

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ADMINISTRAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ADMINISTRAÇÃO
MESTRADO EM ADMINISTRAÇÃO

Everton da Silveira Farias

**MODELAGEM PARA O PROJETO DE REDE DA CADEIA DE
SUPRIMENTOS DE UMA INDÚSTRIA DE *MULTI-COMMODITY***

Porto Alegre – RS

2011

Everton da Silveira Farias

**MODELAGEM PARA O PROJETO DE REDE DA CADEIA DE
SUPRIMENTOS DE UMA INDÚSTRIA DE *MULTI-COMMODITY***

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

Orientador: Prof. Dr. Denis Borenstein

Porto Alegre – RS

2011

CIP - Catalogação na Publicação

Farias, Everton da Silveira
MODELAGEM PARA O PROJETO DE REDE DA CADEIA DE
SUPRIMENTOS DE UMA INDÚSTRIA DE MULTI-COMMODITY /
Everton da Silveira Farias. -- 2011.
109 f.

Orientador: Prof. Dr. Denis Borenstein.

Dissertação (Mestrado) -- Universidade Federal do
Rio Grande do Sul, Escola de Administração, Programa
de Pós-Graduação em Administração, Porto Alegre, BR-RS,
2011.

1. Modelagem matemática. 2. Cadeia de
suprimentos. 3. Supply chain network design. 4.
Multi-commodity. 5. Projeto logístico. I. Borenstein,
Prof. Dr. Denis, orient. II. Título.

Elaborada pelo Sistema de Geração Automática de Ficha Catalográfica da UFRGS com os
dados fornecidos pelo(a) autor(a).



SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ADMINISTRAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ADMINISTRAÇÃO

BANCA EXAMINADORA:

Prof.^a Dr.^a Denise Lindstrom-Bandeira

(PPGA/EA/UFRGS)

Prof. Dr. José Carlos Fiorioli

(EA/UFRGS)

Prof. Dr. João Carlos Furtado

(UNISC)

Orientador(a): Prof. Denis Borenstein

Área de Concentração: Sistemas de Informação e de Apoio à Decisão

Curso: Mestrado Acadêmico

Porto Alegre, 20 de junho de 2011.

*Para minha afilhada, Clara Lopes Farias,
e para meu Pai (1947-2004)*

AGRADECIMENTOS

À Gabriela Veit Volkveis por ser a minha maior incentivadora, por acreditar na importância desse trabalho e superar as dificuldades impostas durante esse período. Obrigado pelo seu amor e seu carinho.

À minha família: minha mãe, ao Anderson, a Raquel, a Aline e a Clara por me fazerem sentir um ser especial pelo simples fato de compartilharem as suas vidas comigo.

Ao meu orientador Professor Denis Borenstein, por ter proposto esse trabalho desafiador, pelo incentivo em aprender algo novo. Seu conhecimento e sabedoria foram essenciais para realização desse trabalho. Obrigado pela oportunidade de trabalhar sob sua orientação.

Aos professores do Programa de Pós-Graduação em Administração da Universidade Federal do Rio Grande do Sul pelos ensinamentos passados nas disciplinas cursadas durante o mestrado.

Aos funcionários da Secretaria do PPGA e da Biblioteca da Escola de Administração pela disposição, compreensão e amizade que me dedicaram;

Aos amigos e colegas pelas experiências compartilhadas, em especial ao Gabriel, Gilmar e Monize (trio ternura) pela parceria nas aulas de programação em C.

À CAPES pelo suporte financeiro.

A Deus por iluminar meu caminho e me dar força para superar os desafios.

*“Não há nada que não se possa aprender,
basta a curiosidade e a inteligência.”*

Vitorio Furusho

RESUMO

Nesse trabalho apresentamos a modelagem matemática do Projeto de Rede da Cadeia de Suprimentos (Supply Chain Network Design) de uma empresa responsável pela produção e distribuição de *commodities*. O investimento em uma nova fábrica exige que a empresa tenha seu projeto logístico readequado. O desenvolvimento das formulações matemáticas é baseado no trabalho de Jayaraman e Pirkul (2001). Foram realizadas 3 (três) formulações matemáticas de diferentes abordagens para solução do projeto logístico. As implementações computacionais foram realizadas no CPLEX® Optimization Studio Academic Research versão 12.2. As experiências computacionais foram desenvolvidas através de cenários que buscaram representar problemas de dimensões reais. Ainda na etapa de experimentação foram realizadas análises de sensibilidade dos modelos. Um estudo para identificar as demandas de mercado e os custos de transporte foi realizado, sendo assim, foi possível aplicar os modelos no estudo de caso a partir de dados reais de demanda e custos. Para execução das instâncias reais foram selecionadas 2 (duas) abordagens distintas: Single-source e Arc-based. Diferentes *market shares* foram definidos para construção de novos cenários e instâncias reais foram executadas dentro de limites computacionais de tempo satisfatórios. Os resultados encontrados para cada cenário foram comparados e analisados em relação à resolução do problema proposto. A dissertação contribui para a área de modelagem da cadeia de suprimentos fornecendo modelos que apresentaram resultados satisfatórios para a tomada de decisão nessa fase do projeto logístico da indústria tema dessa pesquisa.

Palavras-chave: Projeto de rede da cadeia de suprimentos, Projeto logístico, Modelagem matemática, Single-source, Arc-based, *Multi-commodity*, SCND.

ABSTRACT

We present a mathematical modeling of the Supply Chain Network Design (SCND) for a company responsible for producing and distributing commodities. Investment in a new plant requires that the company has reconfigured its logistics project. The development of mathematical formulations is based on the work of Jayaraman and Pirkul (2001). Were performed three (3) mathematical formulations for different approaches to solving the logistics project. Computational implementations were done in CPLEX® Optimization Academic Research Studio version 12.2. Computational experiments were developed through scenarios that sought to represent problems of the real dimensions. Still in the experimentation fase were performed sensitivity analysis of models. A study to identify market demands and transportation costs was made, so the models could be applied in the case study data from actual demand and costs. For carrying out the actual instances were selected 2 (two) different approaches: Single-source-based and Arc. Different market shares were set to build new scenarios and actual instances have been implemented within limits satisfactory computational time. The results for each scenario were compared and analyzed for solving the proposed problem. The thesis contributes to modeling area of supply chain models that provide satisfactory results for decision making in this phase of the project's logistics industry theme of this research.

Keywords: Supply Chain Network Design, Project logistics, mathematical modeling, single-source, arc-based, multi-commodity, SCND.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Modelo de distribuição integrado de múltiplas plantas e produtos.....	24
Figura 2: Desenho de pesquisa	33
Figura 3: Exemplo Modelo "Single-Source"	38
Figura 4: Exemplo Modelo "Path-based"	40
Figura 5: Exemplo Modelo "Arc-based"	43
Figura 6: Cplex© Cenário A - "Single-source"	50
Figura 7: Cplex© Cenário A - "Path-based"	50
Figura 8: Cplex© Cenário A - "Arc-based"	51
Figura 9: Cplex© Cenário B - "Single-source"	55
Figura 10: Cplex© Cenário B - "Path-based".....	55
Figura 11: Cplex© Cenário B - "Arc-based"	56
Figura 12: Cplex© Cenário C - "Single-source"	60
Figura 13: Cplex© Cenário C - "Arc-based"	61
Figura 14: Cplex© Cenário C - Análise de sensibilidade "Single-source"	64
Figura 15: Cplex© Cenário C - Análise de sensibilidade "Arc-based"	66
Quadro 1: Síntese dos resultados experimentais.....	67
Figura 16: Google Maps© - Coleta de distâncias.....	72
Figura 17: Projeto logístico da cadeia de suprimentos.....	74
Figura 18: Resultados Cplex© Market-share 1 - "Single-source" 3 CD's	76
Figura 19: Projeto Logístico Market-share 1 - "Single-source" 3 CD's	77
Figura 20: Resultados Cplex© Market-share 1 - "Single-source" 2 CD's	78
Figura 21: Projeto Logístico Market-share 1 - "Single-source" 2 CD's	78
Figura 22: Resultados Cplex© Market-share 1 - "Arc-based" 3 CD's	79
Figura 23: Projeto Logístico Market-share 1 - "Arc-based" 3 CD's.....	80
Figura 24: Resultados Cplex© Market-share 1 - "Arc-based" 2 CD's	81
Figura 25: Projeto Logístico Market-share 1 - "Arc-based" 2 CD's.....	81
Figura 26: Resultados Cplex© Market-share 2 - "Single-source" 3 CD's	84
Figura 27: Projeto Logístico Market-share 2 - "Single-source" 3 CD's	85
Figura 28: Resultados Cplex© Market-share 2 - "Single-source" 2 CD's	86
Figura 29: Projeto Logístico Market-share 2 - "Single-source" 2 CD's	86
Figura 30: Resultados Cplex© Market-share 2 - "Arc-based" 3 CD's	87
Figura 31: Projeto Logístico Market-share 2 - "Arc-based" 3 CD's.....	88
Figura 32: Resultados Cplex© Market-share 2 - "Arc-based" 2 CD's	89
Figura 33: Projeto Logístico Market-share 2 - "Arc-based" 2 CD's.....	90
Figura 34: Resultados Cplex© Market-share 3 - "Single-source" CD's 1 e 5	93
Figura 35: Projeto Logístico Market-share 3 - "Single-source" CD's 1 e 5	93

Figura 36: Resultados Cplex© Market-share 3 - "Single-source" CD's 3 e 5	94
Figura 37: Projeto Logístico Market-share 3 - "Single-source" CD's 3 e 5	94
Figura 38: Resultados Cplex© Market-share 3 - "Single-source" CD's 4 e 5	95
Figura 39: Projeto Logístico Market-share 3 - "Single-source" CD's 4 e 5	96
Figura 40: Resultados Cplex© Market-share 3 - "Arc-based" CD's 1 e 5	97
Figura 41: Projeto Logístico Market-share 3 - "Arc-based" CD's 1 e 5	98
Figura 42: Resultados Cplex© Market-share 3 - "Arc-based" CD's 3 e 5	98
Figura 43: Projeto Logístico Market-share 3 - "Arc-based" CD's 3 e 5	99
Figura 44: Resultados Cplex© Market-share 3 - "Arc-based" CD's 4 e 5	99
Figura 45: Projeto Logístico Market-share 3 - "Arc-based" CD's 4 e 5	100
Quadro 2: Síntese de resultados do estudo de caso	102

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Cenário A.....	48
Tabela 2: Cenário A: demanda de produtos por cliente	48
Tabela 3: Capacidade de Processamento por CD	49
Tabela 4: Cenário B.....	52
Tabela 5: Cenário B: taxa de utilização de matéria-prima por produto acabado	53
Tabela 6: Cenário B: capacidade e custos.....	53
Tabela 7: Cenário B: produção por fábrica.....	53
Tabela 8: Cenário B: comparação de abordagens	57
Tabela 9: Cenário C.....	58
Tabela 10: Cenário C: capacidade e custos	59
Tabela 11: Cenário C: produção por fábrica.....	59
Tabela 12: Cenário C: Single-source x Arc-based	61
Tabela 13: Conjunto de CD's: análise de sensibilidade "Single-source"	63
Tabela 14: Análise de sensibilidade "Single-source"	64
Tabela 15: Conjunto de CD's: análise de sensibilidade "Arc-based"	65
Tabela 16: Análise de sensibilidade "Arc-based"	66
Tabela 17: Áreas de demandas	71
Tabela 18: Custo de unitário de transporte	72
Tabela 19: Demanda do mercado de <i>commodities</i>	74
Tabela 20: Projeto logístico: capacidades e custos.....	75
Tabela 21: Projeto logístico: custo unitário de produção.....	75
Tabela 22: Market-share 1.....	76
Tabela 23: Demanda Market-share 1	76
Tabela 24: Market-share 1: modelo "Single-source"	79
Tabela 25: Market-share 1: modelo "Arc-based"	82
Tabela 26: Market-share 1: análise dos resultados com limite de 5 CD's	82
Tabela 27: Market-share 1: análise dos resultados com limite de 2 CD's	83
Tabela 28: Market-share 2.....	83
Tabela 29: Demanda Market-share 2	84
Tabela 30: Market-share 2: modelo "Single-source"	87
Tabela 31: Market-share 2: modelo "Arc-based"	90
Tabela 32: Market-share 2: análise dos resultados com limite de 5 CD's	91
Tabela 33: Market-share 2: análise dos resultados com limite de 2 CD's	91
Tabela 34: Market-share 3.....	92
Tabela 35: Demanda Market share 3.....	92
Tabela 36: Análise dos resultados: "Single-source" 2 CD's.....	96

Tabela 37: Análise dos resultados: “Arc-based” 2 CD’s	100
Tabela 38: Análise dos resultados: cenário Market-share 3.....	101

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	15
1.1	CONTEXTO DA PESQUISA.....	16
1.2	JUSTIFICATIVA DE PESQUISA.....	17
1.3	OBJETIVOS DO ESTUDO.....	18
1.3.1	Objetivo geral.....	18
1.3.2	Objetivos específicos	18
1.4	ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO.....	19
2	REVISÃO DE LITERATURA.....	20
2.1	PROJETO DE REDE DA CADEIA DE SUPRIMENTOS.....	20
2.2	PROBLEMA DE FLUXO <i>MULTI-COMMODITY</i>	22
2.3	MODELOS MATEMÁTICOS DE SOLUÇÃO	25
3	METODOLOGIA DE PESQUISA	33
3.1	DEFINIÇÃO DO PROBLEMA	34
3.2	FORMULAÇÃO E MODELAGEM MATEMÁTICA.....	35
3.2.1	Modelagem “Single-source”.....	37
3.2.2	Modelagem “Path-based”	40
3.2.3	Modelagem “Arc-based”	43
3.3	IMPLEMENTAÇÕES COMPUTACIONAIS.....	45
3.4	VERIFICAÇÃO DO MODELO	47
3.4.1	Verificação Cenário A	48
3.5	EXPERIMENTAÇÃO E ANÁLISES.....	52
3.5.1	Experimentação Cenário B	52
3.5.2	Experimentação Cenário C	58
3.5.3	Análise de sensibilidade Cenário C.....	62
4	APLICAÇÃO DOS MODELOS NO ESTUDO DE CASO	69
4.1	COLETA E ESTRUTURAÇÃO DE DADOS.....	69
4.2	APLICAÇÃO NO ESTUDO DE CASO	73
4.2.1	Cenário do Projeto Logístico – Market-share 1	75
4.2.2	Cenário do Projeto Logístico – Market-share 2	83
4.2.3	Cenário do Projeto Logístico – Market-share 3	91

5	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	103
	REFERÊNCIAS	106

1 INTRODUÇÃO

A cadeia de suprimentos representa uma rede de organizações dos diferentes processos e atividades que produzem valor na forma de produtos e serviços que são colocados à disposição do consumidor final. A lógica da ligação entre cada fase do processo, à medida que os materiais e produtos se deslocam em direção ao cliente, é baseada nos princípios da otimização. A gestão da cadeia de suprimentos preocupa-se com os fluxos externos à empresa, e visa à coordenação e o controle de materiais, informações e finanças que vão do fornecedor ao consumidor, passando pelos fabricantes, atacadistas e varejistas (BALLOU, 2006). Através do planejamento, organização e controle efetivo das atividades corporativas, a logística visa prover um melhor nível de serviço, reduzindo custos operacionais e contribuindo com a prosperidade do negócio (BOWERSOX, 2006).

Um componente crucial para o planejamento das atividades de produção da empresa é um eficiente Projeto de Rede da Cadeia de Suprimentos (Supply Chain Network Design - SCND) ou Projeto Logístico da Cadeia de Suprimentos. Para Shen (2005) definir o projeto e gerir a cadeia de suprimentos no atual ambiente competitivo dos negócios é um dos mais importantes e difíceis problemas dos gestores. Ballou (2006) afirma que a cadeia de suprimentos é uma rede de relações entre fornecedores, fábricas, centros de distribuição, e canais de distribuição organizados para adquirir matéria-prima, e transformar essa matéria-prima em produtos finais para distribuição aos consumidores. Resolver problemas para definir modelos de redes de atuação da cadeia de suprimentos tem sido uma importante linha de pesquisa tanto na área privada, quanto no setor público (REVELLE; MARKS; LIEBMAN, 1970). O objetivo típico de um de projeto de rede da cadeia de suprimentos pode ser satisfazer todas as demandas dos clientes com o mínimo custo de transporte e armazenagem. A solução também deve satisfazer as restrições de capacidade das fábricas e armazéns (GOLMOHAMMADI *et al.*, 2010).

A globalização das atividades econômicas, juntamente com o rápido desenvolvimento nas tecnologias de informação, levou a menores ciclos de vida dos produtos, lotes de compra menores e comportamento dinâmicos dos consumidores em

relação às preferências. Estes aspectos têm contribuído junto a crescente incerteza da demanda e, conseqüentemente, para uma rede da cadeia de suprimentos forte torna-se ainda mais importante (MELO; NICKEL; SALDANHA-DA-GAMA, 2009). Dada essa conjuntura, observa-se a necessidade de uma gestão eficiente. As técnicas de Pesquisa Operacional estão sendo utilizadas cada vez mais nestes contextos a fim de proporcionar não apenas uma solução viável, mas, em muitos casos, uma solução ótima para problemas relacionados à cadeia de suprimentos. Golmohammadi *et al.* (2010) afirmam que atualmente a gestão da cadeia de suprimentos é uma das mais importantes áreas de interesse de pesquisadores que trabalham em pesquisa operacional aplicada. O objetivo fundamental neste campo de estudo é determinar a melhor estratégia para coordenar a produção, transporte e estoque com o melhor tempo e custo possíveis.

