-se na Figura 32 que as três fábricas são utilizadas na solução obtida pela heurística, sendo que a fábrica 1, com 98% de utilização de sua capacidade produtiva, é responsável pelo abastecimento dos CDs 2, 5 e 6; a fábrica 2, com apenas 9% de sua capacidade utilizada, fornece produtos aos CDs 3, 12, 13, 14, 19 e 20; e a fábrica 3, com uso de 48% de sua capacidade total, atende a demanda dos CDs 1, 4, 7, 8, 9, 10, 11, 15, 16 e 17.

Quanto ao atendimento aos clientes, constata-se que o CD 2 tem o maior número de clientes alocados (39), porém apresenta o terceiro maior valor de  $UCR - F_w$ . Esse fato deve ter ocorrido ao longo do processo de troca de arcos, durante a execução da heurística, significando que, embora o CD apresente um custo de operação por unidade maior, os custos de transporte entre CD e clientes ou de manuseio de produtos no CD devem ter valores mais reduzidos, tornando vantajosa a sua operação.

O CD 4, que possui o menor valor de  $UCR - F_w$ , atende a 24 clientes com utilização de 96% de sua capacidade. A taxa de utilização dos CDs para essa solução varia entre 20% (para o CD 1) e 98% (para os CDs 10 e 16).

A solução encontrada para a instância 22 considera a abertura de 19 CDs, ao custo de \$67.760.184. Iniciando com um custo de \$71.634.312, a heurística foi capaz de obter uma solução com custo 5,41% inferior no tempo de 2,841 segundos. A Figura 33 representa a melhor solução encontrada para essa instância.

**Figura 33 – Resultados da instância 22**

BEST SOLUTION:					
END					
BEST ITER	221	COST	67760184	TIME	2.841s
FACTORY	USED	OPEN DC	UCR-Fw	USED	DEMANDS
Factory 1	94%	Warehouse 1	1.3000	39%	19
Factory 2	17%	Warehouse 2	1.1875	99%	38
Factory 3	39%	Warehouse 4	0.2600	96%	23
Factory 1	94%	Warehouse 5	1.0000	92%	4
Factory 3	39%	Warehouse 6	1.0000	90%	6
Factory 3	39%	Warehouse 7	1.0000	87%	4
Factory 1	94%	Warehouse 8	1.0000	89%	5
Factory 1	94%	Warehouse 9	1.0000	75%	3
Factory 3	39%	Warehouse 10	1.0000	86%	5
Factory 3	39%	Warehouse 11	1.0000	81%	4
Factory 1	94%	Warehouse 12	1.0000	91%	6
Factory 1	94%	Warehouse 13	1.0000	86%	4
Factory 1	94%	Warehouse 14	1.0000	86%	4
Factory 2	17%	Warehouse 15	1.0000	80%	4
Factory 3	39%	Warehouse 16	1.0000	86%	5
Factory 2	17%	Warehouse 17	1.0000	95%	4
Factory 3	39%	Warehouse 18	1.0000	75%	3
Factory 2	17%	Warehouse 19	1.0000	75%	3
Factory 3	39%	Warehouse 20	1.0000	94%	6

Fonte: do autor.

A Figura 33 ilustra a operação das 3 fábricas na instância 22. A fábrica 1, com 94% de sua capacidade utilizada, atende a demanda dos CDs 1, 5, 8, 9, 12, 13 e 14; a fábrica 2, com uso de 17% de sua capacidade, distribui sua produção aos CDs 2, 15, 17 e 19; e a fábrica 3, com 39% de utilização da capacidade produtiva, supre a demanda dos CDs 4, 6, 7, 10, 11, 16, 18 e 20.

Como na instância anterior, observa-se que, embora o CD 2 apresente um custo de abertura maior, os demais custos, como o transporte a partir do CD e o manuseio de produtos no CD, podem tornar vantajosa a operação dessa unidade, justificando a alocação de 38 clientes a esse CD. O mesmo ocorre para o CD 1, que possui o maior valor de  $UCR - F_w$  e, mesmo assim, atende a demanda de 19 clientes.

Na Tabela 21 são comparadas as soluções iniciais e finais obtidas no cenário 7. A instância 21 obteve melhoria de 0,34% na redução de custos e, a instância 22, de 5,41%, o que indica uma redução média de 2,88%.

**Tabela 21 - Comparação entre solução inicial e final no cenário 7**

Instância	Solução Inicial	Solução Final	Melhoria
21	63.788.948	63.570.312	0,34%
22	71.634.312	67.760.184	5,41%
<b>Média</b>			<b>2,88%</b>

Fonte: do autor.

Na Tabela 22 é realizada a comparação entre os resultados ótimos de Farias e Borenstein (2012) e os obtidos pela heurística proposta.

**Tabela 22 - Comparativo entre a solução ótima e a heurística no cenário 7**

Instância	Resultado Ótimo			Heurística			gap
	CDs	Custo (\$)	Tempo (s)	CDs	Custo (\$)	Tempo (s)	
21	15	60.940.660	7,12	19	63.570.312	0,67	4,32%
22	18	63.771.168	13,23	19	67.760.184	2,84	6,26%
<b>Média</b>			<b>10,18</b>			<b>1,76</b>	<b>5,29%</b>

Fonte: do autor.

Neste cenário, a heurística encontrou as melhores soluções considerando a abertura de 19 CDs, enquanto que os resultados ótimos foram obtidos com a abertura de 15 CDs para a instância 21 e 18 CDs para a instância 22.

É possível constatar que, em relação ao valor da função objetivo, a heurística obteve um resultado 4,32% superior ao valor ótimo na instância 21, enquanto que para a instância 22, esta diferença ficou em 6,26%. O *gap* médio entre os resultados para este cenário foi de 5,29%.

Quanto ao tempo médio de execução, o CPLEX resolveu os problemas em 10,18 segundos, enquanto a heurística conseguiu resolvê-los em 1,76 segundos.

Assim, é possível concluir que para o cenário 7 a heurística é eficiente no tempo de execução, sendo capaz de obter resultados razoáveis em um tempo 82,71% inferior ao praticado pelo CPLEX.