Esta dissertação tem como tema a modelagem do Projeto de Rede da Cadeia de Suprimentos (Supply Chain Network Design - SCND) de uma indústria que atua com um grande número de matérias-primas e produtos. As modelagens propostas visam minimizar os custos relativos à rede da cadeia de suprimentos e contribuir para a gestão operacional da empresa.

1.1 CONTEXTO DA PESQUISA

A necessidade constante das empresas desenvolverem alternativas de sobrevivência e de superar seus próprios resultados estimula investimentos em novas estruturas. Atualmente, as indústrias procuram aliar seus planos estratégicos com as oportunidades que surgem através do desenvolvimento de políticas de incentivo à produção. Nesse sentido, o foco de pesquisa é uma empresa que atua na indústria de produtos a base de borracha (commodities). A empresa está investindo na construção de futuras instalações para sua planta industrial e devido à nova localização geográfica torna-se necessário estruturar seu sistema de atendimento e distribuição. Sendo assim, todos os fluxos de matéria-prima oriundos de fornecedores, assim como as demandas dos centros de distribuição necessitam ser redimensionadas. Como a empresa fabrica quatro diferentes categorias de produtos é imprescindível considerar os custos de

transporte e distribuição dentro dessa cadeia de suprimentos. Dessa forma, os fluxos das operações para atender as demandas das instalações através de eficientes fluxos de produtos, e conseqüente minimizar custos através da otimização de processos e recursos, necessitam de um modelo apropriado para o projeto da cadeia de suprimentos dessa empresa.

1.2 JUSTIFICATIVA DE PESQUISA

Devido ao aumento da competitividade, ocasionado pela globalização dos mercados, projetos e investimentos em redes de distribuição têm tido grande destaque nas decisões empresariais. Tratando de redes, a cadeia de suprimentos atua também de forma vital na busca de diferenciais competitivos, alinhando as operações das empresas com os seus principais objetivos. Além disso, a estratégia de distribuição é influenciada pelo conjunto de produtos disponibilizados em cada fábrica (planta), pelo abastecimento de matéria-prima dos fornecedores e pela distribuição de produtos acabados para diferentes regiões através dos centros de distribuição (CD). Dessa forma, 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.

Melo, Nickel e Saldanha-da-Gama (2009) afirmam que muita pesquisa ainda é necessária a fim de incluir nos modelos existentes questões que até agora não receberam adequada atenção na literatura. Nota-se, assim, que há espaço para o desenvolvimento de novos modelos (e técnicas de solução) para auxiliar o processo decisório na oferta integrada do planejamento da cadeia.

Nesse sentido, a Pesquisa Operacional tem oferecido diversas técnicas para definir eficientes modelos matemáticos para resolução de problemas ligados a cadeia de suprimentos, entretanto ainda há a necessidade de desenvolver modelos que abordem as características e peculiaridades de cada caso de estudo.

Por fim, devido à relevância do problema na área de logística global e à possibilidade de aplicação do estudo em um caso real e prático, esse trabalho torna-se uma potencial oportunidade de pesquisa. O escopo é baseado em apresentar soluções que exijam menor complexidade matemática e computacional em comparação aos trabalhos encontrados na literatura, porém apresentando resultados satisfatórios para o problema abordado.

1.3 OBJETIVOS DO ESTUDO

Os objetivos dessa dissertação são divididos em objetivo geral e objetivos específicos.

1.3.1 Objetivo geral

Propor uma modelagem matemática para o projeto de rede da cadeia de suprimentos de uma indústria de *multi-commodity*, visando minimizar os custos totais da operação logística.

1.3.2 Objetivos específicos

Para atingir o objetivo geral fazem-se necessários os objetivos específicos a seguir:

- Identificar e estabelecer as variáveis e informações necessárias para construção dos modelos;
- Desenvolver as formulações e as modelagens matemáticas de solução;
- Implementar computacionalmente os modelos matemáticos;

- Realizar experiências computacionais de dimensões reais para verificação dos modelos;
- Analisar a funcionalidade dos modelos matemáticos desenvolvidos através da aplicação em um caso prático;
- Fornecer uma ferramenta de solução que apoie a decisão dos gestores em relação ao projeto logístico da indústria foco dessa pesquisa.

1.4 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

O capítulo 1 introduz o tema de pesquisa, apresenta o contexto e a justificativa do trabalho, estabelece os objetivos do estudo e apresenta a estrutura da dissertação.

O capítulo 2 apresenta a revisão de literatura utilizada para desenvolver a dissertação. São apresentados os principais trabalhos da área de modelagem da cadeia de suprimentos, de fluxo *multi-commodity* e os modelos matemáticos que suportaram as formulações desenvolvidas nessa pesquisa.

O capítulo 3 descreve a aplicação a metodologia de pesquisa, apresenta as etapas da Pesquisa Operacional, os resultados experimentais e a análise de sensibilidade dos modelos.

O capítulo 4 trata da aplicação das modelagens no estudo de caso, são desenvolvidas as análises a partir dos cenários propostos.

No capítulo 5 são apresentadas as conclusões do trabalho, assim como as limitações e as sugestões para futuras pesquisas.

As referências utilizadas nesse trabalho são apresentadas no capítulo 6.

2 REVISÃO DE LITERATURA

A revisão de literatura do trabalho compreende os temas de Projeto da Rede da Cadeia de Suprimentos e Fluxo *Multi-commodity* nos seus aspectos relacionados a trabalhos na área de Pesquisa Operacional para solução de problemas da cadeia de suprimentos. Também são apresentados os principais modelos matemáticos encontrados na literatura que serviram de ponto de partida para a construção dos modelos propostos nessa dissertação.

2.1 PROJETO DE REDE DA CADEIA DE SUPRIMENTOS

A definição do Projeto de Rede da Cadeia de Suprimentos (Supply Chain Network Design – SCND) é um dos problemas mais abrangentes relacionados à cadeia de distribuição, pois envolve decisões em níveis operacionais, táticos e estratégicos (SHEN, 2005). Segundo Jang *et al.* (2002), definir a estrutura de rede de uma cadeia significa determinar o número, a localização, a capacidade e os tipos de plantas e centros de distribuição que serão utilizados. O projeto de rede também estabelece os canais de distribuição e as quantidades de materiais e itens para consumir, produzir e enviar aos fornecedores em cada nível de consumo da cadeia. O número de estágios é determinado com base na complexidade dos problemas fragmentados da rede e dos problemas de integralidade da mesma (PIRKUL; JAYARAMAN, 1998).

Conforme apresenta Jang *et al.* (2002), para solucionar o problema de projeto de rede se decompõem a rede em três sub-redes e procura-se desenvolver modelos matemáticos e metodologias de solução para cada sub-rede. A primeira sub-rede é a rede de entrada que consiste de todos os fornecedores de matérias-primas, peças e serviços, assim como quaisquer outros suprimentos para as fábricas. Esta rede é caracterizada pelas relações globais entre os atores participantes. A segunda sub-rede inclui as plantas onde produtos finais são fabricados, e as instalações de distribuição, como armazéns e centros de distribuição. Os produtos finais são enviados a partir das

plantas de montagem final para os varejistas através de canais de distribuição. A última sub-rede é constituída de uma rede de saídas para consumidores e distribuidores próximos as clientes. Esta sub-rede gera demanda para o produto ou serviço.

Modelos de *Supply Chain Network Design - SCND* (Projeto de Rede da Cadeia de Suprimentos) têm sido desenvolvidos desde o trabalho de Geoffrion e Graves (1974) sobre projeto de redes com múltiplos produtos. Esse modelo foi mais tarde estendido incorporando questões reais de produção, armazenagem e distribuição. Anos mais tarde, Cohen e Lee (1989) discutiram a formulação de um modelo para o problema de Projetos de Rede da Cadeia de Suprimentos. Nesse modelo foram consideradas as decisões de abertura e fechamento de instalações e um objetivo global de minimização de custos. Os autores apresentaram métodos de soluções heurísticas para resolver o problema, e não indicaram uma formulação matemática para o problema. Consequentemente não houve a apresentação de resultados computacionais.

Cohen e Moon (1991) apresentaram outro estudo sobre o problema de Projeto de Rede da Cadeia de Suprimentos. Os autores agruparam os problemas e desenvolveram um modelo de fluxo de rede com múltiplos produtos para encontrar o fluxo de mercadorias ideal em uma cadeia de suprimentos. Nesse trabalho eles consideraram a configuração fixa de facilidades, ou seja, não houve decisões sobre abertura e fechamento de instalações.

Geoffrion e Powers (1995) revisaram um modelo matemático e sua aplicação para cadeia de suprimentos. Eles apresentaram a modelagem de restrições de capacidade das instalações e a limitação de produtos ao longo da cadeia de suprimentos. Os autores afirmam que encontrar a dimensão ótima para uma cadeia de suprimentos integrada é um problema muito difícil de resolver. Eles também discutiram a necessidade de Decomposições de Bender e métodos de fatoração para algoritmos de solução eficiente. De acordo com Vidal e Goetschalckx (1997), o modelo apresentado por Cole (1995) parecia ser mais abrangente para projetos de rede da cadeia de suprimentos de integração interna. Cole (1995) desenvolveu um modelo de programação inteira mista de múltiplos produtos para otimização do sistema integrado da cadeia de suprimentos. Além disso, o objetivo global do modelo foi minimizar os custos estratégicos e operacionais. Nesse caso a abertura e fechamento de instalações foram

considerados custos estratégicos; custos de produção, estoque e transportes foram incorporados aos custos operacionais.

Papageorgiou, Rotstein e Shah (2001) demonstram a análise e aplicação de um modelo integrado de cadeia de suprimentos para empresas da indústria farmacêutica. Os resultados mostraram a aplicabilidade do programa inteiro misto em larga escala para encontrar a solução ideal em uma cadeia de suprimentos real.

Alonso-Ayuso *et al.* (2003) apresentaram o modelo 0-1 para a versão de um modelo de planejamento estratégico da cadeia de suprimentos, bem como uma versão de dois estágios estocásticos. O algoritmo proposto para solução baseia-se na coordenação algorítmica *branch and fix*.

Ma e Suo (2006) desenvolveram um modelo para concepção de redes logísticas com vários produtos. Um processo iterativo foi utilizado para projetar a rede de logística. Primeiramente um modelo de programação linear inteira mista foi utilizado para configurar a rede. Em seguida, com base nos resultados obtidos, um modelo de planejamento de estoques para vários produtos foi desenvolvido para decidir os tamanhos dos lotes e ordenar a frequência de cada produto em cada nó da rede logística. Um modelo de roteamento de veículo foi utilizado para localizar a menor rota dos atacadistas aos varejistas.

2.2 PROBLEMA DE FLUXO *MULTI-COMMODITY*

Geoffrion e Graves (1974) realizaram o estudo pioneiro que trata do projeto do sistema de distribuição incorporando *multi-commodity*. Esse trabalho é caracterizado por abordar múltiplos produtos, capacidade das fábricas e centros de distribuição, fluxo de produtos e atendimento de consumidores. Nesse estudo foi utilizado o método de Decomposições de Bender para solução considerando o subproblema de programação linear e decompondo esses subproblemas em diversos problemas independentes de transporte. O modelo foi aplicado em uma indústria de alimentos que produzia em 14 localidades cerca de uma centena de produtos com distribuição nacional através de uma dúzia de centros de distribuição.

A partir do trabalho desenvolvido por Geoffrion e Graves (1974) sobre projeto de rede de distribuição de *multi-commodity*, diversos modelos foram desenvolvidos para resolver problemas de localização, abordando questões relativas a transporte e armazenagem. Pirkul e Jayaraman (1996) tratam da integração da produção, transporte e planejamento de distribuição de *multi-commodity* através um modelo de programação inteira mista para localização de fábricas e centros de distribuição com o objetivo de minimizar custos. Esse modelo admite que cada zona de consumo seja abastecida somente por um centro de distribuição (Single-source). Para solução matemática do modelo foram aplicadas técnicas de relaxamento lagrangeano e heurísticas. No entanto, existem dos modelos de localização que não incorporam todos os aspectos do problema, tais como fornecedores ou seleção de tipo de transporte.

Wu e Golbasi (2004) declaram que coordenar a complexa estrutura de fornecimento e produção não é um problema novo. Mesmo assim, duas tendências nesses setores têm contribuído para intensificar os problemas relacionados ao fluxo de *multi-commodity*. Em primeiro lugar, a tendência de aumento das necessidades do mercado intensifica a dependência operacional da cadeia de suprimentos. No passado, o excesso de estoque era, geralmente, usado para reduzir o impacto das variações de demanda entre as diferentes instalações. Hoje, a maioria das empresas está abolindo esta estratégia de estoques substanciais. Em segundo lugar, a taxa de inovação tecnológica encurta de forma significativa a vida útil de produtos e equipamentos, o que aumenta o custo de capacidade de produção. Isso combinado com a maior variedade de produtos e diminuição dos volumes de produtos para atendimento imediato propicia maiores cruzamentos de carregamentos entre as instalações.

Jayaraman e Pirkul (2001) afirmam que o fluxo de materiais na cadeia de produção e os sistemas de distribuição são gerenciados por uma variedade de processos. Os autores destacam ainda que os materiais enviados às plantas produtoras (fábricas) são suprimentos que podem ser fornecidos por diferentes fontes, conforme a Figura 1 apresenta a seguir. Conseqüentemente, os produtos acabados podem ser transportados para diferentes armazéns, os quais são responsáveis pela distribuição de múltiplos produtos sujeitos às demandas dos consumidores. Nesse modelo é mantida a condição de abastecimento da demanda por um centro de distribuição. Os autores tratam o problema de múltiplos produtos através do agrupamento de produtos para transporte.

Isto reduz drasticamente o número de variáveis e facilita a solução do modelo, porém minora o retrato do modelo em relação ao problema real.

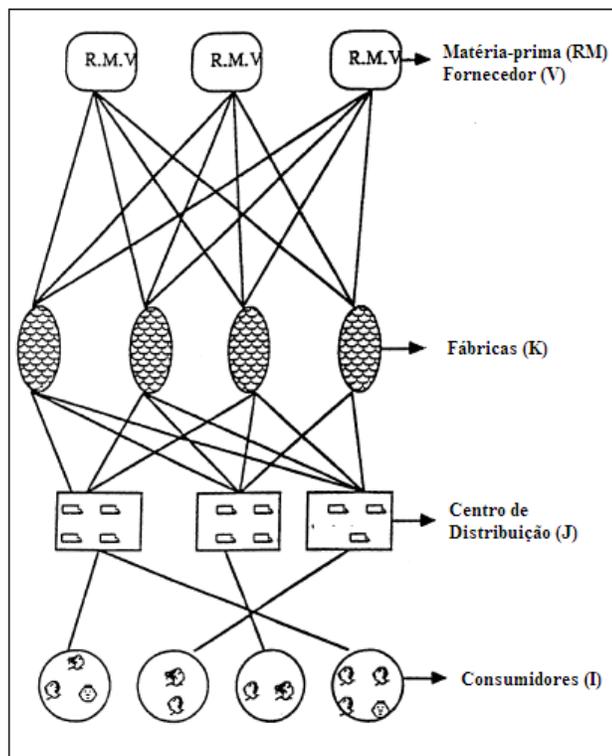


Figura 1: Modelo de distribuição integrado de múltiplas plantas e produtos

Fonte: Adaptado de Jayaraman e Pirkul (2001)

Shen (2005) apresenta o problema do projeto de rede da cadeia de suprimento de *multi-commodity* considerando múltiplos produtos ou grupos de produtos. O modelo determina a localização das instalações e o abastecimento dos clientes através dos centros de distribuição que minimizam custos totais. Esse é o primeiro modelo de projeto da cadeia de suprimentos com *multi-commodity* que inclui a economia em escala na cadeia de abastecimento em relação a custos (custos de estoque, por exemplo). Um algoritmo para solução é proposto, sendo os resultados apresentados mais eficientes quando comparados a soluções de algoritmos já existentes.

Li, Chu e Prins (2009) abordam o *Capacitated Plant Location Problem* (Problema de Localização e Capacidade de Planta) incorporando o problema de fluxo de *multi-commodity*. Este problema envolve a localização das fábricas com capacidade de movimentar o fluxo de múltiplos produtos respeitando as restrições de capacidade de cada fábrica e o atendimento da demanda de cada consumidor. O método de solução é

desenvolvido a partir de relaxamento e heurística lagrangeana, otimização de subgradiente e *Tabu Search*. A implementação computacional foi realizada utilizando Cplex© e as instâncias utilizadas para testar o modelo foram construídas por dados criados a partir de uma ferramenta digital geradora de aleatórios.

2.3 MODELOS MATEMÁTICOS DE SOLUÇÃO

No atual contexto de pesquisa encontramos diversos trabalhos acadêmicos que remetem ao tema: *Supply Chain Network Design* (Projeto de Rede da Cadeia de Suprimentos). A literatura pesquisada revelou que não há unanimidade em relação aos modelos matemáticos adotados. Os principais métodos matemáticos de otimização utilizados são: Relaxamento Lagrangeano, técnicas de *Branch and Bound*, Decomposição de Bender, *Tabu Search* e métodos Heurísticos.

Heurísticas podem ser construídas usando a decomposição das redes para prover ganhos de eficiência computacional; a meta-heurística e *Tabu Search* podem ser utilizadas para soluções próximas aplicando regras e prioridades em relação a instalações, bem como rotas e caminhos viáveis. A heurística é processada pela busca iterativa de soluções próximas a partir da solução inicial, podendo através de cada iteração apagar ou adicionar arcos de transportes e nós (centros de distribuição) que são selecionados por regras de prioridade que representam custo operacional.

O uso de programação matemática no funcionamento prático tem alguns inconvenientes: o tempo computacional e de baixa previsibilidade para as soluções. Embora a capacidade computacional dos computadores tenha aumentado significativamente nos últimos anos através de poderosos e eficientes softwares o tempo computacional necessário para resolver problemas de milhares de consumidores, centenas de produtos, dezenas de plantas e centros de distribuição ainda é grande. Nas práticas de negócio as decisões sobre as operações de centros de distribuição são avaliadas para diversos cenários com muitos tipos de dados para alcançar uma solução aceitável. Dessa forma, tempos computacionais com mais de 30 minutos para obter a solução de um modelo, na prática, não é desejado (LEE; KWON, 2010). Outra razão para

preferir métodos heurísticos para otimização é devido ao fato da solução obtida ser de fácil implementação. A solução ideal tem uma tendência de apresentar soluções diferentes apenas com uma pequena alteração dos dados, tais como custo de transporte ou a demanda do cliente.

Li, Chu e Prins (2009) apresentam o método de solução para a combinação do problema de capacidade e localização de fábricas com o problema do mínimo custo para fluxos de múltiplos produtos utilizando relaxamento lagrangeano. Na fase lagrangeana o problema é dividido em dois subproblemas através do relaxamento lagrangeano. Com base em dois subproblemas, a otimização do subgradiente gera um limite inferior de cada iteração e procura atualizar o melhor limite inferior para a combinação dos problemas. A partir do limite inferior obtido em cada iteração do processo de otimização do subgradiente, um método de heurística lagrangeana é utilizado para fornecer uma solução viável pelo reparo do limite inferior da iteração atual e atualizar o melhor limitante superior. Os melhores limites inferiores e superiores são fornecidos no final da fase lagrangeana. Na fase de *Tabu Search*, são feitas tentativas de melhorar os limitantes obtidos na fase anterior (lagrangeana).

Decomposição de Bender é um método que tem sido utilizado para solucionar problemas com um grande número de variáveis contínuas e relativamente poucas variáveis inteiras. Em Magnanti, Mireault e Wong (1986), Decomposições de Bender são usadas para a solução de *Uncapacitated Network Design Problem* (Problema do Projeto de Capacidade de Rede) e “adaptado” para ter a maior eficiência possível. No subproblema, variáveis são mantidas fixas, o qual produz um conjunto fixo de arcos aceitáveis. Uma vez que a decisão de quais arcos serão utilizados, o problema separa o caminho mais curto para cada mercadoria.

Holmberg e Hellstrand (1998) afirmaram que, para resolução do problema de projeto de capacidade de rede, Decomposições de Bender apresentaram ineficiência em testes computacionais preliminares, principalmente devido à dificuldade do problema principal. Resolver o problema principal através de Decomposições de Bender é frequentemente mais difícil do que resoluções através de *Branch and Bound*, em virtude das restrições não estruturadas. Mesmo que o número de variáveis seja pequeno, a árvore de *Branch and Bound* é frequentemente grande. No entanto, Decomposição de Bender é um método para resolver problemas de programação mista. Esta técnica decompõe o

problema principal em subproblemas. No caso de estoques e roteirização o problema é decomposto em um subproblema de alocação de estoques e um problema de roteirização, por exemplo. Mohammadi Bidhandi *et al.* (2009) indicam que o método de Decomposições Bender é um método eficiente para resolver problemas de *SCND* do inglês *Supply Chain Network Design*, e pode superar as técnicas tradicionais como o relaxamento *Branch and Bound* ou de Lagrange. No entanto, o maior obstáculo associado Decomposições de Bender é a solução do problema mestre, como em muitos problemas da vida real o modelo será NP-Hard.

Daskin (1995) discute o problema do fluxo de múltiplos produtos no sistema de distribuição apresentando um caso genérico que envolve o transporte de produtos a partir das fábricas diretamente para o mercado consumidor ou através de centros de distribuição. Para modelar o problema é definida a formulação que segue:

Parâmetros:

h_i^k = demanda do produto k no mercado i ;

f_j = custo fixo de localização do centro de distribuição no local j ;

c_{ijm}^k = custo de produção por unidade do produto k na fábrica m transportado para o mercado i pelo centro de distribuição no local j ;

S_m^k = capacidade da fábrica m para produzir o produto k . Observe que estamos assumindo que a capacidade de produção de cada fábrica para diferentes produtos é independente. Em geral, isso não acontece em problemas reais;

M = um número muito grande.

Variáveis de Decisão:

Y_{ijm}^k = fluxo de produto k da fábrica m pra o mercado i através do centro de distribuição j ;

X_j = 1 se localizar um centro de distribuição no local j , 0 caso contrário.

Formulação simples do modelo matemático:

$$\min \sum_j f_j X_j + \sum_i \sum_j \sum_m \sum_k c_{ijm}^k Y_{ijm}^k \quad (1a)$$

Sujeito a:

$$\sum_i \sum_m \sum_k Y_{ijm}^k \leq MX_j \quad \forall j \quad (1b)$$

$$\sum_j \sum_m Y_{ijm}^k \geq h_j^k \quad \forall i, k \quad (1c)$$

$$\sum_i \sum_j Y_{ijm}^k \leq S_m^k \quad \forall m, k \quad (1d)$$

$$Y_{ijm}^k \geq 0 \quad \forall i, j, m, k \quad (1e)$$

$$X_j = \{0, 1\} \quad \forall j \quad (1f)$$

A função objetivo (1a) minimiza a soma dos custos fixos de localização dos centros de distribuição e dos custos variáveis. Nota-se que um grande número de custos pode ser incorporado à variável de custos (c_{ijm}^k) incluindo o custo unitário de produção na fábrica m , custo unitário de transporte entre a fábrica m e o centro de distribuição localizado em j , qualquer custo unitário variável do centro de distribuição em j , e o custo de transporte entre o local j e o mercado i . Todos esses custos unitários dependem do produto em questão. A restrição (1b) assegura que o fluxo de produtos através do centro de distribuição só pode ser positivo se houver centro de distribuição no local j . A restrição (1c) garante que a quantidade total de produto k enviada para o mercado i por todas as fábricas e centros de distribuição deve ser maior ou igual à demanda do produto k no mercado i . Do mesmo modo, a restrição (1d) assegura que a quantidade de produto total de produto k não excede a capacidade de produção da fábrica m . Por fim, as restrições (1e) e (1f) são restrições de não negatividade e integralidade, respectivamente.

O modelo, de caráter didático, apresentado por Daskin (1995) não aborda a questão de capacidade dos centros de distribuição e não utiliza restrição para garantir que um mercado seja abastecido por um único centro de distribuição, ou seja, não é um modelo de abordagem “single-source”.

O trabalho realizado por Jayaraman e Pirkul (2001) apresenta a formulação de um modelo de programação inteira mista (mixed-integer programming formulation) para minimização de custos sujeitos às restrições de fornecimento de matérias-primas, capacidade das fábricas e dos centros de distribuição para atender as demandas das zonas de consumo. Neste modelo as zonas de consumo recebem produtos de um único centro de distribuição, sendo assim denominada uma abordagem single-source. Modelos baseados em fontes únicas de abastecimento têm sido utilizados em diversos autores em trabalhos de modelagem da cadeia de suprimentos, declaram os autores.

O modelo de Jayaraman e Pirkul (2001) propõe três grandes estruturas de custos: custos de produção que incorporam os custos fixos e variáveis da operação das fábricas (plantas), custos fixos e variáveis relativos ao transporte de matérias-primas provenientes de fornecedores para as fábricas, e custos fixos e variáveis de distribuição dos produtos acabados a partir das fábricas para as zonas de consumo através dos centros de distribuição. A modelagem matemática é apresentada na notação a seguir.

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 de um 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 = máximo número de centros de distribuição em operação;

P = máximo número de fábricas.

As variáveis de decisão a seguir são usadas no modelo:

$z_j = 1$ se o centro de distribuição j está aberto, 0 caso contrário;

$p_k = 1$ se a fábrica k está aberta, 0 caso contrário;

$y_{ij} = 1$ se o centro de distribuição j serve a zona de consumo i , 0 caso contrário;

b_{vkr} = quantidade de matéria-prima r transportado 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 .

Função objetivo do problema P:

$$\begin{aligned} \min \sum_j o_j + \sum_i \sum_j \sum_l v_j a_{il} y_{ij} + \sum_k g_k p_k + \sum_l \sum_k v_{lk} x_{lk} + \sum_v \sum_k \sum_r t_{vkr} b_{vkr} \\ + \sum_i \sum_j \sum_k \sum_l c_{ijkl} q_{ijkl} \end{aligned} \quad (2a)$$

Sujeito a:

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

$$\sum_i \sum_j a_{ij} y_{ij} \leq W_j z_j \quad \forall j \quad (2c)$$

$$\sum_j z_j \leq W \quad (2d)$$

$$\sum_k q_{ijkl} = a_{ij} y_{ij} \quad \forall i, j, l \quad (2e)$$

$$\sum_k b_{vkr} \leq SUP_{vr} \quad \forall v, r \quad (2f)$$

$$\sum_l u_{rl} x_{lk} \leq \sum_k b_{vkr} \quad \forall r, k \quad (2g)$$

$$\sum_l s_l x_{lk} \leq \sum_k D_k p_k \quad \forall k \quad (2h)$$

$$\sum_i \sum_j q_{ijkl} \leq x_{lk} \quad \forall l, k \quad (2i)$$

$$\sum_k p_k \leq P \quad (2j)$$

$$z_j = \{0,1\} \quad \forall j \quad (2k)$$

$$p_k = \{0,1\} \quad \forall k \quad (2l)$$

$$y_{ij} = \{0,1\} \quad \forall i, j \quad (2m)$$

$$b_{vkr} \geq 0 \quad \forall v, k, r \quad (2n)$$

$$x_{lk} \geq 0 \quad \forall k, l \quad (2o)$$

$$q_{ijkl} \geq 0 \quad \forall i, j, k, l \quad (2p)$$

A função objetivo (2a) minimiza o custo total da cadeia de suprimentos, incluindo o custo fixo de operação e abertura de fábricas e centros de distribuição, o custo variável de produção e distribuição, o custo de transporte de matérias-primas e dos produtos a partir das fábricas até as zonas de consumo utilizando os centros de distribuição.

A restrição (2b) representa a atribuição de um único centro de distribuição pode abastecer um consumidor. O volume de processamento anual de cada centro de distribuição é imposto pela restrição (2c). A restrição (2d) limita o número de centros de

distribuição que podem ser abertos. Demanda das zonas de consumo para todos os produtos é representada para restrição (2e). A restrição (2f) descreve a condição de fornecimento de matérias-primas. As necessidades de matérias-primas são representadas pela restrição (2g). A capacidade de produção da fábrica é descrita pela restrição (2h). Na restrição (2i) a quantidade total dos produtos embarcados de uma fábrica para as zonas de consumo através dos centros de distribuição não pode exceder o montante de produtos que são produzidos em tal fábrica. Por fim, a restrição (2j) limita o número de plantas que estão abertas. As restrições (2k), (2l) e (2m) impõem a restrição de integralidade sobre as variáveis de decisão z_j , p_k e y_{ij} e as restrições (2n), (2o) e (2p) impõem a restrição de não negatividade das variáveis b_{vkr} , x_{lk} e q_{ijkl} .

Nesse capítulo foram apresentados trabalhos realizados na área de Cadeia de Suprimentos que abordam os temas de Projeto de Rede da Cadeia de Suprimentos e Fluxo *Multi-commodity*; esses temas contribuem fortemente para o desenvolvimento dessa dissertação. Também foram apresentados os principais modelos matemáticos que serviram de base para atingir o objetivo geral desse trabalho. A seguir é apresentada a metodologia de pesquisa e as etapas realizadas dentro do processo metodológico.

3 METODOLOGIA DE PESQUISA

O início dessa pesquisa está embasado em um estudo exploratório abordando um estudo de caso (YIN, 2001) utilizando vários níveis de análise e tratamento de dados. A solução de problemas de otimização através da modelagem está fortemente apoiado no método de Pesquisa Operacional.

Johnson e Montgomery (1974) definem a Pesquisa Operacional como um método científico de gestão do processo decisório. Através desse método os problemas de decisão são transformados em modelos matemáticos que procuram determinar a decisão ótima para o problema analisado. A modelagem de problemas de Pesquisa Operacional caracteriza-se em determinar uma função objetivo, que pode ser minimizada ou maximizada, e identificar as restrições que devem ser consideradas na solução do problema. Sendo assim, o desenvolvimento desse trabalho está fundamentado no método de Pesquisa Operacional (WAGNER, 1986; ANDRADE, 1990; WINSTON, 1994) representado no desenho de pesquisa da Figura 2.

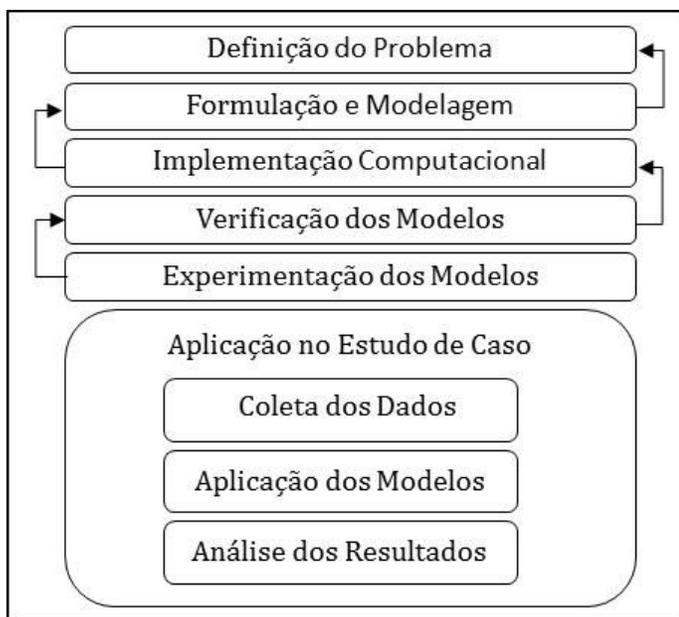


Figura 2: Desenho de pesquisa

Nas próximas seções são abordadas as etapas do processo metodológico desenvolvido a partir do desenho de pesquisa o qual conduz a realização desse trabalho.

3.1 DEFINIÇÃO DO PROBLEMA

A definição do problema tem como ponto de partida o contexto da pesquisa apresentado na seção 1.1 desse trabalho. A empresa é responsável pela produção de um conjunto de produtos a base de borracha. Esses produtos possuem diversos tamanhos, propriedades e especificações diferentes entre si, porém são constituídos, basicamente, das mesmas matérias-primas. As plantas produtoras (fábricas) são abastecidas por diversos fornecedores. O conjunto de centros de distribuições recebe diversos tipos de produtos provenientes das plantas produtoras. Por sua vez, os centros de distribuição são responsáveis por enviar às zonas de consumo as quantidades de cada produto de acordo com a demanda. Dessa forma, constitui-se a rede da cadeia de suprimentos dessa indústria, desde os fornecedores de matéria-prima até os consumidores. A Figura 1 apresentada no capítulo anterior ilustra, de forma resumida, o problema tratado nessa pesquisa.

A empresa tem um projeto de investimento para construção de uma nova fábrica. Essa fábrica será responsável por suprir os centros de distribuição já existentes, assim como suprir centros de distribuição que poderão ser construídos de acordo com a nova posição geográfica da fábrica. O investimento nessa nova planta produtora não descarta a utilização das fábricas já existentes, porém ajustes de capacidades devem ser realizados nas mesmas. Ao tratar-se uma cadeia de distribuição de produtos físicos existe a necessidade de transporte entre os atores dessa rede. Sendo assim, é necessário considerar os custos relativos ao transporte de matéria-prima e de produtos em cada estágio da cadeia.

Devido à quantidade de produtos envolvidos nos fluxos da rede de suprimentos é necessário considerar as questões de capacidade de produção de cada fábrica assim como capacidade de processamento de cada centro de distribuição. Conseqüentemente, devem ser consideradas as questões de custos fixos e custos variáveis das instalações (fábricas e centros de distribuição).

Dado esse cenário, a definição do problema consiste em determinar o conjunto de centros de distribuição necessários para atender a demanda de produtos das zonas de consumo com menor custo operacional. Para isso é necessário considerar as

quantidades de cada uma das matérias-primas que devem ser adquiridas a partir de cada fornecedor, assim como a quantidade de produto que será produzida em cada fábrica.