#### 4.8 COMPARAÇÃO ENTRE CENÁRIOS

Nas seções anteriores foram apresentados os resultados obtidos pela heurística em cada cenário analisado. Nesta seção, os resultados foram agrupados para verificar o desempenho global da heurística implementada.

Na Tabela 23 faz-se um comparativo entre os valores das soluções iniciais obtidas em cada instância e a solução final, ou seja, a melhor solução identificada durante o processo heurístico. Para as instâncias 4 e 7, os valores iniciais foram os melhores encontrados, enquanto que a solução inicial da instância 3 pôde ser melhorada em 12%. Em média, as soluções iniciais geradas puderam ser melhoradas 3,87% com a aplicação dos procedimentos de troca de arcos e CDs.

**Tabela 23 - Comparativo entre solução inicial e final das 22 instâncias**

<b>Instância</b>	<b>Solução inicial (\$)</b>	<b>Solução final (\$)</b>	<b>Melhoria</b>
1	18.648.520	17.796.420	4,57%
2	18.324.300	16.750.500	8,59%
3	21.141.500	18.605.000	12,00%
4	16.568.600	16.568.600	0,00%
5	16.618.700	15.857.900	4,58%
6	31.822.500	31.224.000	1,88%
7	30.811.316	30.811.316	0,00%
8	30.044.222	29.661.682	1,27%
9	31.194.000	30.275.000	2,95%
10	32.813.048	32.487.848	0,99%
11	34.651.948	33.249.280	4,05%
12	30.930.500	29.284.500	5,32%
13	33.752.884	32.029.352	5,11%
14	31.429.914	29.738.192	5,38%
15	31.417.000	29.899.900	4,83%
16	33.209.832	31.839.320	4,13%
17	30.800.916	29.780.336	3,31%
18	30.071.500	29.234.500	2,78%
19	31.586.148	29.810.824	5,62%
20	30.444.006	29.855.046	1,93%
21	63.788.948	63.570.312	0,34%
22	71.634.312	67.760.184	5,41%
<b>Média</b>			<b>3,87%</b>

Fonte: do autor.

No método proposto por Lee e Kwon (2010), a alocação de clientes aos CDs era realizada de maneira aleatória. Nesta pesquisa, optou-se por alocar as maiores

demandas aos CDs que apresentassem menor valor de *UCR*, obtendo, assim, soluções iniciais bastante próximas dos melhores resultados.

A Tabela 24 apresenta um comparativo do número de CDs abertos na solução ótima e na heurística.

**Tabela 24 - Comparativo do número de CDs abertos nas 22 instâncias**

<b>Instância</b>	<b>Ótimo (qtd)</b>	<b>Heurístico (qtd)</b>
1	7	6
2	9	6
3	4	6
4	13	4
5	10	6
6	4	7
7	8	2
8	7	2
9	12	12
10	13	12
11	13	12
12	14	12
13	13	12
14	13	12
15	17	9
16	14	9
17	15	9
18	14	12
19	14	12
20	15	12
21	15	19
22	18	19

Fonte: do autor.

Em 17 instâncias (1, 2, 4, 5, 7, 8, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19 e 20) as melhores soluções heurísticas necessitaram abrir um número menor de CDs do que na solução ótima, com destaque para a instância 4, onde a heurística encontrou um resultado considerando a abertura de apenas 4 CDs, enquanto a solução ótima compreendeu a abertura de 13 CDs.

É possível verificar, ainda, que apenas na instância 9 ambos os resultados consideraram a abertura do mesmo número de CDs (12 unidades). Nas instâncias 3, 6, 21 e 22, a heurística considerou a abertura de um número maior de CDs do que a solução ótima.

A Tabela 25 apresenta um comparativo entre os valores ótimos e heurísticos para as 22 instâncias, onde é possível constatar que o *gap* teve variação de 0,18% (instância 7) até 7,74% (instância 13), tendo valor médio de 4,98%.

Tabela 25 - Comparativo dos valores ótimos e heurísticos das 22 instâncias

Instância	Ótimo (\$)	Heurístico (\$)	gap (%)
1	16.970.300	17.796.420	4,87%
2	16.541.500	16.750.500	1,26%
3	17.484.800	18.605.000	6,41%
4	15.453.300	16.568.600	7,22%
5	15.051.100	15.857.900	5,36%
6	31.098.000	31.224.000	0,41%
7	30.755.440	30.811.316	0,18%
8	29.169.246	29.661.682	1,69%
9	28.816.500	30.275.000	5,06%
10	30.880.456	32.487.848	5,21%
11	31.226.678	33.249.280	6,48%
12	27.681.500	29.284.500	5,79%
13	29.728.252	32.029.352	7,74%
14	27.813.526	29.738.192	6,92%
15	28.525.950	29.899.900	4,82%
16	29.947.862	31.839.320	6,32%
17	28.943.138	29.780.336	2,89%
18	27.532.500	29.234.500	6,18%
19	27.763.300	29.810.824	7,37%
20	27.935.264	29.855.046	6,87%
21	60.940.660	63.570.312	4,32%
22	63.771.168	67.760.184	6,26%
<b>Média</b>			<b>4,98%</b>

Fonte: do autor.

Lee, Kang e Lee (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.

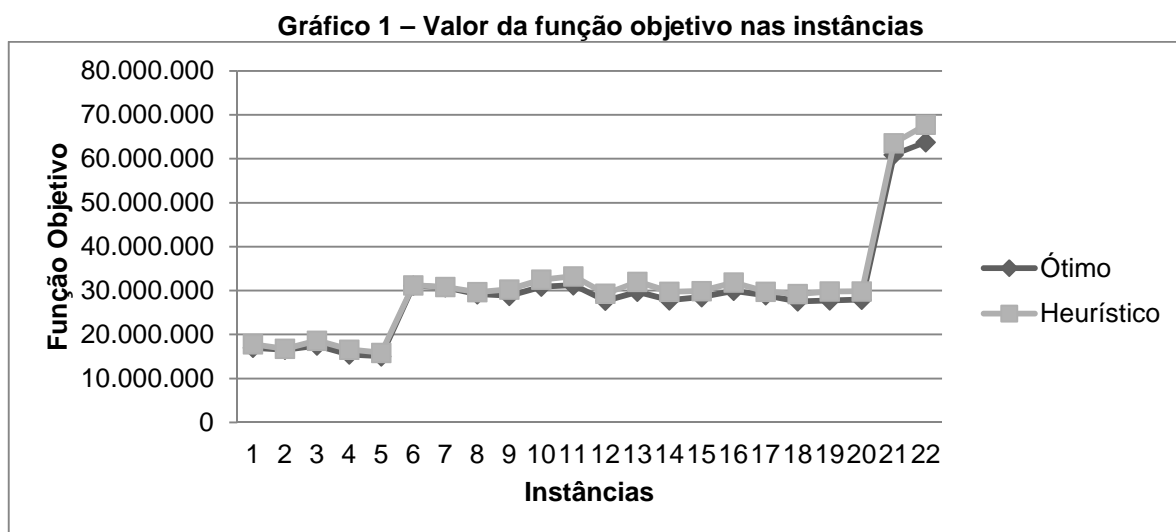
É interessante ressaltar, ainda, que das 20 instâncias propostas por Lee, Kang e Lee (2008), 10 consideravam 20 e 50 clientes e puderam ser resolvidas, enquanto que para as outras 10 instâncias, que continham 70 e 100 clientes, os autores não conseguiram encontrar resultados, pois tempo computacional máximo determinado de 300 segundos foi atingido.

Lee e 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 e Kwon (2010) terem utilizado o CPLEX para resolver a decomposição de suprimentos do problema, obtendo, assim, resultados ótimos nesta etapa. Nesta dissertação 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.

O Gráfico 1 ilustra um comparativo do valor ótimo e heurístico para a função objetivo em cada uma das instâncias analisadas.



Fonte: do autor.

Observa-se no Gráfico 1 que, em geral, as soluções heurísticas ficaram bem próximas aos resultados ótimos, com destaque para as instâncias 6 e 7.

Ainda, apresenta-se na Tabela 26 os 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.

Observa-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%, com destaque para a instância 4 que foi resolvida em 7,65 segundos pelo CPLEX, enquanto que pela heurística foram necessários apenas 0,16 segundos, o que corresponde a uma redução de 97,87% no tempo de execução.

Os tempos de execução obtidos nesta pesquisa variaram de 0,16 segundos (instância 4) até 5,63 segundos (instância 8), com média de 2,05 segundos, sendo que o CPLEX foi capaz de resolver as instâncias na otimalidade com média de 13,97

segundos, com tempos variando entre 2,07 segundos (instância 1) e 54,42 segundos (instância 17).

**Tabela 26 - Comparativo do tempo de execução**

<b>Instância</b>	<b>Ótimo (s)</b>	<b>Heurístico (s)</b>	<b>Redução (%)</b>
1	2,07	0,66	-68,12%
2	2,42	0,25	-89,59%
3	4,06	0,45	-88,87%
4	7,65	0,16	-97,87%
5	4,86	0,44	-90,86%
6	2,45	0,53	-78,53%
7	3,97	1,46	-63,17%
8	9,61	5,63	-41,47%
9	3,93	1,09	-72,26%
10	10,97	2,16	-80,29%
11	39,62	4,82	-87,84%
12	4,39	1,95	-55,69%
13	13,54	2,53	-81,32%
14	36,44	3,42	-90,62%
15	10,74	0,32	-97,00%
16	15,03	2,71	-81,99%
17	54,42	3,99	-92,67%
18	4,96	0,56	-88,77%
19	17,45	3,64	-79,13%
20	38,47	4,82	-87,48%
21	7,12	0,67	-90,60%
22	13,23	2,84	-78,53%
<b>Média</b>	<b>13,97</b>	<b>2,05</b>	<b>-81,03%</b>

Fonte: do autor.

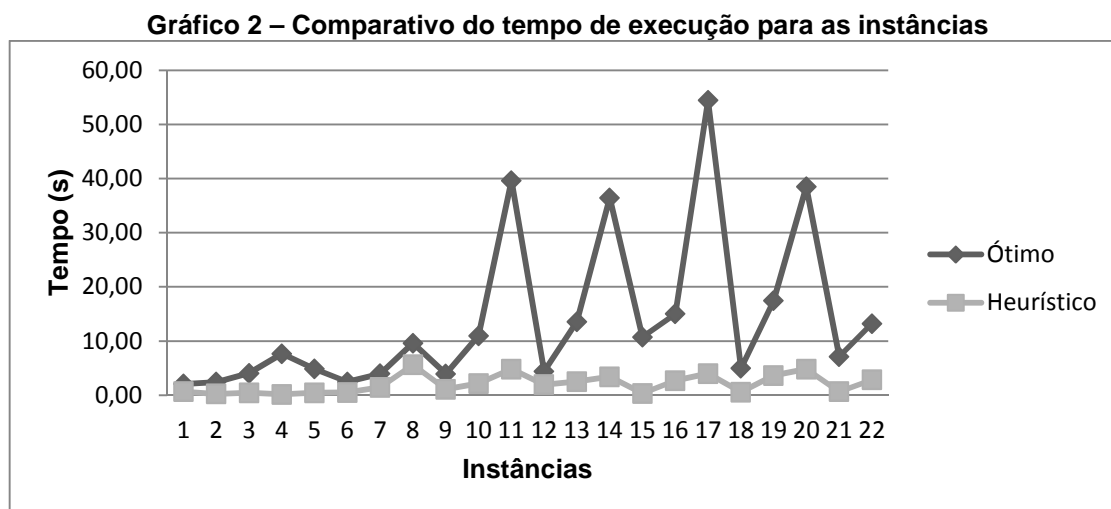
Lee e Kwon (2010), mesmo trabalhando com instâncias relativamente menores do que as consideradas nesta pesquisa, tiveram uma variação no tempo de execução da heurística variando entre 0,55 segundos e 260,50 segundos, com um tempo médio de 42,75 segundos, valor 95,20% superior ao aqui obtido. Essa diferença expressiva entre os tempos de execução obtidos nesta pesquisa e os de Lee e Kwon (2010) podem ser justificados 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 um melhor resultado, o que acabou penalizando no tempo de execução final.

Lee, Kang e Lee (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 Gendreau e Bräysy (2005).

O Gráfico 2 ilustra um comparativo entre o tempo necessário para obtenção do resultado ótimo e da solução heurística, sendo possível observar que a heurística foi capaz de resolver o problema em tempos significativamente reduzidos.