No entanto, por se tratar de um projeto, a empresa não tem definida a estratégia de distribuição em relação ao abastecimento das áreas de demanda. Dessa forma, no problema abordado não se tem definido se uma área de demanda poderá ser abastecida por mais de um centro de distribuição ou se esse fornecimento será exclusivo (single-source). Sendo assim, nessa dissertação o problema é abordado através do desenvolvimento de 3 (três) modelos matemáticos para o projeto logístico da cadeia de suprimentos. A abordagem denominada “Single-source” pressupõe que cada zona de consumo recebe produtos somente de um centro de distribuição. A abordagem “Path-based” possibilita que as zonas de consumo sejam abastecidas por mais de um centro de distribuição e apresenta os custos em forma de “caminhos” entre as fábricas e as zonas de consumo, passando por centros de distribuição. A terceira abordagem chamada nesse trabalho de “Arc-based” apresenta a mesma característica da abordagem “Path-based” em relação ao abastecimento dos clientes por mais de um centro de distribuição, porém a estrutura de custos de transporte entre fábricas, centros de distribuição e clientes são apresentadas através de arcos que ligam cada um desses atores.

A seção seguinte trata de demonstrar as formulações matemáticas de cada uma das 3 (três) abordagens ilustrando as variáveis, a função objetivo e as funções de restrição de cada modelo.

3.2 FORMULAÇÃO E MODELAGEM MATEMÁTICA

A formulação e a modelagem devem ser elaboradas de forma que representem o sistema e traga soluções de acordo com a definição do problema. Dessa forma, os modelos de programação inteira mista são propostos através do uso de variáveis que indicam a relação entre as fábricas, os centros de distribuição, os produtos e as zonas de consumo. A utilização de variáveis inteiras é aplicada para abertura e fechamento dos centros de distribuição. As variáveis contínuas são definidas a partir da quantidade de

matéria-prima dos fornecedores para fábricas e da quantidade de produtos enviados das fábricas para as zonas de consumo através dos centros de distribuição. O trabalho de Jayaraman e Pirkul (2001) serve de base para as formulações matemáticas e para desenvolvimento das modelagens apresentadas nesse trabalho. No entanto, os modelos apresentados nessa dissertação procuram expandir a formulação apresentada por Jayaraman e Pirkul (2001) utilizando 3 (três) diferentes abordagens através de modelagens matemáticas que possibilitem diminuir a complexidade de solução.

Conjuntos:

C : conjunto de zonas de consumos (clientes), representados por c ;

W : conjunto de centros de distribuição (armazéns), representados por w ;

F : conjunto de fábricas (plantas), representados por f ;

R : conjunto de matérias-primas, representados por r ;

V : conjunto de fornecedores (supridores), representados por v ;

S : conjunto de produtos, representados por s ;

P : conjunto de caminhos (trajetos), representados por p .

Parâmetros:

d_{sc} : demanda por produtos $s \in S$ da zona de consumo $c \in C$;

U_f : máximo de fábricas que podem ser abertas;

U_w : máximo de centros de distribuição 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 por unidade de produto $s \in S$;

CAP_w : capacidade de transferência dos centros de distribuição;

CAP_{vr} : capacidade de suprimento da matéria-prima $r \in R$ do fornecedor $v \in V$;

CAP_f : capacidade de produção da fábrica $f \in F$;

CT_f^0 : custo fixo anual de funcionamento da fábrica $f \in F$;

CT_w^0 : custo fixo anual de funcionamento do centro de distribuição $w \in W$;

CT_w^g : custo unitário de transferência do centro de distribuição $w \in W$;

CT_{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_{ps}^t : custo unitário de transporte do produto $s \in S$ utilizando o caminho $p \in P$;

CT_{fws}^t : custo unitário de transporte do produto $s \in S$ utilizando a fábrica $f \in F$ para o centro de distribuição $w \in W$;

CT_{wcs}^t : custo unitário de transporte do produto $s \in S$ utilizando o centro de distribuição $w \in W$ para a zona de consumo $c \in C$;

u_{min} : mínima demanda para abertura do centro de distribuição $w \in W$.

Os conjuntos, variáveis de decisão e parâmetros apresentados são utilizados nas formulações matemáticas que envolvem os modelos “single-source”, “path-based” e “arc-based”.

3.2.1 Modelagem “Single-source”

Trataremos nessa subseção da formulação matemática do modelo “single-source” que se caracteriza pela condição de uma zona de consumo ser abastecida por um único centro de distribuição. A Figura 3 ilustra o conceito da abordagem “single-source” mostrando que cada zona de consumo é atendida somente por um centro de distribuição.

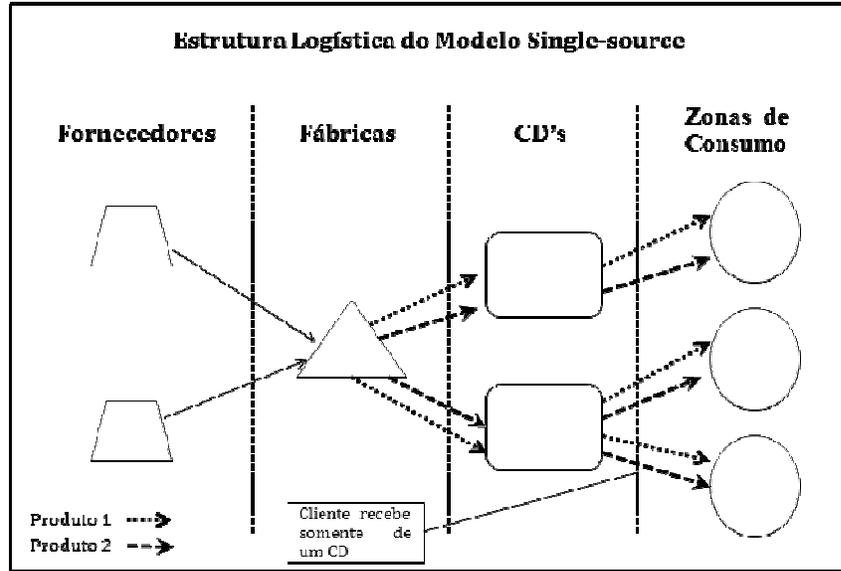


Figura 3: Exemplo Modelo "Single-Source"

Variáveis de Decisão:

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

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, 1 se o centro de distribuição $w \in W$ está selecionado, e 0 caso contrário.

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

Função Objetivo:

$$\begin{aligned}
 \min \sum_{w \in W} CT_w^o z_w &+ \sum_{w \in W} \sum_{c \in C} \sum_{s \in S} CT_w^g d_{sc} g_{wc} + \sum_{f \in F} \sum_{w \in W} \sum_{s \in S} CT_{fs}^p x_{fws} \\
 &+ \sum_{v \in V} \sum_{f \in F} \sum_{r \in R} CT_{vfr}^t y_{vfr} + \sum_{f \in F} \sum_{w \in W} \sum_{s \in S} CT_{fws}^t x_{fws} \\
 &+ \sum_{w \in W} \sum_{c \in C} \sum_{s \in S} CT_{wcs}^t d_{sc} g_{wc}
 \end{aligned} \tag{3a}$$

Sujeito a:

$$\sum_{w \in W} g_{wc} = 1 \quad \forall c \in C \quad (3b)$$

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

$$\sum_{w \in W} z_w \leq U_w \quad (3d)$$

$$\sum_{c \in C} d_{sc} g_{wc} \leq \sum_{f \in F} x_{fws} \quad \forall w \in W, \forall c \in C \quad (3e)$$

$$\sum_{f \in F} y_{vfr} \leq CAP_{vr} \quad \forall r \in R, \forall v \in V \quad (3f)$$

$$\sum_{w \in W} \sum_{s \in S} u_{rs} x_{fws} \leq \sum_{v \in V} y_{vfr} \quad \forall r \in R, \forall f \in F \quad (3g)$$

$$\sum_{w \in W} \sum_{s \in S} u_s x_{fws} \leq CAP_f \quad \forall f \in F \quad (3h)$$

$$\sum_{f \in F} \sum_{s \in S} x_{fws} \geq u_{min} \quad \forall w \in W \quad (3i)$$

$$z_w = \{0,1\} \quad \forall w \in W \quad (3j)$$

$$g_{wc} = \{0,1\} \quad \forall w \in W, \forall c \in C \quad (3k)$$

A função objetivo (3a) minimiza a soma do custo anual dos centros de distribuição, os custos de processamento dos centros de distribuição, os custos de produção das fábricas, os custos de transporte de matéria-prima para as fábricas e os custos de transporte das fábricas para as zonas de consumo através dos centros de distribuição. A restrição (3b) assegura que cada zona de consumo é atribuída para um único centro de distribuição. A restrição (3c) garante que a capacidade de cada centro de distribuição não é violada. A restrição (3d) limita o número de centros de distribuição. A restrição (3e) assegura que os centros de distribuição possuem capacidade suficiente para atender as zonas de consumo. A restrição (3f) garante que a capacidade do fornecedor abastecer a fábrica com matéria-prima é respeitada. A restrição (3g) apresenta que a relação entre matéria-prima e produtos deve ser satisfeita. A restrição (3h) garante que as capacidades das fábricas são respeitadas. A restrição (3i) impõe a

quantidade mínima de produtos para abertura de um centro de distribuição. As restrições (3j) e (3k) são as condições de integralidade das variáveis binárias.

3.2.2 Modelagem “Path-based”

A formulação seguinte corresponde ao modelo denominado “Path-based”, o qual procura resolver a mesma problemática em relação à rede da cadeia de suprimentos através de caminhos entre as fábricas e as zonas de consumo. Nesse modelo não há restrição em relação ao abastecimento das zonas de consumo por mais de um centro de distribuição.

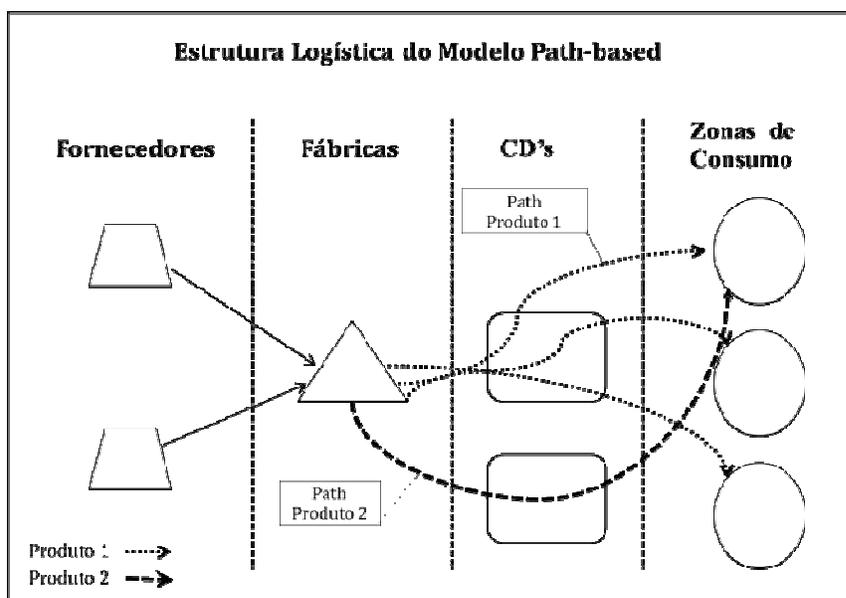


Figura 4: Exemplo Modelo “Path-based”

A ilustração da Figura 4 mostra a estrutura logística através da abordagem “Path-based” na qual os custos de transportes dos produtos são representados por “caminhos” a partir das fábricas até as zonas de consumo passando pelos centros de distribuição. Nessa abordagem cada produto possui um caminho entre a fábrica e o cliente utilizando um centro de distribuição, ou seja, a variável de decisão é definida para os “paths” entre as fábricas e os consumidores.

Variáveis de Decisão:

x_p^s : quantidade de produto $s \in S$ enviada pelo caminho $p \in P$.

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, 1 se o centro de distribuição $w \in W$ está selecionado, e 0 caso contrário.

g_w : variável auxiliar que indica a quantidade de produto que passa pelo centro de distribuição $w \in W$.

Parâmetros:

γ : variável binária, 1 se o caminho $p \in P$ está selecionado para fábrica $f \in F$, e 0 caso contrário.

λ : variável binária, 1 se o caminho $p \in P$ está selecionado para o centro de distribuição $w \in W$, e 0 caso contrário.

δ : variável binária, 1 se o caminho $p \in P$ está selecionado para a zona de consumo $c \in C$, e 0 caso contrário.

Função Objetivo:

$$\begin{aligned} \min \sum_{w \in W} CT_w^o z_w + \sum_{w \in W} CT_w^g g_w + \sum_{f \in F} \sum_{p \in P} \sum_{s \in S} \gamma CT_{fs}^p x_p^s + \sum_{f \in F} \sum_{r \in R} \sum_{v \in V} CT_{fvr}^t y_{vfr} \\ + \sum_{s \in S} \sum_{p \in P} CT_{ps}^t x_p^s \end{aligned} \quad (4a)$$

Sujeito a:

$$\sum_{p \in P} \delta_c^p x_p^s \geq d_{sc} \quad \forall s \in S, \forall c \in C \quad (4b)$$

$$g_w = \sum_{p \in P} \sum_{s \in S} \lambda_w^p x_p^s \quad \forall w \in W \quad (4c)$$

$$g_w \leq CAP_w z_w \quad \forall w \in W \quad (4d)$$

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

$$\sum_{f \in F} y_{vfr} \leq CAP_{vr} \quad \forall r \in R, \forall v \in V \quad (4f)$$

$$\sum_{p \in P} \sum_{s \in S} u_{rs} x_p^s \leq \sum_{v \in V} \sum_{f \in F} y_{vfr} \quad \forall r \in R \quad (4g)$$

$$\sum_{p \in P} \sum_{s \in S} \gamma_f^p u_s x_p^s \leq CAP_f \quad \forall f \in F \quad (4h)$$

$$z_w = \{0,1\} \quad \forall w \in W \quad (4i)$$

$$g_w = \{0,1\} \quad \forall w \in W \quad (4j)$$

$$\gamma = \{0,1\} \quad (4k)$$

$$\lambda = \{0,1\} \quad (4l)$$

$$\delta = \{0,1\} \quad (4m)$$

A função objetivo (4a) minimiza a soma do custo anual dos centros de distribuição, os custos de processamento dos centros de distribuição, os custos de produção das fábricas, os custos de transporte de matéria-prima para as fábricas e os custos de transporte das fábricas para as zonas de consumo através dos centros de distribuição. A restrição (4b) assegura que a demanda das zonas de consumo são satisfeitas. As restrições (4c) e (4d) garantem que a capacidade de cada centro de distribuição é respeitada. A restrição (4e) impõe o número máximo de centros de distribuição. A restrição (4f) assegura a capacidade do fornecedor de prover matéria-prima. A restrição (4g) garante a relação entre a quantidade de matéria-prima e produtos. A restrição (4h) garante que as capacidades das fábricas são respeitadas. As restrições (4i), (4j), (4k), (4l) e (4m) correspondem à condição de integralidade das variáveis binárias.

3.2.3 Modelagem “Arc-based”

A modelo de rede da cadeia de suprimentos denominado “Arc-based” propõe a utilização de arcos de transporte entre as fábricas, os centros de distribuição e as zonas de consumo. Esses arcos representam os custos de transporte entre cada um dos elementos. Essa formulação pode ser chamada de *one-to-many*, pois o modelo possibilita a um “cliente” receber produtos de mais de um centro de distribuição. Nessa formulação foi incluída uma estrutura que limita a quantidade de fábricas que podem ser abertas. A Figura 5 apresenta a estrutura da cadeia de suprimentos a partir da abordagem “Arc-based”.

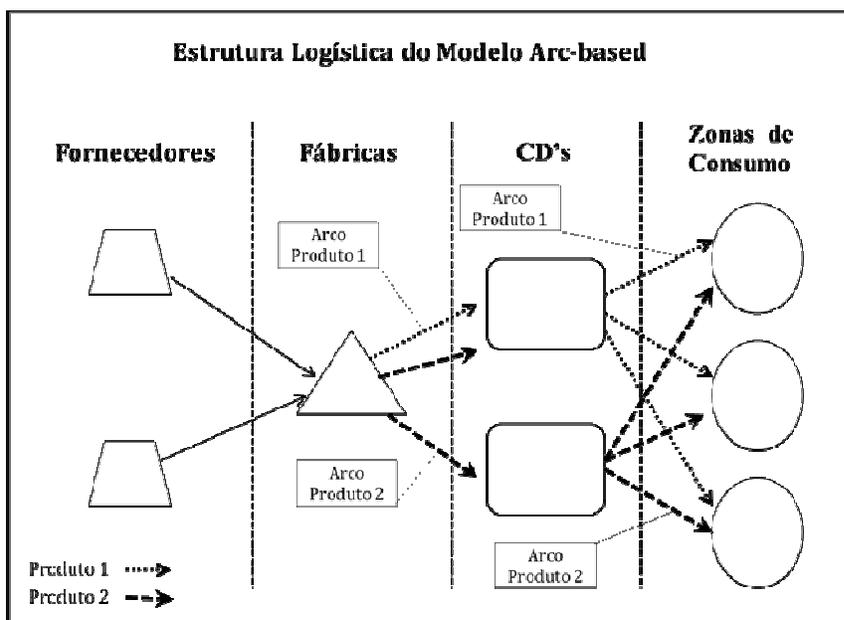


Figura 5: Exemplo Modelo "Arc-based"

Nessa ilustração é possível identificar que as zonas de consumo são atendidas por mais de um centro de distribuição. Dessa forma, um cliente pode receber seus produtos de centros de distribuição diferentes. A abordagem “Arc-based” proporciona que os custos de transportes sejam definidos através de arcos entre as fábricas, centros de distribuição e zonas de consumo de forma independente.