Fonte: do autor.

Relatados e analisados os resultados obtidos para as 22 instâncias, na próxima seção serão apresentadas as instâncias com características reais resolvidas pela heurística proposta, bem como os resultados encontrados para cada instância.

#### 4.9 INSTÂNCIAS COM CARACTERÍSTICAS REAIS

Após analisado o desempenho da heurística para as instâncias de Farias e Borenstein (2012), foram propostas outras quatro instâncias com características reais, visto que a quantidade de dados envolvidas e cenários possíveis nesses problemas são maiores. Assim, pretende-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 27 apresenta a configuração das 4 instâncias com características reais consideradas nesta dissertação. 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. 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. Cabe ressaltar que na literatura investigada não foram

encontrados estudos que tenham abordado uma rede com características similares a dessa instância.

**Tabela 27 - Configuração das instâncias com características reais**

Instância	Fornecedores	Matérias-Primas	Fábricas	CDs	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	1.000

Fonte: do autor.

O tamanho das listas tabu para cada uma das quatro instâncias foi determinado baseado nos testes realizados durante a execução das 22 instâncias anteriores. A Tabela 28 ilustra o tamanho determinados para as listas de CDs e arcos.

**Tabela 28 – Tamanho das listas tabu consideradas para cada instância**

Instância	CD	ARC
A	5	100
B	6	120
C	8	160
D	14	280

Fonte: do autor.

A primeira instância considerada admite a abertura de 10 CDs que devem distribuir 132 produtos para 261 clientes. A solução inicial encontrada para essa instância foi de \$217.706.984, a qual pode ser melhorada 0,1816%, dando origem à melhor solução no valor de \$216.684.120. A solução, que considera a abertura de 9 CDs, foi obtida em 6,975 segundos e pode ser observada na Figura 34.

**Figura 34 – Resultados da instância com características reais A**

BEST SOLUTION:

END					
BEST ITER 316					
COST 216684120		TIME 6.975s			
FACTORY	USED	OPEN DC	UCR-Fw	USED	DEMANDS
Factory 1	97%	Warehouse 1	0.4333	79%	66
Factory 1	97%	Warehouse 2	0.3800	99%	69
Factory 1	97%	Warehouse 4	0.0867	99%	42
Factory 1	97%	Warehouse 5	0.1936	99%	13
Factory 2	42%	Warehouse 6	0.2188	95%	17
Factory 2	42%	Warehouse 7	0.0960	96%	27
Factory 2	42%	Warehouse 8	0.3628	99%	9
Factory 2	42%	Warehouse 9	0.2887	99%	8
Factory 2	42%	Warehouse 10	0.3211	94%	10

Fonte: do autor.

É possível constatar na Figura 34 que as 2 fábricas estão sendo utilizadas para o abastecimento da cadeia nessa instância, sendo a fábrica 1, com 97% de sua capacidade de produção utilizada, responsável pelo envio de produtos aos CDs 1, 2,

4 e 5. A fábrica 2 usa 42% de sua capacidade total para atendimento dos CDs 6, 7, 8, 9 e 10.

Quanto ao atendimento aos clientes, observa-se que as maiores demandas estão concentradas nos CDs 1, 2, 4 e 7, com atendimento a 66, 69, 42 e 27 clientes, respectivamente. No que se refere à taxa de utilização dos CDs, percebe-se que apenas o CD 1, que atende a 66 clientes, tem taxa inferior a 90%; os demais CDs abertos apresentam taxas de utilização variando entre 94% (CD 10) e 99% (CDs 2, 4, 5, 8 e 9). Outro ponto a ser destacado para essa instância é a discrepância de valores entre os  $UCR - F_w$ , o que corresponde a custos de operação e capacidades de CDs bastante variados.

A instância B possibilita a abertura de 20 CDs, que serão responsáveis pela distribuição de 132 produtos a 261 clientes. Para esta instância, o melhor resultado encontrado foi justamente o da solução inicial. O processo heurístico durou 6,518 segundos e encontrou a melhor configuração de rede mediante abertura de dezenove CDs ao custo total de \$220.310.440. Os resultados para essa instância são exibidos na Figura 35.

**Figura 35 - Resultados da instância com características reais B**

BEST SOLUTION:

---

END  
BEST ITER 1      COST 220310440      TIME 6.518s

---

FACTORY	USED	OPEN DC	UCR-Fw	USED	DEMANDS
Factory 2	94%	Warehouse 1	0.5200	88%	61
Factory 2	94%	Warehouse 2	0.4750	99%	55
Factory 1	52%	Warehouse 4	0.1040	99%	35
Factory 1	52%	Warehouse 5	0.4000	94%	6
Factory 2	94%	Warehouse 6	0.4000	91%	9
Factory 1	52%	Warehouse 7	0.4000	89%	6
Factory 1	52%	Warehouse 8	0.4000	97%	8
Factory 2	94%	Warehouse 9	0.4000	86%	5
Factory 2	94%	Warehouse 10	0.4000	93%	8
Factory 1	52%	Warehouse 11	0.4000	97%	7
Factory 1	52%	Warehouse 12	0.4000	93%	9
Factory 2	94%	Warehouse 13	0.4000	88%	6
Factory 1	52%	Warehouse 14	0.4000	88%	6
Factory 1	52%	Warehouse 15	0.4000	95%	7
Factory 2	94%	Warehouse 16	0.4000	93%	8
Factory 2	94%	Warehouse 17	0.4000	97%	6
Factory 1	52%	Warehouse 18	0.4000	85%	5
Factory 1	52%	Warehouse 19	0.4000	86%	5
Factory 1	52%	Warehouse 20	0.4000	96%	9

---

Fonte: do autor.

Observa-se na Figura 35 que as 2 fábricas são utilizadas no abastecimento da cadeia em questão. A fábrica 1 utiliza 52% de sua capacidade produtiva para atender às demandas dos CDs 4, 5, 7, 8, 11, 12, 14, 15, 18, 19 e 20. A fábrica 2, com 94% de sua capacidade utilizada, fornece produtos para os CDs 1, 2, 6, 9, 10, 13, 16 e 17.