Variáveis de Decisão:

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

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

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

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

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

Função Objetivo:

$$\begin{aligned} \min \quad & \sum_{w \in W} CT_w^o a_w + \sum_{w \in W} CT_f^o b_f + \sum_{f \in F} \sum_{s \in S} \sum_{w \in W} CT_{fs}^p z_{fw}^s + \sum_{w \in W} \sum_{c \in C} \sum_{s \in S} CT_w^g x_{wc}^s \\ & + \sum_{f \in F} \sum_{r \in R} \sum_{v \in V} CT_{fvr}^t y_{vf}^r + \sum_{f \in F} \sum_{w \in W} \sum_{s \in S} CT_{fws}^t z_{fw}^s \\ & + \sum_{w \in W} \sum_{c \in C} \sum_{s \in S} CT_{wcs}^t x_{wc}^s \end{aligned} \quad (5a)$$

Sujeito a:

$$\sum_{w \in W} x_{wc}^s \geq d_c^s \quad \forall s \in S, \forall c \in C \quad (5b)$$

$$\sum_{c \in C} x_{wc}^s = \sum_{f \in F} z_{fw}^s \quad \forall s \in S, \forall w \in W \quad (5c)$$

$$\sum_{c \in C} \sum_{s \in S} x_{wc}^s \leq CAP_w a_w \quad \forall w \in W, \forall s \in S \quad (5d)$$

$$\sum_{f \in F} y_{vf}^r \leq CAP_{vr} \quad \forall r \in R, \forall v \in V \quad (5e)$$

$$\sum_{w \in W} \sum_{s \in S} u_{rs} z_{fw}^s \leq \sum_{v \in V} y_{vf}^r \quad \forall r \in R, \forall f \in F \quad (5f)$$

$$\sum_{w \in W} \sum_{s \in S} u_s z_{fw}^s \leq CAP_f b_f \quad \forall f \in F \quad (5g)$$

$$\sum_{w \in W} a_w \leq U_w \quad (5h)$$

$$\sum_{f \in F} b_f \leq U_f \quad (5i)$$

$$\mathbf{a}_w = \{0,1\} \quad \forall w \in W \quad (5j)$$

$$\mathbf{b}_f = \{0,1\} \quad \forall f \in F \quad (5k)$$

A função objetivo (5a) minimiza a soma do custo anual dos centros de distribuição, dos custos de processamento dos centros de distribuição, dos custos de produção das fábricas, dos custos de transporte de matéria-prima para as fábricas e dos custos de transporte de produtos das fábricas através dos centros de distribuição. A restrição (5b) assegura que as demandas dos clientes (zonas de consumo) são atendidas. A restrição (5c) assegura que a quantidade de produto transportada da fábrica é igual quantidade enviada pelos centros de distribuição para as zonas de consumo. A restrição (5d) garante que a capacidade de cada centro de distribuição não é violada. A restrição (5e) assegura a capacidade de fornecimento de matéria-prima pelos fornecedores. A restrição (5f) garante a relação entre a quantidade de matéria-prima e a quantidade de produto. A restrição (5g) assegura que a capacidade das fábricas é respeitada. As restrições (5h) e (5i) limitam o número de centros de distribuição e fábricas que podem ser abertos, respectivamente. As restrições (5j) e (5k) são as condições de integralidade das variáveis binárias.

Nessa seção foram demonstrados os 3 (três) modelos desenvolvidos para solucionar o problema proposto nessa dissertação. A seguir é apresentada a etapa de implementação computacional desenvolvida para execução dos modelos.

3.3 IMPLEMENTAÇÕES COMPUTACIONAIS

As implementações computacionais dos modelos foram realizadas utilizando o ILOG OPL Studio®, versão 6.3, através da linguagem *AMPL* (A Mathematical Programming Language) baseada em linguagem de programação C, e é resolvida pelo

IBM ILOG CPLEX© versão 12.2. A versão do Optimization Studio Academic Research é fornecida de forma gratuita para desenvolvimento de pesquisas e trabalhos acadêmicos pelo período de 1 (um) ano. Dessa maneira, o desenvolvimento da programação computacional deu-se a partir do modo padrão da ferramenta, assim como obedeceu às limitações impostas pela licença temporária em relação ao uso da mesma. O otimizador IBM ILOG CPLEX©, conhecido simplesmente como Cplex©, é amplamente utilizado para resolução de problemas de programação matemática em trabalhos de pesquisa operacional. Os trabalhos de Vidal e Goetschalckx (2001), Li, Chu e Prins (2009) e Lee e Kwon (2010) desenvolveram modelos matemáticos relacionados à cadeia de suprimentos utilizando a ferramenta otimizadora Cplex©. As instâncias computacionais foram realizadas utilizando o modo padrão de execução. O Cplex© utiliza o método *Branch and Bound* na resolução de problemas *MIP* (Mixed Integer Problem), além de um conjunto de técnicas para eliminação de linhas de colunas e iterações de planos de cortes em busca da solução viável.

Todas as experiências computacionais foram realizadas utilizando um computador pessoal (PC) de processador Intel®/Atom™ 1,33GHz com 1GB de RAM. Embora o equipamento não possua um grande potencial de processamento computacional, isso não foi impeditivo para a execução das instâncias propostas.

A implementação através do IBM ILOG CPLEX© Optimization Studio é desenvolvida a partir dos módulos de programação dos modelos e do módulo de estrutura de dados. As formulações matemáticas são desenvolvidas no módulo de programação dos modelos. Nesse módulo são construídas as estruturas de descrição dos dados, parâmetros, variáveis de decisão, a modelagem das funções objetivo e de restrições. No módulo de dados são construídas as estruturas responsáveis pela origem dos parâmetros que “alimentam” o modelo. Os dados são estruturados em matrizes. Essas matrizes foram elaboradas através de tabelas utilizando a ferramenta Microsoft© Excel 2007. Dessa forma, a leitura dos dados é realizada a partir das planilhas, as quais possibilitam trabalhar com grande quantidade de dados de forma organizada e segura.

3.4 VERIFICAÇÃO DO MODELO

Borenstein e Becker (2000) consideram que a validação de um sistema de apoio à decisão é o processo de definir se o comportamento do modelo representa o sistema do mundo real em determinado domínio em que o problema se aplica. Em relação à verificação, os autores consideram que é um processo relativo à construção correta de um sistema. O objetivo da validação é estabelecer o nível de credibilidade do sistema informatizado para suportar a tomada de decisão, sendo a verificação uma etapa desse processo. Nesse caso, a validação é feita através da verificação da correspondência entre os resultados obtidos e o comportamento esperado do novo sistema (ANDRADE, 1990).

Geoffrion e Graves (1974) apresentam 8 (oito) tipos diferentes de execuções computacionais para lidar adequadamente com os aspectos da modelagem em uma aplicação real. Dentre esses, exercícios probatórios ou “probationary exercices” têm como objetivo expor as possíveis deficiências do modelo, dados ou códigos de programação que possam comprometer a utilidade do modelo implementado. Dessa forma, uma série de exercícios foi realizada para verificar se as soluções encontradas pelo modelo apresentam resultados gerenciais coerentes. As soluções computacionais foram comparadas com as soluções realizadas através de cálculos manuais das equações para permitir a eliminação de erros nas formulações e na implementação dos modelos. Inúmeras instâncias foram executadas a partir da implementação computacional que permitiram a verificação dos modelos implementados em relação à problemática proposta.

A verificação dos 3 (três) modelos foi desenvolvida através da comparação de desempenho e dos resultados a partir de uma das instâncias. Os modelos foram expostos ao mesmo problema, sendo que as variáveis definidas para o mesmo conduzem a resultados iguais para as 3 (três) diferentes implementações. A seguir apresentamos umas das instâncias utilizadas para verificar as implementações dos modelos através da análise das soluções. A estrutura do problema, denominada Cenário A, é apresentada conforme a Tabela 1.

Tabela 1: Cenário A

Zonas de Consumo	Centros de Distribuição	Produtos	Fábricas	Fornecedores	Matérias-primas
10	4	10	3	5	3

3.4.1 Verificação Cenário A

As demandas de cada zona de consumo foram fixadas em 100 unidades para cada produto conforme Tabela 2. A taxa de utilização de matéria-prima para cada produto foi estabelecida de forma uniforme para todos os produtos. De acordo com a Tabela 3 as capacidades de processamento de unidades de produtos para cada centro de distribuição são fixadas em 5.000 unidades. As capacidades de abastecimento de matéria-prima pelos fornecedores são apresentadas em valores suficientes para suprir as necessidades das fábricas. As capacidades de produção das fábricas são estabelecidas entre 4.000 e 7.000 unidades.

Tabela 2: Cenário A: demanda de produtos por cliente

Demanda por zona de consumo										
Produtos	Cliente 1	Cliente 2	Cliente 3	Cliente 4	Cliente 5	Cliente 6	Cliente 7	Cliente 8	Cliente 9	Cliente 10
Produto 1	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
Produto 2	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
Produto 3	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
Produto 4	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
Produto 5	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
Produto 6	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
Produto 7	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
Produto 8	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
Produto 9	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
Produto 10	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
Total	1.000									

O custo unitário de processamento em cada centro de distribuição é de 2 (duas) unidades financeiras. O custo fixo de operação dos centros de distribuição é estabelecido em 50.000 unidades financeiras. O custo unitário de produção de cada produto em cada fábrica é representado por 2 (duas) unidades financeiras. O custo unitário de transporte entre as fábricas e os centros de distribuição é de 3 (três) unidades financeiras, assim

como os custos unitários de transportes entre os centros de distribuição e as zonas de consumo.

Tabela 3: Capacidade de Processamento por CD

Centro de Distribuição	Processamento por CD	
	Capacidade	
CD 1	5.000	
CD 2	5.000	
CD 3	5.000	
CD 4	5.000	

O Cenário A apresenta uma estrutura de variáveis que permite aos 3 (três) modelos encontrar a solução ótima apresentando o mesmo resultado em relação ao custo de operação. A Figura 6 apresenta a tela de resolução do Cplex© Studio com a resolução através da abordagem “single-source”. A solução ótima para o Cenário A apresenta o custo de \$230.000. Nesse modelo 2 (dois) centros de distribuição são abertos (1 e 2), sendo que todas as demandas são satisfeitas. O tempo computacional para resolução através do modelo “single-source” foi de 6,45¹ segundos.

A partir da execução do modelo “single-source” partimos para o teste do modelo “path-based”. Nessa abordagem, a estrutura de dados é bastante diferente em relação aos outros modelos (single-source e arc-based). A estrutura de dados desenvolvida no Microsoft© Excel é composta de caminhos. Cada um desses caminhos possui um custo, sendo que para cada produto existe um caminho que liga a fábrica ao cliente passando, necessariamente, por um centro de distribuição. A implementação do modelo “path-based” é submetida à estrutura do problema do Cenário A.

Os resultados da implementação “path-based”, a partir do Cenário A, são apresentados na Figura 7. A tela do Cplex© Studio demonstra a solução ótima encontrada utilizando 2 (dois) centros de distribuição. Embora a quantidade de centros de distribuição abertos seja igual ao resultado do modelo “single-source”, na solução “path-based” são abertos os centros de distribuição 2 e 3. O tempo computacional para execução é de 9,05 segundos.

¹ Os tempos computacionais do Cplex© são fornecidos no formato horas, minutos, segundos e centésimos (exemplo: 00:00:06:75). Nesse trabalho as informações de tempo computacional são apresentadas devidamente convertidas em segundos (exemplo: 6,45 segundos).

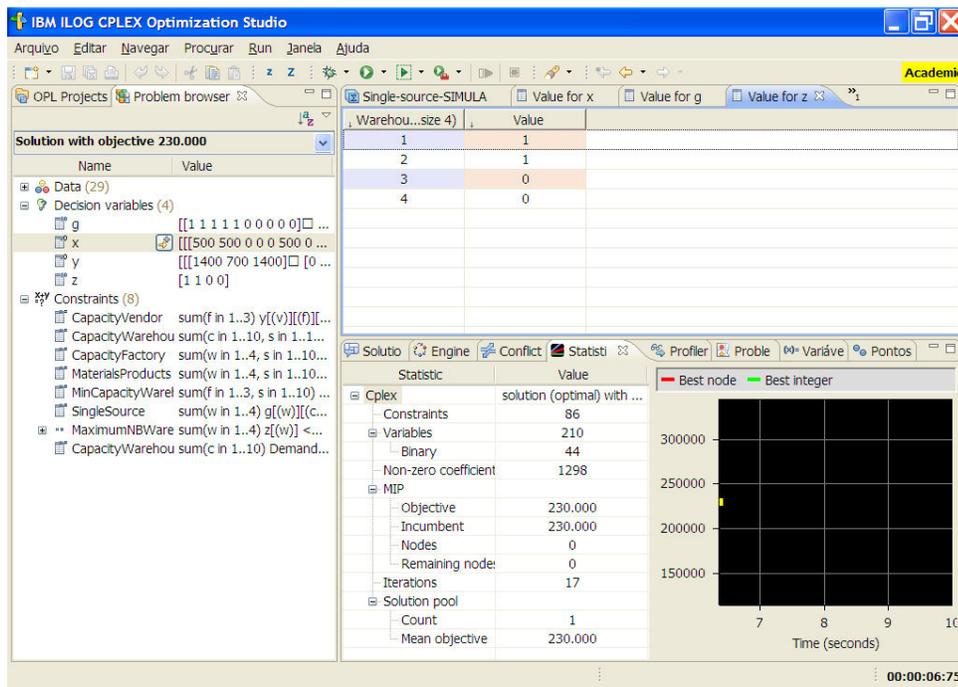


Figura 6: Cplex© Cenário A – “Single-source”

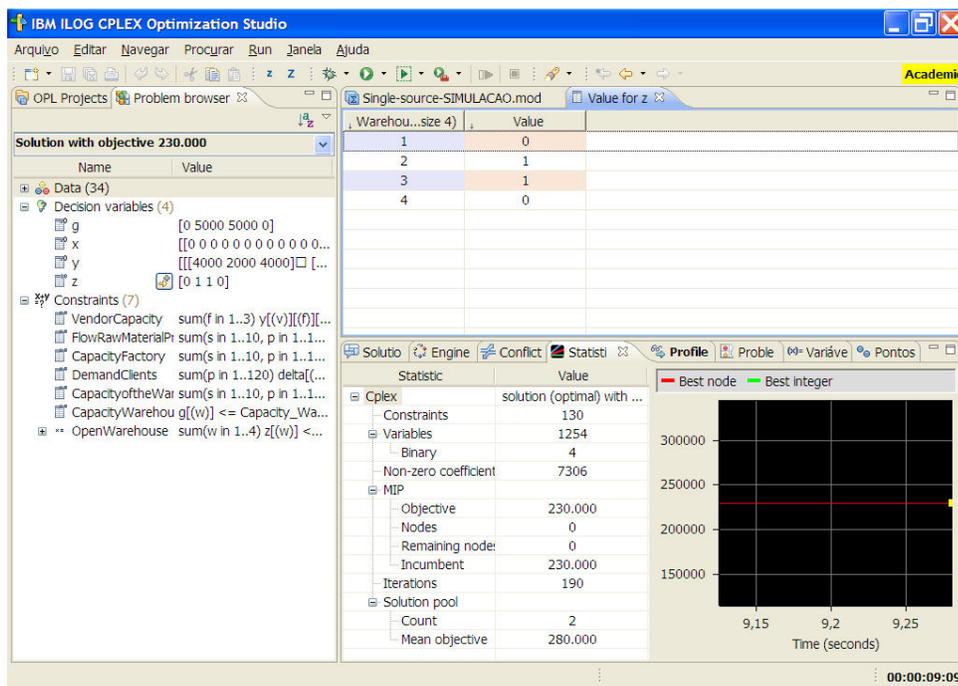


Figura 7: Cplex© Cenário A – “Path-based”

O custo da operação através da abordagem “single-source” também é de \$230.000. Dessa forma, verifica-se que os modelos estão de acordo com a proposta, visto que o problema do Cenário A foi estruturado para que possa se encontrar o mesmo resultado em ambos os modelos.

Para executar a abordagem “arc-based” o Cenário A é mantido. A Figura 8 apresenta os resultados obtidos a partir da execução “arc-based”. O custo da operação é de \$230.000, esse resultado é o mesmo para os 3 (três) modelos, visto que o Cenário A é proposto para esse fim. Na abordagem “arc-based” são abertos 2 (dois) centros de distribuição, os mesmos propostos pelo modelo “path-based”. O tempo computacional para a solução viável é de 6,44 segundos.