Os CDs com maior número de clientes para atender são o 1, 2 e 4, com 61, 55 e 35 clientes, respectivamente. Quanto às taxas de utilização de cada CD, o valor varia entre 85% (para o CD 18) e 99% (para os CDs 2 e 4).

A terceira instância (C) considera a existência de 5 fábricas e a possibilidade de abertura de 40 CDs, que deverão suprir a demanda de 200 clientes por 130 produtos distintos. Partindo de uma solução inicial no valor de \$112.953.443, com os procedimentos heurísticos realizados foi possível encontrar a melhor solução com custo 7,13% menor, abarcando um custo total de \$104.896.412, em 35,683 segundos. O resumo da melhor solução, que considera a abertura de treze CDs, é apresentado na Figura 36.

**Figura 36 - Resultados da instância com características reais C**

BEST SOLUTION:

---

END  
BEST ITER 341 COST 104896412 TIME 35.683s

---

FACTORY	USED	OPEN DC	UCR-Fw	USED	DEMANDS
Factory 1	57%	Warehouse 4	0.1040	97%	34
Factory 2	42%	Warehouse 10	0.4000	93%	8
Factory 5	25%	Warehouse 21	0.3397	95%	15
Factory 2	42%	Warehouse 23	0.3842	98%	18
Factory 1	57%	Warehouse 24	0.3836	94%	15
Factory 1	57%	Warehouse 26	0.2782	96%	16
Factory 1	57%	Warehouse 29	0.1515	96%	17
Factory 2	42%	Warehouse 31	0.3529	93%	15
Factory 1	57%	Warehouse 33	0.2517	98%	15
Factory 5	25%	Warehouse 34	0.2170	95%	14
Factory 2	42%	Warehouse 36	0.2417	99%	18
Factory 4	1%	Warehouse 39	0.4152	11%	2
Factory 3	11%	Warehouse 40	0.2396	94%	13

---

Fonte: do autor.

Para o resultado apresentado na Figura 36, constata-se que todas as 5 fábricas estão sendo utilizadas. A fábrica 1, com 57% de sua capacidade, atende aos CDs 4, 24, 26, 29 e 33. A fábrica 2, usando 42% de sua capacidade produtiva, fornece seus produtos aos CDs 10, 23, 31 e 36. Com 11% de sua capacidade utilizada, a fábrica 3 atende ao CD 40. A fábrica 4, com apenas 1% de sua capacidade total, atende somente ao CD 39. Por fim, a fábrica 5 supre as demandas dos CDs 21 e 34 com 25% de utilização de sua capacidade.

Os valores de  $UCR - F_w$  apresentam-se bastante variados, o que corresponde a custos de operação e capacidades de CDs bastante distintos, simulando um cenário mais realista. Quanto ao atendimento às demandas, observa-se que o CD 4, que apresenta o menor valor de  $UCR - F_w$ , é responsável pelo atendimento a 34 clientes. No que se refere às taxas de utilização de cada CD, esses valores variaram entre 11% (para o CD 39) e 99% (para o CD 36).

A última instância resolvida (D) consiste em uma rede composta por 5 fábricas e até 100 CDs que deverão atender a demanda de 1.000 clientes por 130 produtos diferentes. A Figura 37 apresenta o resultado para essa instância.

**Figura 37 - Resultados da instância com características reais D**  
BEST SOLUTION:

BEST ITER 595		COST 553708617		TIME 117.914s	
FACTORY	USED	OPEN DC	UCR-Fw	USED	DEMANDS
Factory 1	99%	Warehouse 1	0.5200	98%	69
Factory 1	99%	Warehouse 2	0.4750	98%	55
Factory 1	99%	Warehouse 3	0.5333	97%	41
Factory 4	83%	Warehouse 4	0.1040	97%	34
Factory 2	97%	Warehouse 6	0.4000	91%	9
Factory 4	83%	Warehouse 7	0.4000	89%	6
Factory 5	83%	Warehouse 8	0.4000	97%	8
Factory 4	83%	Warehouse 9	0.4000	86%	5
Factory 4	83%	Warehouse 10	0.4000	93%	8
Factory 2	97%	Warehouse 12	0.4000	93%	9
Factory 4	83%	Warehouse 16	0.4000	93%	8
Factory 1	99%	Warehouse 19	0.4000	86%	5
Factory 2	97%	Warehouse 20	0.4000	96%	9
Factory 2	97%	Warehouse 21	0.3397	95%	15
Factory 1	99%	Warehouse 22	0.4737	91%	10
Factory 1	99%	Warehouse 23	0.3842	98%	18
Factory 1	99%	Warehouse 24	0.3836	94%	15
Factory 1	99%	Warehouse 25	1.1472	98%	6
Factory 1	99%	Warehouse 26	0.2782	96%	16
Factory 1	99%	Warehouse 28	0.5540	95%	9
Factory 1	99%	Warehouse 29	0.1515	96%	17
Factory 5	83%	Warehouse 30	0.7285	69%	8
Factory 5	83%	Warehouse 31	0.3529	93%	15
Factory 3	70%	Warehouse 33	0.2517	98%	15
Factory 2	97%	Warehouse 34	0.2170	95%	14
Factory 4	83%	Warehouse 35	0.3598	90%	8
Factory 2	97%	Warehouse 36	0.2417	99%	18
Factory 4	83%	Warehouse 37	0.7115	93%	8
Factory 2	97%	Warehouse 39	0.4152	94%	16
Factory 5	83%	Warehouse 40	0.2396	94%	13
Factory 2	97%	Warehouse 41	0.9658	93%	7
Factory 3	70%	Warehouse 42	0.5880	99%	11
Factory 4	83%	Warehouse 44	0.4729	96%	13
Factory 2	97%	Warehouse 45	0.6541	98%	17
Factory 3	70%	Warehouse 46	0.3299	95%	20
Factory 4	83%	Warehouse 49	0.5003	99%	14
Factory 2	97%	Warehouse 51	0.3849	93%	13
Factory 4	83%	Warehouse 53	0.4084	97%	15
Factory 2	97%	Warehouse 54	0.3651	98%	17
Factory 5	83%	Warehouse 55	0.5457	99%	12
Factory 4	83%	Warehouse 56	0.2611	97%	20
Factory 2	97%	Warehouse 58	0.5888	95%	19
Factory 1	99%	Warehouse 59	0.9054	39%	7
Factory 2	97%	Warehouse 65	0.5593	98%	19
Factory 2	97%	Warehouse 68	0.2764	97%	16
Factory 4	83%	Warehouse 70	1.5134	43%	7
Factory 3	70%	Warehouse 71	0.2137	95%	16
Factory 3	70%	Warehouse 72	0.3358	95%	15
Factory 5	83%	Warehouse 73	0.2663	98%	22
Factory 3	70%	Warehouse 75	0.6667	96%	16
Factory 3	70%	Warehouse 77	0.4183	97%	16
Factory 3	70%	Warehouse 78	2.3458	65%	6
Factory 3	70%	Warehouse 80	0.4532	96%	16
Factory 4	83%	Warehouse 83	0.8059	29%	6
Factory 2	97%	Warehouse 86	0.5934	99%	21
Factory 5	83%	Warehouse 87	0.4975	98%	20
Factory 2	97%	Warehouse 88	0.3331	96%	15
Factory 4	83%	Warehouse 89	0.7229	95%	15
Factory 3	70%	Warehouse 90	0.3608	98%	16
Factory 5	83%	Warehouse 91	0.6266	99%	22
Factory 1	99%	Warehouse 92	1.9026	50%	5
Factory 4	83%	Warehouse 94	0.5380	94%	13
Factory 2	97%	Warehouse 95	0.2896	94%	12
Factory 4	83%	Warehouse 96	0.3798	90%	8
Factory 5	83%	Warehouse 98	0.5322	95%	20
Factory 1	99%	Warehouse 99	0.8746	61%	6