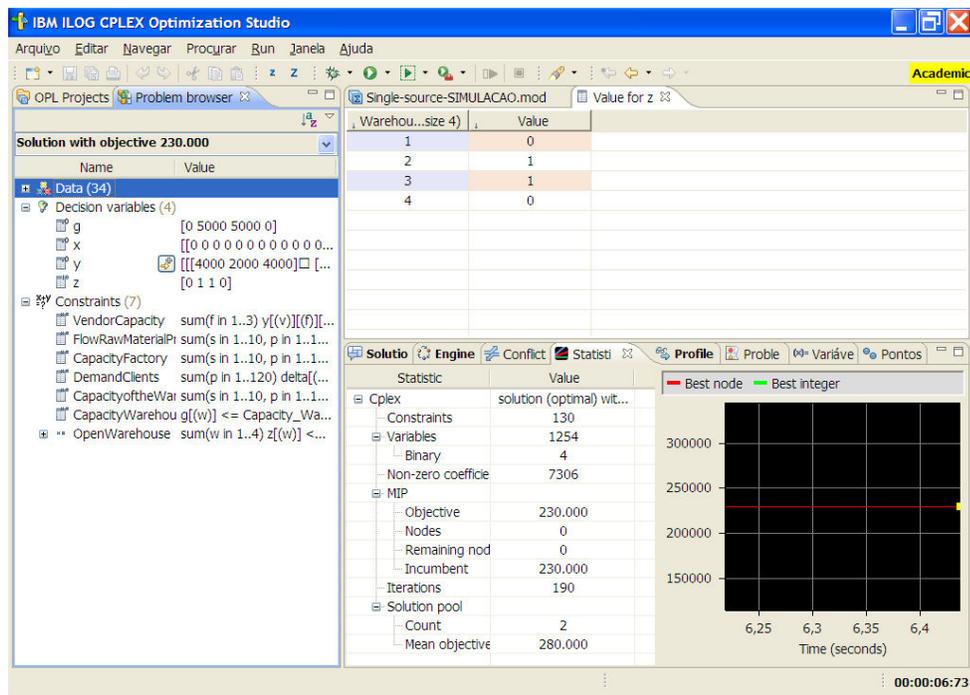


Figura 8: Cplex© Cenário A – “Arc-based”

A fase de verificação foi exaustivamente realizada com o intuito de validar a implementação computacional. O Cenário A foi utilizado como forma de ilustrar inúmeros testes que foram realizados ao longo da programação computacional. As soluções encontradas a partir dos modelos foram confrontadas com soluções realizadas através de cálculos manuais. Dessa forma, foi possível verificar a aderência e a exatidão das formulações matemáticas implementadas em *AMPL*.

Nessa etapa metodológica demonstramos a verificação da implementação computacional em relação à funcionalidade dos modelos frente à problemática apresentada. A seguir trataremos da fase de testes e experimentações envolvendo os modelos matemáticos apresentados nessa dissertação.

3.5 EXPERIMENTAÇÃO E ANÁLISES

Na fase de experimentação estamos interessados em expor as implementações computacionais de cada um dos modelos matemáticos a problemas de dimensões reais que possam demonstrar a aplicabilidade dos mesmos. Os problemas são apresentados em forma de cenários os quais possibilitam diversas configurações e arranjos em relação à estrutura do problema. Nessa fase são desenvolvidos experimentos que demonstrem a funcionalidade dos modelos através de resultados e análises das instâncias executadas.

3.5.1 Experimentação Cenário B

O Cenário B apresenta a estrutura de instalações e variáveis conforme a Tabela 4. O Cenário B é submetido às implementações abordando os modelos “single-source”, “path-based” e “arc-based”.

Tabela 4: Cenário B

Zonas de Consumo	Centros de Distribuição	Produtos	Fábricas	Fornecedores	Matérias-primas
30	10	10	3	5	5

As demandas do Cenário B foram fixadas em 1.000 unidades de cada produto para cada zona de consumo. Nesse cenário o total de produtos é de 300.000 unidades distribuídas para 30 clientes. A taxa de utilização de matéria-prima por unidade de produto acabado é distribuída de forma uniforme para os 10 produtos envolvidos no problema, conforme a Tabela 5 a seguir.

Tabela 5: Cenário B: taxa de utilização de matéria-prima por produto acabado

Taxa por produto acabado										
Matéria-prima	Prod.1	Prod.2	Prod.3	Prod.4	Prod.5	Prod.6	Prod.7	Prod.8	Prod.9	Prod.10
Matéria-Prima 1	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
Matéria-Prima 2	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
Matéria-Prima 3	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
Matéria-Prima 4	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
Matéria-Prima 5	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1

As capacidades de processamento de unidades de produtos para cada centro de distribuição, assim como os custos fixos da operação são estabelecidos conforme Tabela 6. As capacidades de abastecimento de matéria-prima pelos fornecedores são apresentadas em valores suficientes para suprir as necessidades das fábricas.

Tabela 6: Cenário B: capacidade e custos

Centro de Distribuição	Processamento por CD	Operação
	Capacidade	Custo \$
CD 1	40.000	100.000
CD 2	70.000	175.000
CD 3	35.000	87.500
CD 4	60.000	150.000
CD 5	40.000	100.000
CD 6	90.000	225.000
CD 7	30.000	75.000
CD 8	15.000	37.500
CD 9	25.000	62.500
CD 10	45.000	112.500

As capacidades de produção das fábricas são apresentadas entre 90.000 e 140.000 unidades conforme demonstra a Tabela 7. O custo unitário de processamento em cada centro de distribuição é de 2 (duas) unidades financeiras. O custo fixo de operação dos centros de distribuição é estabelecido de forma proporcional à capacidade de processamento.

Tabela 7: Cenário B: produção por fábrica

Produção por unidade	
Fábrica	Capacidade
Fábrica 1	130.000
Fábrica 2	90.000
Fábrica 3	140.000

O custo unitário de produção em cada fábrica é de 2 (duas) unidades financeiras. Os custos unitários de transporte entre as fábricas, os centros de distribuição e as zonas de consumo é fixado em 3 (três) unidades financeiras.

As variáveis de custo de transporte e custo de produção do Cenário B são determinadas de forma uniforme para expor os modelos às mesmas circunstâncias. A partir dessas premissas é possível identificar as peculiaridades de cada modelo em relação às soluções viáveis apresentadas. As capacidades de produção das fábricas e de processamento dos centros de distribuição são determinadas de forma que exista capacidade suficiente para atender as demandas do problema.

A partir da definição da estrutura e dados que representam o Cenário B apresentamos os resultados obtidos para cada um dos modelos. Nessa etapa da experimentação o objetivo é aplicar a implementação de cada modelo a uma instância maior do que as instâncias apresentadas na fase de verificação.

Os resultados da execução “single-source” são apresentados na Figura 9 a qual mostra a tela do Cplex© Studio com a solução viável para o cenário proposto. A solução da função objetivo apresenta o custo de \$4.650.000 para a operação. Para encontrar a solução viável através da abordagem “single-source” foram necessárias 295 iterações através de eliminação de linhas e colunas, além de cortes e operações de *Branch and Bound* executadas pelo Cplex©. O tempo computacional para resolução do problema foi de 8,27 segundos.

A definição da estrutura de cadeia de suprimentos através da modelagem “single-source” propõe a abertura de 5 (cinco) centros de distribuição, sendo eles os de número 1, 2, 4, 5 e 6. A capacidade de processamento total utilizada foi de 300.000 unidades, sendo que o modelo utiliza as 3 (três) fábricas para fornecimento dos produtos aos centros de distribuição.

Os resultados da experimentação do Cenário B através da abordagem “path-based” são demonstrados através da Figura 10. A solução viável apresenta o custo de \$4.650.000, mesmo valor da solução encontrado pelo modelo “single-source”, porém o tempo computacional do modelo “path-based” é de 17,59 segundos. O número de iterações realizadas pelo solver Cplex© também é superior, nesse caso foram realizadas 1.111 iterações.

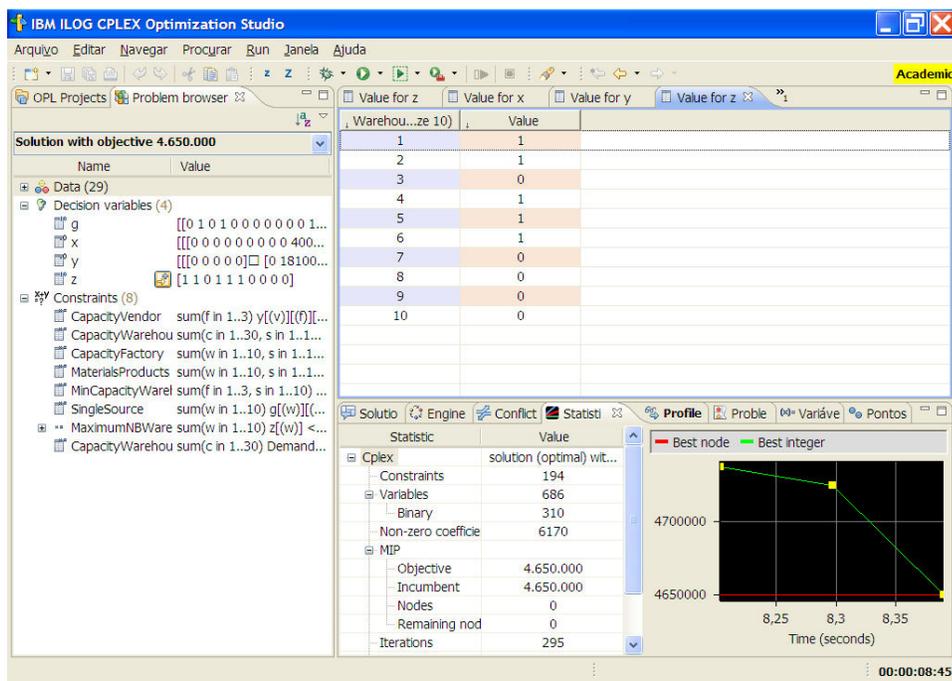


Figura 9: Cplex© Cenário B - “Single-source”

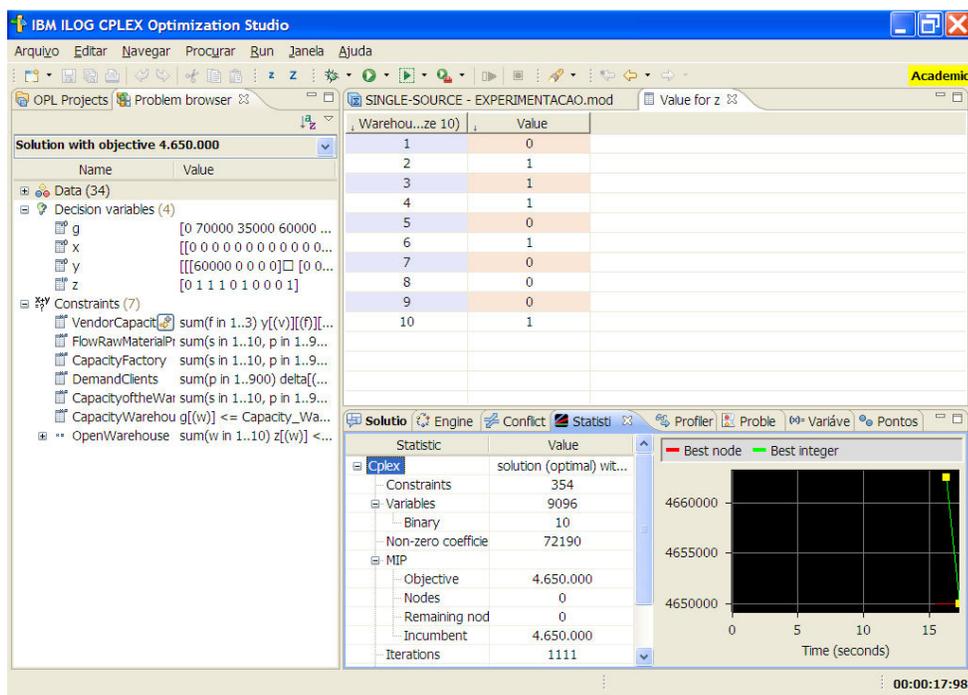


Figura 10: Cplex© Cenário B - “Path-based”

A solução através do modelo “path-based” propõe a abertura de 5 (cinco) centros de distribuição (2, 3, 4, 6 e 10). Essa configuração é diferente da proposta do modelo “single-source”, no entanto todas as demandas e restrições do problema são respeitadas em ambas as abordagens.

A execução da implementação computacional da abordagem “arc-based” é apresentada na Figura 11. Os resultados obtidos a partir da execução do modelo são demonstrados através da tela do Cplex® Studio conforme a seguir.

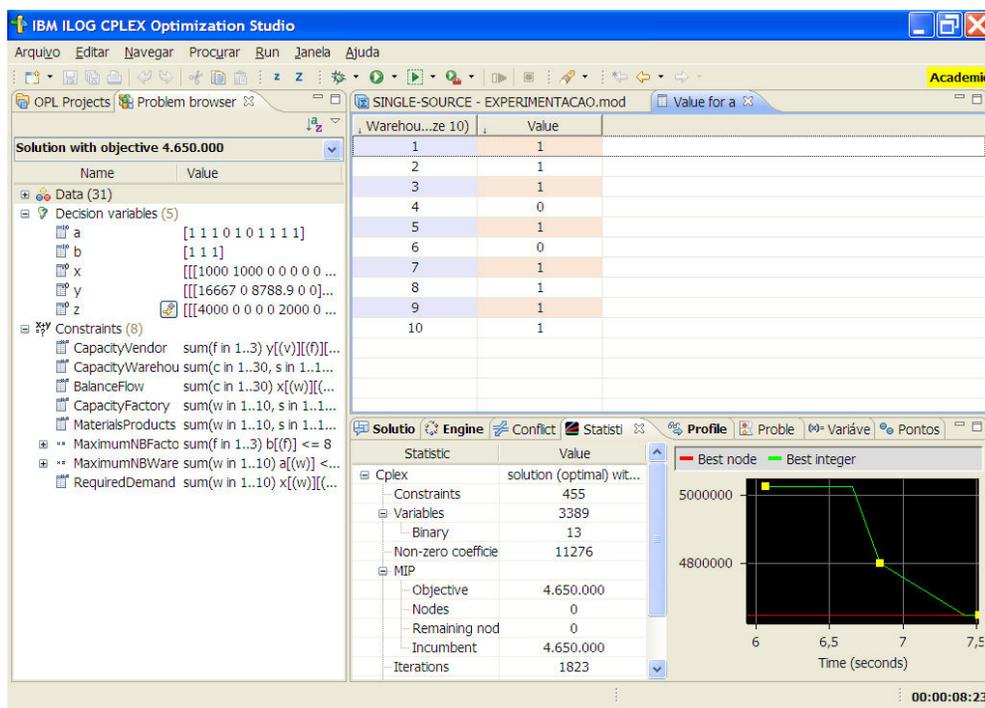


Figura 11: Cplex® Cenário B – “Arc-based”

A solução viável trazida pela abordagem “arc-based” propõe o custo de operação de \$4.650.000. Nessa abordagem foram abertos 8 (oito) centros de distribuição (1, 2, 3, 5, 7, 8, 9 e 10), sendo a capacidade total de processamento utilizada de 300.000 unidades. O número de iterações para solução foi de 1.823 e o tempo computacional de 8,14 segundos.

Dessa forma, após submeter os 3 (três) modelos às condições do Cenário B, é possível identificar peculiaridades e características distintas em relação a cada uma das abordagens. No entanto, as 3 (três) abordagens apresentaram resultados satisfatórios em relação ao desempenho computacional e às soluções encontradas. A Tabela 8 demonstra uma síntese dos principais resultados obtidos a partir das execuções de cada um dos modelos.

Tabela 8: Cenário B: comparação de abordagens

Modelo	Informações e estrutura				
	CD's	Id CD's	Custo \$	Iterações	Tempo (s)
Single-source	5	1,2,4,5,6	\$4.650.000	295	8,27
Path-based	5	2,3,4,6,10	\$4.650.000	1.111	17,59
Arc-based	8	1,2,3,5,7,8,9,10	\$4.650.000	1.823	8,14

Identificamos que as 3 (três) diferentes abordagens encontram soluções viáveis de mesmo custo para o problema representado pelo Cenário B. Isso é possível, pois o Cenário B constitui de um campo experimental que traz as capacidades de processamento dos centros de distribuição diretamente proporcionais aos custos fixos de operação. Dessa forma, abrir ou fechar os centros de distribuição não produzem custo maior visto que a necessidade demandada (300.000 unidades) pode ser igualada à capacidade dos centros de distribuição através de diferentes combinações. No entanto, o exemplo proposto pelo Cenário B expõe os modelos a dimensões maiores em relação ao tamanho da estrutura da cadeia de distribuição.

O modelo “single-source” apresenta um resultado viável em menor tempo computacional, exigindo um menor número de menos iterações para encontrar a solução viável. A execução do modelo “path-based” exige maior esforço computacional visto que para estrutura de dados é necessário a construção de 900 caminhos para definir os custos de transporte entre as fábricas e as zonas de consumo. Dessa forma, introduzindo 10 (dez) produtos para cada zona de consumo, a complexidade da estrutura de dados torna-se fator relevante para execução de instâncias maiores. A abordagem “arc-based” apresenta resultados satisfatórios em relação ao tempo computacional para encontrar as soluções viáveis e possui um conceito semelhante à abordagem “path-based”, ou seja, um cliente pode ser atendido por mais de um centro de distribuição.

Embora os 3 (três) modelos apresentem soluções viáveis e tenham satisfeito as exigências impostas pelo problema, utilizaremos daqui em diante apenas as abordagens “single-source” e “arc-based” para as próximas etapas. A decisão em manter somente os 2 (dois) modelos pretende dar condições de expor essas duas abordagens – conceitualmente diferentes – a problemas de dimensões reais de ampla escala conforme a seguir.

3.5.2 Experimentação Cenário C

Nessa etapa da experimentação os modelos “single-source” e “arc-based” são expostos a problemas de maiores dimensões. De acordo com o segmento da indústria, a rede da cadeia de suprimentos pode admitir diversas estruturas no que diz respeito à quantidade de instalações, armazéns, produtos e clientes. Nesse sentido, o problema é ampliado através da construção do Cenário C no qual procura dimensionar a estrutura do problema de acordo com o caso real de estudo. Os trabalhos de Jayaraman e Pirkul (2001), Li *et al.* (2009), e Lee e Kwon (2010) apresentam dimensões semelhantes em relação a quantidade de elementos envolvidos na estrutura proposta pelo Cenário C. Dessa forma, a estrutura proposta através do Cenário C é construída para representar o grande número de variáveis envolvidas nos problemas práticos do projeto logístico da cadeia de suprimentos. Sendo assim, através desse exemplo procura-se demonstrar a aplicabilidade dos modelos para um problema de dimensão real.

No Cenário C as demandas são apresentadas a partir de 150 zonas de consumo. Os centros de distribuição disponíveis são 10 (dez) e as fábricas são 3 (três). O problema proposto apresenta 5 (cinco) fornecedores para 5 (cinco) tipos de matéria-prima, sendo 40 tipos diferentes de produtos acabados, conforme Tabela 9.

Tabela 9: Cenário C

Zonas de Consumo	Centros de Distribuição	Produtos	Fábricas	Fornecedores	Matérias-primas
150	10	40	3	5	5

O problema apresentado através do Cenário C aumenta consideravelmente a complexidade de solução. Dessa forma, nossas experimentações se valeram de dados e informações que apresentam as características da operação da cadeia de suprimento. Os dados para a construção dos cenários foram gerados a partir da função “ALEATORIOENTRE” do Microsoft® Excel 2007. A função “ALEATORIOENTRE” possibilita delimitar o intervalo no qual as variáveis são criadas, evitando a discrepância entre os dados e possibilitando ao pesquisador controlar o dimensionamento de cada variável. Nesse sentido, a geração de dados para cada variável foi estabelecido dentro dos valores que possam representar a realidade.

Dessa forma, as demandas de cada zona de consumo são estabelecidas entre 100 e 150 unidades, sendo que o total de produtos é 750.982 distribuídos entre 150 clientes. O custo de transporte de matéria-prima dos fornecedores para as fábricas é fixado em 2 (duas) unidades financeiras. O custo de processamento por produto em cada centro de distribuição é atribuído entre 2 e 4 unidades financeiras. O custo de produção para cada fábrica é apresentado entre 2 e 5 unidades financeiras por produto. Os custos de transporte das fábricas para os centros de distribuição e o custo de transporte dos centros de distribuição para as zonas de consumo são atribuídos entre 2 e 6, e entre 2 e 10 unidades financeiras, respectivamente.

A capacidade de processamento de produto para cada centro de distribuição, assim como o custo de operação são apresentados na Tabela 10.

Tabela 10: Cenário C: capacidade e custos

Centro de Distribuição	Processamento por CD	Operação
	Capacidade	Custo \$
CD 1	180.000	240.000
CD 2	270.000	350.000
CD 3	170.000	200.000
CD 4	200.000	250.000
CD 5	150.000	190.000
CD 6	370.000	450.000
CD 7	140.000	180.000
CD 8	120.000	160.000
CD 9	175.000	210.000
CD 10	220.000	275.000

A capacidade de cada fábrica é apresentada na Tabela 11. A taxa de utilização de matéria-prima para cada produto foi estabelecida de forma uniforme para todos os produtos, assim como a taxa de utilização da capacidade por unidade de produto é fixada igualmente para todos os produtos.

Tabela 11: Cenário C: produção por fábrica

Produção por unidade	
Fábrica	Capacidade
Fábrica 1	600.000
Fábrica 2	300.000
Fábrica 3	700.000

A rodagem do modelo “single-source” é realizada a partir das configurações e dados apresentados no Cenário C. A Figura 12 apresenta a tela do Cplex© Studio com os resultados da execução do modelo “single-source”. A solução viável propõe o custo de \$12.895.827, sendo que os centros de distribuição 4, 6 e 10 são abertos. O tempo computacional da execução do modelo foi de 9,80 minutos e o número de iterações realizadas através do solver Cplex© foi de 150.714.

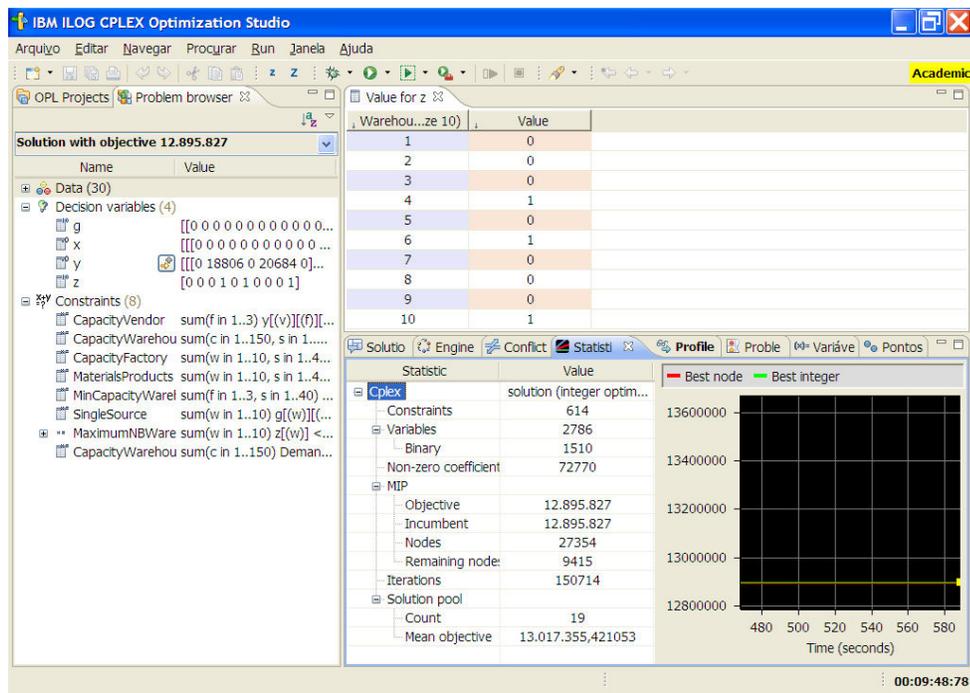


Figura 12: Cplex© Cenário C – “Single-source”

Devido à complexidade do problema o tempo computacional aumentou de forma considerável, no entanto todas as restrições foram respeitadas e a solução viável atende a cada uma das demandas de consumo. No modelo “single-source” a condição que estabelece o abastecimento de uma zona de consumo através de um único centro de distribuição se mantém inalterada.

Seguindo a fase de experimentação a Figura 13 apresenta os resultados a partir da abordagem “arc-based” para o problema representado pelo Cenário C.

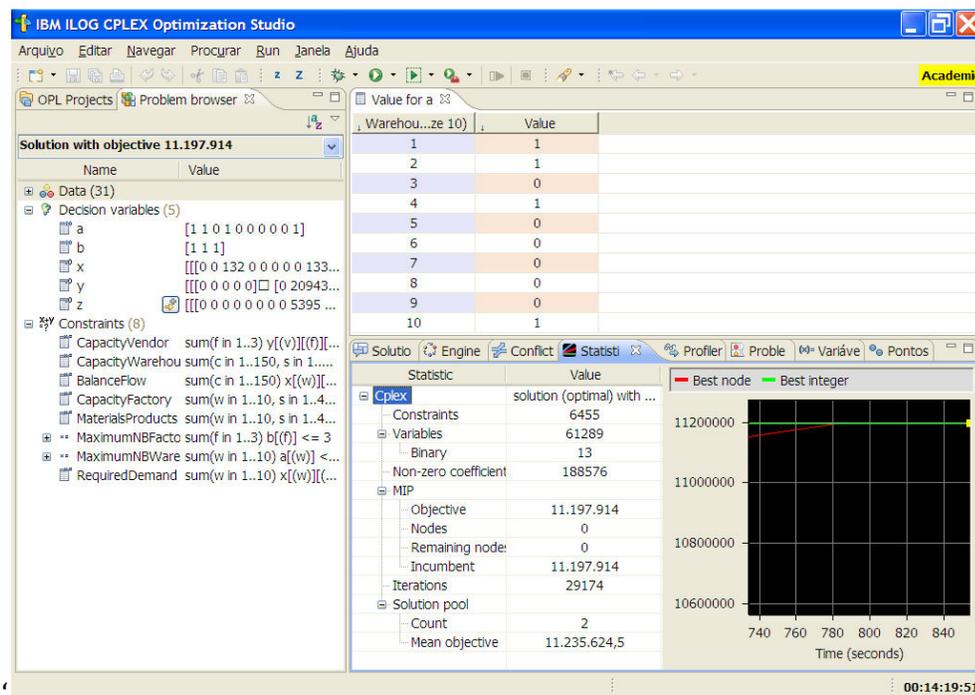


Figura 13: Cplex© Cenário C – “Arc-based”

Na abordagem “arc-based” o custo para solução viável é de \$11.197.914, sendo que o modelo propõe a abertura de 4 centros de distribuição (1, 2, 4 e 10). O tempo computacional para encontrar os resultados foi de 14,32 minutos através de 29.174 iterações realizadas pelo Cplex©.

A partir da execução das duas abordagens torna-se possível avaliar o desempenho das implementações, assim como analisar os resultados obtidos. A Tabela 12 apresenta uma síntese dos resultados apresentados para solução do problema do Cenário C.

Tabela 12: Cenário C: Single-source x Arc-based

Informações e estrutura					
Modelo	CD's	Id CD's	Custo \$	Iterações	Tempo (s)
Single-source	3	4,6 e 10	\$12.895.827	150.714	588
Arc-based	4	1,2,4 e 10	\$11.197.914	29.174	859

Observa-se que o modelo “single-source” apresenta um custo para a solução viável superior ao proposto pela abordagem “arc-based”. Isso se deve principalmente pela restrição que condiciona que cada cliente (zona de consumo) seja abastecido de produtos somente por um centro de distribuição. Essa condição pode justificar o número de iterações, embora o tempo computacional seja menor em relação ao modelo

“arc-based”. O modelo “arc-based” propõe a utilização de 4 (quatro) centros de distribuição e o modelo “single-source” a abertura de 3 (três). Conseqüentemente, o conjunto de centros de distribuição proposto pelo modelo “arc-based” proporciona uma capacidade ociosa de aproximadamente 119.000 unidades, visto que a capacidade disponível através dos centros de distribuição soma 870.000 unidades. Em relação a isso, o modelo “single-source” permite uma capacidade ociosa de 39.000 unidades. As execuções de ambos os modelos apresentaram resultados satisfatórios de acordo com a proposta de cada uma das abordagens.

3.5.3 Análise de sensibilidade Cenário C

A partir dos resultados obtidos com a execução do programa torna-se necessário analisar o comportamento do modelo em relação a situações que permitam verificar sua funcionalidade. Dessa forma, analisar a sensibilidade dos modelos parece pertinente para determinar esses aspectos.

Existem diversas técnicas para executar a análise de sensibilidade em modelos de programação linear. Segundo Ragsdale (2009), quando se quer determinar o efeito de alguma modificação no modelo, a abordagem mais direta é modificar o modelo e resolvê-lo novamente. Sendo assim, se o pesquisador estiver interessado em estudar as conseqüências das mudanças simultâneas de diversos coeficientes no modelo, essa pode se uma forma eficiente de analisar a sensibilidade do modelo.

Goldbarg e Luna (2000) abordam a análise de sensibilidade como uma técnica utilizada para avaliar os impactos que o programa (formulação) sofre quando existem modificações nas condições de modelagem. Análise de sensibilidade é o estudo de um modelo de programação matemática submetido a mudanças em suas condições iniciais. As mudanças podem abranger: mudança no vetor de custos, mudança no vetor de termos independentes, mudança de coeficientes das variáveis, acréscimos de restrições e a acréscimo de novas variáveis.

Para realizar a análise de sensibilidade utilizamos o Cenário C introduzindo alterações no conjunto de centros de distribuição em relação ao problema original. A

alteração do conjunto de centros de distribuição disponíveis para a solução visa evidenciar efeitos de modificações e consequências no desempenho e nos resultados alcançados. Sendo assim, os modelos “single-source” e “arc-based” serão executados utilizando conjuntos de centros de distribuição diferentes da proposta original do Cenário C.

O Cenário C apresentava na seção anterior a disponibilidade de 10 (dez) centros de distribuição, e para a análise de sensibilidade do modelo “single-source” utilizaremos 4 (quatro) centros de distribuição que foram selecionados na solução ótima da abordagem “arc-based”, conforme Tabela 13.

Tabela 13: Conjunto de CD's: análise de sensibilidade “Single-source”

Centro de Distribuição	Cenário C - Original Capacidade	Cenário C - modificado Capacidade
CD 1	180.000	180.000
CD 2	270.000	270.000
CD 3	170.000	
CD 4	200.000	200.000
CD 5	150.000	
CD 6	370.000	
CD 7	140.000	
CD 8	120.000	
CD 9	175.000	
CD 10	220.000	220.000
Total	1.995.000	870.000

A alteração do conjunto de centros de distribuição permite expor a implementação computacional a um número menor de alternativas para encontrar a solução ótima, no entanto é disponibilizada capacidade de processamento suficiente para atender a demanda total de 750.982 produtos. As variáveis de custos de transportes, de produção e de operação são mantidas conforme as informações originais do Cenário C. Os resultados obtidos a partir da execução “single-source” são apresentados na Figura 14.

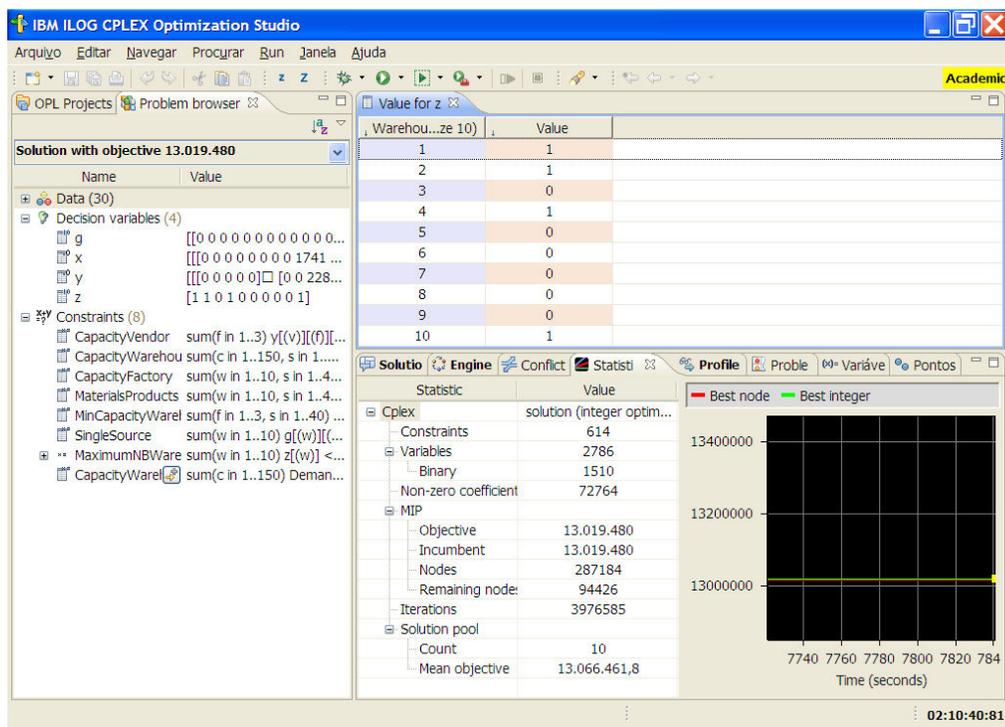


Figura 14: Cplex© Cenário C – Análise de sensibilidade “Single-source”

Os resultados apresentados a partir da análise de sensibilidade demonstram um tempo computacional extremamente elevado em relação ao resultado obtido na configuração original do Cenário C. O tempo computacional foi de aproximadamente 2 horas e 10 minutos, um crescimento de 1.223% em relação à instância original, conforme mostra a Tabela 14.

Tabela 14: Análise de sensibilidade “Single-source”

Informações e estrutura					
Single-source	CD's	Id CD's	Custo \$	Iterações	Tempo (s)
Cenário C - Original	3	4,6 e 10	\$12.895.827	150.714	588
Cenário C - Modificado	4	1,2,4 e 10	\$13.019.480	3.976.585	7.840
%	-	-	0,96%	2538%	1233%

Nesse sentido, o número de iterações realizadas pelo solver em busca da solução viável sofreu um crescimento de 2.538%. O custo da solução ótima para o Cenário C modificado cresceu 0,96% em relação ao resultado obtido na solução original. Sendo assim, percebe-se que a solução encontrada na instância original do Cenário C apresentou um melhor resultado em relação à minimização do custo assim como um desempenho computacional dentro de limites satisfatórios.