Fonte: do autor.

A solução inicial encontrada para essa instância possuía custo de \$589.526.409, sendo este reduzido em 6,08%, originando a melhor solução com custo de \$553.708.617 em 117,914 segundos, compreendendo a abertura de sessenta e seis CDs.

Os resultados apresentados pela Figura 37 confirmam a utilização das 5 fábricas no atendimento aos 66 CDs. A fábrica 1 utiliza 99% de sua capacidade total de produção para atender a 14 CDs. A fábrica 2 supre a demanda de 17 CDs com utilização de 97% de sua capacidade. Com uso de 70% da capacidade produtiva, a fábrica 3 distribui produtos a 10 CDs. As fábricas 4 e 5 utilizam 83% da capacidade de produção para abastecer 16 e 9 clientes, respectivamente.

Observa-se que os valores de  $UCR - F_w$  para a instância analisada são bastante variados, o que demonstra a discrepância dos custos de operação e capacidades dos CDs considerados neste cenário. O CD 1 é responsável pelo atendimento do maior número de clientes em toda a cadeia, totalizando 69, seguido do CD 2, com 55 clientes, CD 3, com 41 e do CD 4, com 34 clientes. No total, apenas esses 4 CDs atendem a 199 clientes.

A Tabela 29 ilustra um comparativo entre as soluções iniciais e finais (melhor solução) para os cenários com características reais. Observa-se que o percentual de melhoria para as soluções variou de zero (na instância B) até 7,13% (na instância C), com média de 3,42% de melhoria para esses cenários. O percentual médio de melhoria vai ao encontro do valor identificado nas 22 instâncias anteriormente exploradas, onde a diferença entre soluções foi de 3,584%.

**Tabela 29 - Comparativo entre solução inicial e final**

<b>Instância</b>	<b>Solução Inicial</b>	<b>Solução Final</b>	<b>Melhoria</b>
A	217.706.984	216.684.120	0,47%
B	220.310.440	220.310.440	0,00%
C	112.953.443	104.896.412	7,13%
D	589.526.409	553.708.617	6,08%
<b>Média</b>			<b>3,42%</b>

Fonte: do autor.

Um resumo com os tempos de execução para as instâncias com características reais resolvidas é apresentado da Tabela 30.

**Tabela 30 - Tempo de execução das instâncias com características reais**

<b>Instância</b>	<b>Tempo (s)</b>
A	6,97
B	6,52
C	35,68
D	117,91

Fonte: do autor.

Observa-se na Tabela 30 que o tempo de execução variou entre 6,52 segundos para a instância B e 117,91 segundos para a instância D.

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 quais CDs devem ser abertos), quanto em nível operacional (determinando a quantidade de produtos a ser transferida de uma fábrica a um CD, por exemplo).

Apresentadas e analisadas todas as instâncias abordadas nesta dissertação, no próximo capítulo serão expostas as considerações finais da pesquisa.

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

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; PREUSSER; HARTL, 2008).

Uma cadeia de suprimentos é um sistema complexo, que exige decisões em várias etapas, incluindo a localização de fábricas e centros de distribuição (CDs), aquisição de matérias-primas, processo de produção, controle de estoque, entrega de mercadoria, entre outras. A definição e a gestão de uma cadeia de suprimentos apresentam-se, hoje, como um dos problemas mais importantes e de difícil solução para os gestores. Elhedhli e Gzara (2008) consideram que um projeto eficiente de uma cadeia de suprimentos significa encontrar uma melhor localização para as instalações de produção e distribuição, bem como uma melhor capacidade tecnológica e de planejamento, facilitando o acesso aos mercados consumidores.

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. Nesse sentido, Zaleta e Socorrás (2004) consideram que embora não exista um algoritmo capaz de resolver na otimalidade os problemas com grandes instâncias, comum em diversas aplicações, em um período de tempo razoável, procedimentos heurísticos podem ser utilizados. Assim, abre-se mão da solução ótima em busca de uma solução com qualidade aceitável e em tempos de execução menores.

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 dissertação consistiu em implementar e avaliar uma heurística baseada em Busca Tabu para otimização de uma rede de cadeia de suprimentos.

O primeiro objetivo específico, que consistia em implementar uma heurística baseada em Busca Tabu para a solução do problema, foi atingido mediante uma adaptação do método proposto por Lee e Kwon (2010) e sua implementação, conforme apresentado no capítulo 3. Como principais alterações no método dos



autores, destaca-se a opção por não trabalhar com randomicidade na geração da solução inicial e o acréscimo dos fornecedores de matérias-primas ao problema.

Após implementada a heurística, o problema foi resolvido para as instâncias propostas por Farias e Borenstein (2012), satisfazendo o segundo objetivo. As 22 instâncias foram apresentadas ao longo do capítulo 4, bem como os resultados obtidos pelos autores, que permitiram a comparação e avaliação dos resultados encontrados pela heurística com os valores ótimos, atingindo o terceiro objetivo específico proposto.

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 e 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 complexidade maior, visto que em instâncias menores, como as do cenário 2, por exemplo, os resultados obtidos nesta dissertação foram melhores que os de Lee e 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 e 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 dissertação. Enquanto Lee e 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 a randomicidade na solução inicial, os autores necessitaram repetir 10 vezes cada instância para obter melhores resultados, enquanto que, para essa dissertação, 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, sendo que geralmente há um conflito entre o tempo de execução de uma heurística e a qualidade da solução encontrada, pois quando maior o tempo, melhor a qualidade da solução final, sendo desejável que uma heurística produza boas soluções em um tempo de execução razoável (BRÄYSY;

GENDREAU, 2005). 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.

Por fim, de modo a atender ao quarto objetivo específico, que consistia na resolução do problema para instâncias com características reais, foram resolvidas quatro instâncias com características reais para verificar o desempenho do método frente a problemas reais. A heurística foi capaz de resolver as 4 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.

Lee e Kwon (2010) consideram que, na prática, as decisões sobre operação de centros de distribuição são avaliadas em muitos cenários com muitos tipos de dados possíveis para se chegar a uma solução aceitável, sendo desejável que o tempo computacional não exceda 30 minutos. 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, como 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.

## REFERÊNCIAS

- ALMEDER, C.; PREUSSER, M.; HARTL, R. F. Simulation and optimization of supply chains: alternative or complementary approaches? **OR Spectrum**, v. 31, n. 1, p. 95-119, 2008.
- ALTIPARMAK, F. *et al.* A genetic algorithm approach for multi-objective optimization of supply chain networks. **Computer & Industrial Engineering**, v. 51, p. 196-215, 2006.
- AMRANI, H. *et al.* A variable neighborhood search heuristic for the design of multicommodity production–distribution networks with alternative facility configurations. **OR Spectrum**, v. 33, n. 4, p. 989-1007, 2009.
- ARENALES, M. *et al.* **Pesquisa operacional**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2007.
- BALLOU, R. **Gerenciamento da cadeia de suprimentos**. 5. ed. Porto Alegre: Bookman, 2006.
- BEAMON, B. M. Supply chain design and analysis: Models and methods. **International Journal of Production Economics**, v. 55, n. 3, p. 281-294, 1998.
- BELENGUER, J.M. *et al.* A branch-and-cut method for the capacitated location-routing problem. **Computers & Operations Research**, v. 38, n. 6, p. 931-941, 2011.
- BIDHANDI, M.H. *et al.* Development of a new approach for deterministic supply chain network design. **European Journal of Operational Research**, v. 198, n. 1, p. 121-128, 2009.
- BOWERSOX, D. J.; CLOSS, D. J.; COOPER, M. B. **Gestão logística de cadeias de suprimentos**. Porto Alegre: Bookman, 2006.
- BRÄÏSY, O.; GENDREAU, M. Vehicle routing problem with time windows, part II: metaheuristics. **Transportation Science**, v. 39, n. 1, p. 119-139, 2005.
- CALVETE, H. I.; GALÉ, C.; OLIVEROS, M.J. Bilevel model for production–distribution planning solved by using ant colony optimization. **Computers & Operations Research**, v. 38, n. 1, p. 320-327, 2011.
- CHIANG, W.C. *et al.* A simulation/metaheuristic approach to newspaper production and distribution supply chain problems. **International Journal of Production Economics**, v. 121, n. 2, p. 752-767, 2009.
- CHOPRA, S.; MEINDL, P. **Gerenciamento da cadeia de suprimentos**. São Paulo: Prentice Hall, 2003.
- COLIN, E. C. **Pesquisa operacional: 170 aplicações em estratégia, finanças, logística, produção, marketing e vendas**. Rio de Janeiro: LTC, 2007.
- CORDEAU, J.F.; PASIN, F.; SOLOMON, M. M. An integrated model for logistics network design. **Annals of Operations Research**, v. 144, n. 1, p. 59-82, 2006.

\_\_\_\_\_.; LAPORTE, G.; PASIN, F. An iterated local search heuristic for the logistics network design problem with single assignment. **International Journal of Production Economics**, v. 113, n. 2, p. 626-640, 2008.

DAVIDOVIC *et al.* Bee colony optimization for the p-center problem. **Computers & Operations Research**, v. 38, p. 1367-1376, 2011.

ELHEDHLI, S.; GZARA, F. Integrated design of supply chain networks with three echelons, multiple commodities and technology selection. **IIE Transactions**, v. 40, n. 1, p. 31-44, 2008.

FARIAS, E. S.; BORENSTEIN, D. Using mathematical models for the design of the logistic network of a company. **Proceedings of the 25<sup>th</sup> Conference of European Chapter on Combinatorial Optimization**, Antalya, Turkey, 2012.

GENDREAU, M.; LAPORTE, G.; VIGO, D. Heuristics for the traveling salesman problem with pick-up and delivery. **Computers & Operations Research**, v. 26, p. 699-714, 1999.

GHIANI, G; LAPORTE, G; MUSMANNO, R. **Introduction to logistics systems planning and control**. New York: Wiley; 2004.

GOETSCHALCKX, M.; VIDAL, C. J.; DOGAN, K. Modeling and design of global logistics systems: A review of integrated strategic and tactical models and design algorithms. **European Journal of Operational Research**, v. 143, p. 1-18, 2002.

GOLDBARG, M. C.; LUNA, H. P. L. **Otimização combinatória e programação linear: modelos e algoritmos**. 2. Ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2005.

GOLDSY, T. J.; CRUM, M. R.; SUTHERLAND, J. Transportation Management. In: MENTZER, J.T; MYERS, M.B.; STANK, T.P. (Org.) **Handbook of global supply chain management**. Thousand Oaks: Sage, 2007.

GOLMOHAMMADI, V. *et al.* A heuristic approach for designing a distribution network in a supply chain system. **African Journal of Business Management**, v.4, n.3, p. 308-311, 2010.

HOLMBERG, K. A. J.; HELLSTRAND, J. Solving the uncapacitated network design problem by a Lagrangean heuristic and branch-and-bound. **Operations Research**, v. 46, n. 2, p. 247-259, 1998.

HSU, C. I.; LI, H.C. An integrated plant capacity and production planning model for high-tech manufacturing firms with economies of scale. **International Journal of Production Economics**, v. 118, n. 2, p. 486-500, 2009.

INSTITUTO DE LOGÍSTICA E SUPPLY CHAIN. **Custos logísticos no Brasil**. Rio de Janeiro: ILOS, 2010. Disponível em:  
< [http://www.ilos.com.br/site/index.php?option=com\\_content&task=view&id=1357&Itemid=219](http://www.ilos.com.br/site/index.php?option=com_content&task=view&id=1357&Itemid=219)>. Acesso em: 10 mai. 2011.

JANG, Y.J. *et al.* A combined model of network design and production/distribution planning for a supply network. **Computers & Industrial Engineering**, v. 43, n. 1-2, p. 263-281, 2002.

JAVID, A. A.; AZAD, N. Incorporating location, routing and inventory decisions in supply chain network design. **Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review**, v. 46, n. 5, p. 582-597, 2010.

JAYARAMAN, V.; PIRKUL, H. Planning and coordination of production and distribution facilities for multiple commodities. **European Journal of Operational Research**, v. 133, n. 2, p. 394-408, 2001.

KAZEMI, A.; ZARANDI, M. H. F.; HUSSEINI, S. M. M. A multi-agent system to solve the production–distribution planning problem for a supply chain: a genetic algorithm approach. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 44, p. 180-193, 2008.

KESKIN, B.; USTER, H. 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, 2007.

KRAJEWSKA, M. A.; KOPFER, H. Transportation planning in freight forwarding companies: Tabu search algorithm for the integrated operational transportation planning problem. **European Journal of Operational Research**, v. 197, n. 2, p. 741-751, 2009.

LAGUNA, M. A guide to implementing Tabu Search. **Investigación operativa**, v. 4, p. 5-25, 1994.

LEE, B.; KANG, K.; LEE, Y. Decomposition heuristic to minimize total cost in a multi-level supply chain network. **Computers & Industrial Engineering**, v. 54, n. 4, p. 945-959, 2008.

LEE, Y. H.; KIM, S.H. Production - distribution planning in supply chain considering capacity constraints. **Computers & Industrial Engineering**, v. 43, p. 169-190, 2002.

\_\_\_\_\_; KWON, S.G. The hybrid planning algorithm for the distribution center operation using tabu search and decomposed optimization. **Expert Systems with Applications**, v. 37, n. 4, p. 3094-3103, 2010.

LI, J.; CHU, F.; PRINS, C. Lower and upper bounds for a capacitated plan location problem with multicommodity flow. **Computers & Operations Research**, v. 36, p. 3019-3030, 2009.

MELO, M.; NICKEL, S.; SALDANHA-DA-GAMA, F. Facility location and supply chain management – A review. **European Journal of Operational Research**, v. 196, n. 2, p. 401-412, 2009.

MONTANÉ, F. A. T.; GALVAO, R. D. A tabu search algorithm for the vehicle routing problem with simultaneous pick-up and delivery service. **Computers & Operations Research**, v. 33, n. 3, p. 595-619, 2006.

- OMBUKI, B.; ROSS, B. J.; HANSHAR, F. Multi-objective genetic algorithms for vehicle routing problem with time windows. **Applied Intelligence**, v. 24, n. 1, p. 17-30, 2006.
- PIRKUL, H.; JAYARAMAN, V. Distribution planning in a multi-Commodity tri-echelon system. **Transportation Science**, v. 30, n. 4, p. 291-302, 1996.
- REVELLE, C. S.; MARKS, D.; LIEBMAN, J. C. An analysis of private and public sector location models, **Management Science**, v. 16, p. 692-707, 1970.
- REZENDE, A. C. *et al.* **Coletânea de artigos de logística**. São Paulo: IMAM, 2002.
- ROTHLAUF, F. **Design of modern heuristics**. Principles and application. New York: Springer, 2011.
- SABRI, E. H.; BEAMON, B. M. A multi-objective approach to simultaneous strategic and operational planning in supply chain design. **Omega**, v. 28, p. 581–598, 2000.
- SHEN, Z.J. A multi-commodity supply chain design problem. **Institute of Industrial Engineers Transactions**, v. 37, p. 753-762, 2005.
- SHIMIZU, Y.; FUJIKURA, T. A hybrid meta-heuristic approach for integrated capacitated multi-commodity logistics optimization over planning horizon. **Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing**, v. 4, n. 3, p. 716-727, 2010.
- TAN, K. C. *et al.* Heuristic methods for vehicle routing problem with time windows. **Artificial Intelligence in Engineering**, v. 15, n. 3, p. 281-295, 2001.
- TRAGANTALERNGSAK, S.; HOLT, J.; RÖNNQVIST, M. Lagrangian heuristics for the two-echelon, single-source, capacitated facility location problem. **European Journal of Operational Research**, v. 102, n. 3, p. 611-625, 1997.
- WU, L.Y.; ZHANG, X.S.; ZHANG, J.L. Capacitated facility location problem with general setup cost. **Computers & Operations Research**, v. 33, p. 1226-1241, 2006.
- YAO, Z. *et al.* Multi-source facility location–allocation and inventory problem. **European Journal of Operational Research**, v. 207, n. 2, p. 750-762, 2010.
- ZÄPFEL, G.; BRAUNE, R.; BÖGL, M. **Metaheuristic search concepts**. A tutorial with applications to production and logistics. New York: Springer, 2010.
- ZALETA, N.C; SOCORRÁS, A.M.A. Tabu Search-based algorithm for capacitated multicommodity network design problem. **Proceedings of the 14<sup>th</sup> International Conference on Electronics, Communications and Computers**, Veracruz, Mexico, 2004.
- ZHU, Z.; CHU, F.; SUN, L. The capacitated plant location problem with customers and suppliers matching. **Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review**, v. 46, n. 3, p. 469-480, 2010.