Seguindo a estrutura dessa seção, modificamos o conjunto de centros de distribuição do Cenário C selecionando os centros de distribuição obtidos na execução da abordagem “single-source” original. Consequentemente, o modelo “arc-based” é executado utilizando o conjunto de centros de distribuição apresentado na solução ótima do modelo “single-source”. As demais estruturas do problema representado pelo Cenário C são mantidas, ou seja, a modificação do problema fica restrita ao número de centros de distribuição disponíveis. Conforme a Tabela 15, o Cenário C original apresentava 10 (dez) centros de distribuição e a capacidade de processamento total de 1.995.000 produtos. Para utilizar somente os centros de distribuição escolhidos pela solução do modelo “single-source” são mantidos apenas 3 (três) centros de distribuição (4, 5 e 10). Consequentemente, a capacidade de processamento é limitada a 790.000 unidades. No entanto, a capacidade disponível é suficiente para atender a demanda do problema (750.982 unidades).

Tabela 15: Conjunto de CD's: análise de sensibilidade “Arc-based”

Centro de Distribuição	Cenário C - Original Capacidade	Cenário C - modificado Capacidade
CD 1	180.000	
CD 2	270.000	
CD 3	170.000	
CD 4	200.000	200.000
CD 5	150.000	
CD 6	370.000	370.000
CD 7	140.000	
CD 8	120.000	
CD 9	175.000	
CD 10	220.000	220.000
Total	1.995.000	790.000

Os resultados obtidos da implementação “arc-based” aplicada ao Cenário C modificado são apresentados na Figura 15. Percebe-se que a solução ótima é apresentada em tempo computacional muito pequeno, consequentemente o número de iterações também é reduzido.

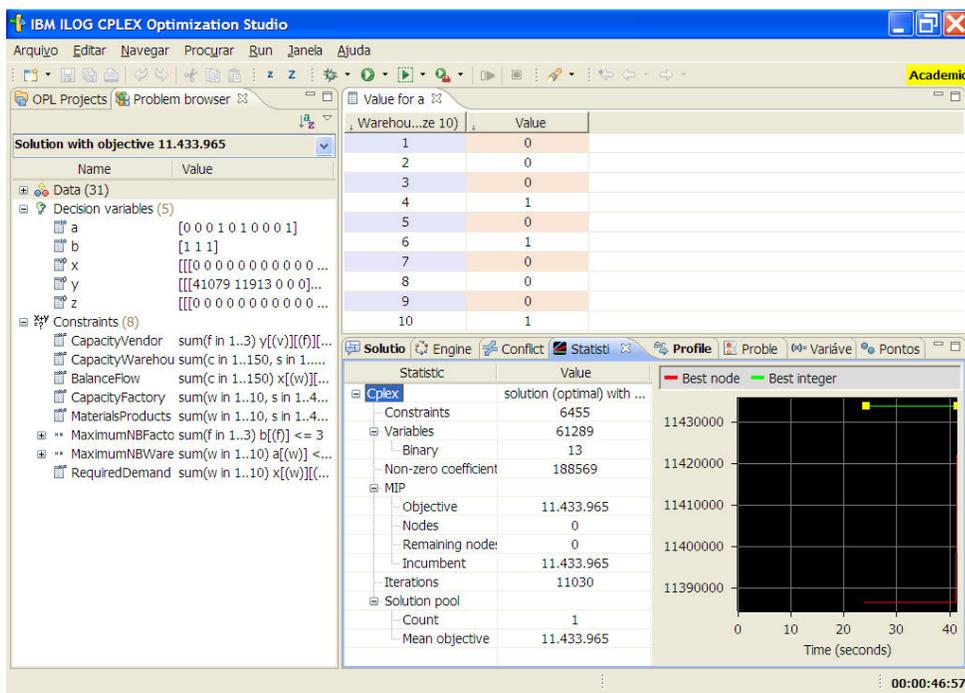


Figura 15: Cplex© Cenário C – Análise de sensibilidade “Arc-based”

A solução ótima apresenta o custo de \$11.433.965 utilizando os 3 (três) centros de distribuição disponíveis. No entanto o custo apresentado é superior ao custo trazido pela execução do modelo “arc-based” na configuração original do Cenário C, a Tabela 16 demonstra as variações entre as instâncias executadas.

Tabela 16: Análise de sensibilidade “Arc-based”

Informações e estrutura					
Arc-based	CD's	Id CD's	Custo \$	Iterações	Tempo (s)
Cenário C - Original	4	1,2,4 e 10	\$11.197.914	29.174	859
Cenário C - Modificado	3	4,6 e 10	\$11.433.965	11.030	46
%	-	-	2,11%	-62%	-95%

Através da análise de sensibilidade é possível identificar que o modelo “arc-based” responde melhor a modificações na estrutura do problema, assim como desenvolve a solução em tempos computacionais mais satisfatórios.

As alterações realizadas no Cenário C possibilitaram evidenciar os efeitos das modificações na performance dos modelos. Analisando os resultados obtidos é possível identificar as consequências e os principais componentes que influenciam a dinâmica de resolução dos programas computacionais. Sendo assim, as análises desenvolvidas possibilitaram perceber a sensibilidade dos modelos perante modificações de

parâmetros e variáveis através da apresentação de resultados distintos para cada instância executada.

As experimentações realizadas através dos modelos implementados apresentaram resultados satisfatórios em relação à funcionalidade em circunstâncias próximas das dimensões reais. Para facilitar o entendimento dos principais resultados obtidos nos experimentos realizados nessa seção, foi construída uma síntese, que está apresentada no Quadro 1.

Cenário	Modelo	Demanda	Zonas de Consumo	Produtos	CD's abertos	Custo \$	Tempo (segundos)	Iterações
Cenário A	Single-source	10.000	10	10	1 e 2	\$230.000	6,45	17
	Path-based	10.000	10	10	2 e 3	\$230.000	9,05	190
	Arc-based	10.000	10	10	2 e 3	\$230.000	6,44	190
Cenário B	Single-source	300.000	30	10	1, 2, 4, 5 e 6	\$4.560.000	8,27	295
	Path-based	300.000	30	10	2, 3, 4, 6 e 10	\$4.560.000	17,59	1.111
	Arc-based	300.000	30	10	1, 2, 3, 5, 7, 8, 9 e 10	\$4.560.000	8,14	1.823
Cenário C	Single-source	750.982	150	40	4, 6 e 10	\$12.895.827	588,47	150.714
	Arc-based	750.982	150	40	1, 2, 4 e 10	\$11.197.914	859,31	29.174
Cenário C - Análise de Sensibilidade	Single-source	750.982	150	40	1, 2, 4 e 10	\$13.019.480	7.840,49	3.976.585
	Arc-based	750.982	150	40	4, 6 e 10	\$11.433.965	46,34	11.030

Quadro 1: Síntese dos resultados experimentais

O Quadro 1 contém os resultados das principais variáveis observadas nas apresentações das soluções através das abordagens “single-source”, “path-based” e “arc-based”. Nessa síntese observa-se que as implementações foram expostas gradativamente a problemas de maior complexidade em relação à quantidade de variáveis e restrições. No entanto, para problemas maiores, envolvendo mais de 100 produtos e 150 zonas de consumo, as implementações não foram resolvidas em tempo razoável. Dessa forma, limitações em termos de tamanho das instâncias devem ser observadas ao executar os modelos.

Nesse capítulo foram apresentadas as etapas do método de pesquisa operacional que possibilitou o desenvolvimento das duas abordagens de solução para o problema proposto nessa dissertação. No capítulo seguinte demonstramos a aplicabilidade das

abordagens de solução “single-source” e “arc-based” através da aplicação dos modelos no estudo de caso da indústria que é tema dessa pesquisa.

4 APLICAÇÃO DOS MODELOS NO ESTUDO DE CASO

Nessa etapa do trabalho apresentamos a aplicação dos modelos matemáticos desenvolvidos a partir da Pesquisa Operacional no estudo de caso abordando uma indústria de borracha produtora de commodities. Para manter a integridade e sigilo das informações dessa indústria todos dados obtidos e apresentados nessa pesquisa estão descaracterizados para manter a confidencialidade dos dados.

A aplicação dos modelos no estudo de caso foi desenvolvida em 3 (três) etapas distintas: coleta de dados, aplicação dos modelos matemáticos e análise dos resultados. Essa aplicação foi realizada para o projeto inicial da cadeia de suprimentos da empresa, pois a mesma não possui as informações detalhadas sobre o consumo dos produtos por modelos (160 tipos) e por regiões. A seguir apresentamos cada uma das etapas de forma detalhada.

4.1 COLETA E ESTRUTURAÇÃO DE DADOS

Na fase de coleta de dados foram necessárias definições em relação aos tipos de produtos que envolvem os mercados pretendidos, assim como definir qual a demanda para cada um dos produtos. O portfólio da empresa apresenta cerca de 160 produtos diferentes. A ausência de informações impede uma análise mais detalhada em relação às demandas de todos os produtos da empresa. Sendo assim, os produtos são divididos em 3 (três) categorias (grupos de produtos) conforme a utilidade e tamanho:

- Commodity 1;
- Commodity 2;
- Commodity 3.

Para executar os modelos é necessário que se conheçam os “clientes” que serão atendidos, sendo assim o mercado nacional foi dividido em duas categorias:

- Mercado Original: composto pelas demandas de empresas fabricantes de bens que utilizam essas *commodities* para montagem de seus produtos;
- Mercado Reposição: composto de lojas do varejo que comercializam um dos tipos de *commodities* (substituição de produtos inutilizáveis).

Dessa forma, a demanda anual dos produtos (*commodities*) é fundamentalmente definida a partir das informações de produção de bens que necessitam das *commodities*, de dados de vendas das *commodities* em lojas do varejo e atacado, e do “market share” pretendido dentro de cada um desses mercados.

As demandas do Mercado Original consideraram as informações de produção das fábricas de bens que utilizam as *commodities* como componentes do seu produto final. Nessa etapa são considerados os principais “players mundiais” instalados no Brasil.

Para a demanda do Mercado Reposição foram considerados os números de bens existentes em cada município ou região. Bens são tratados nessa dissertação como uma mercadoria composta por um tipo de *commodity*. Além disso, foram coletadas informações através de pesquisas realizadas nos *sites* (internet) das associações nacionais responsáveis pelas vendas e regulação das *commodities* tratadas no tema de pesquisa.

A definição dos polos de demanda foi estabelecida através da criação de um círculo em torno de cidades com alta demanda para incorporar a demanda de cidades vizinhas. Por exemplo, a cidade de Ribeirão Preto engloba as cidades de Taquaritinga, Matão, Pirassununga, Mococa, Porto Ferreira, Monte Alto, São José do Rio Pardo, Jaboticabal, Itápoli, Batatais e Sertãozinho. Dessa forma, a demanda da cidade de Ribeirão Preto é determinada pela soma de bens de cada uma das cidades.

Baseados nos dados levantados, os círculos possuem as seguintes dimensões de diâmetro:

- Commodity 1: definido pelo IBGE a partir da divisão territorial realizada pelo CENSO 2006;
- Commodity 2: 100 km;
- Commodity 3: 100 km.

A partir dessas definições foram identificados cerca de 250 polos para a Commodity 1, 100 polos para a Commodity 2 e 100 polos para a Commodity 3. Para

execução dos modelos foram considerados os mercados de reposição e original para os três grupos de produtos e a possibilidade de diferentes *market shares* em cada grupo e em cada mercado. Como forma de priorizar os polos mais viáveis economicamente, foi estabelecida uma “linha de corte” em relação às demandas da Commodity 1. Sendo assim, foi definido que seriam atendidas somente as cidades com demanda maior superior a 500 unidades ao ano. Consequentemente, o número de polos referente à Commodity 1 foi reduzido para 181 polos. Dessa forma, para definir o total de zonas de consumo para execução dos modelos foi necessário o cruzamento dos polos, pois a maioria dos polos tem demandas para os 3 (três) tipos de *commodities*. Conforme apresenta a Tabela 17, o número de clientes (zonas de consumo) é de 261 polos. Sendo assim, entre os clientes do Mercado Reposição existem 229 polos que têm demanda para pelo menos um tipo de *commodity*.

Tabela 17: Áreas de demandas

Polos	Commodity 1	Commodity 2	Commodity 3	Pólos Comuns
Mercado Reposição (clientes)	181	107	105	229
Mercado Original (fábricas)	8	16	8	32
Total	189	123	113	261

Para o Mercado Original são definidas 32 fábricas produtoras de bens que necessitam ser abastecidas por algum tipo de *commodity*. Através dessas informações o número de zonas de consumo (clientes) definido para o execução dos modelos é de 261 áreas de demanda.

Após a definição das áreas de demandas foram selecionadas 5 cidades potenciais para instalação dos centros de distribuição para o projeto logístico da cadeia de suprimento, sendo que consideramos a utilização de 1 (uma) fábrica para abastecer todos os centros de distribuição. A empresa possui mais de uma instalação fabril, localizada fora do Brasil. Porém, essa planta foi desconsiderada a pedido dos executivos da empresa, pois eles pretendem tornar essas 2 (duas) operações independentes. A partir da definição da localização dos centros de distribuição é necessário considerar a distância de cada um desses centros de distribuição até cada uma das áreas de demanda para definir os custos de transportes. A coleta de dados referentes às distâncias foi realizada a partir do serviço de roteirização disponível na internet pelo Google©

chamado de Google© Maps, Figura 16. Através dessa ferramenta foi possível pesquisar as menores distâncias de aproximadamente 1.300 rotas diferentes.

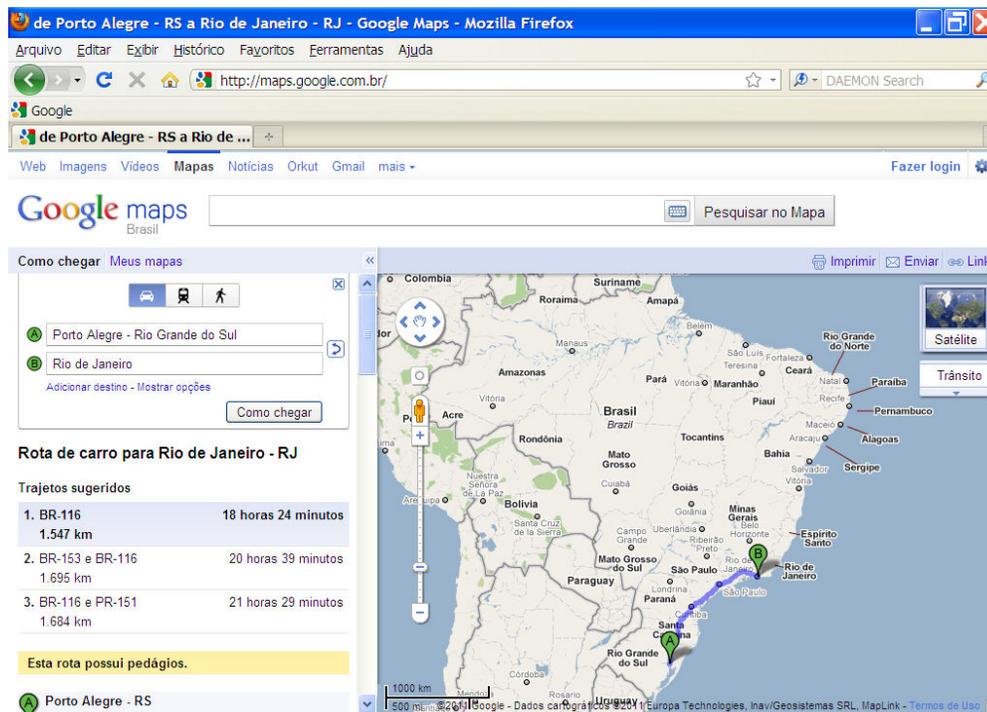


Figura 16: Google Maps© – Coleta de distâncias

O custo de transporte entre os centros de distribuição e as áreas de demanda considera a utilização de um único tipo de modal: rodoviário. Dessa forma, consideramos que uma carreta cheia transporta em média, de forma exclusiva:

- 80 unidades da Commodity 1;
- 1.500 unidade da Commodity 2;
- 240 unidades Commodity 3.

Dessa forma o custo unitário médio de cada categoria é definido através de forma proporcional onde 1(uma) Commodity 1 corresponde a 20 Commodities 2 e a cerca de 5 Commodities 3. A partir dessa proporcionalidade definimos o custo médio de transporte por quilômetro para cada uma das *commodities*, conforme Tabela 18 a seguir.

Tabela 18: Custo de unitário de transporte

Custo Médio de Transporte	Commodity 1	Commodity 2	Commodity 3
Custo \$ / Km	0,040	0,002	0,008

A partir da definição do número de áreas de consumo, das demandas para cada uma dessas áreas e da definição dos custos de transporte através do custo unitário para cada *commodity* partimos para a aplicação dos modelos no estudo de caso.

4.2 APLICAÇÃO NO ESTUDO DE CASO

Na etapa anterior a coleta e estruturação dos dados possibilitaram identificar as demandas de mercado para os 3 (três) grupos de commodities. No entanto, a empresa tratada nessa pesquisa pretende atender parte dessas demandas, ou seja, para cada tipo de *commodity* deve ser definida a fatia de mercado (*market share*) que a empresa deseja atender. Dessa forma, a partir das informações coletadas são apresentados cenários com diferentes *market shares* de acordo com as estratégias que podem ser adotadas pela empresa.

Sendo assim, o cenário do projeto logístico para aplicação do estudo de caso é composto pelos seguintes elementos:

- Fornecedores;
- Matérias-primas;
- 1 Fábrica;
- Centros de Distribuição;
- 3 Grupos de Produtos;
- 261 Áreas de demandas.

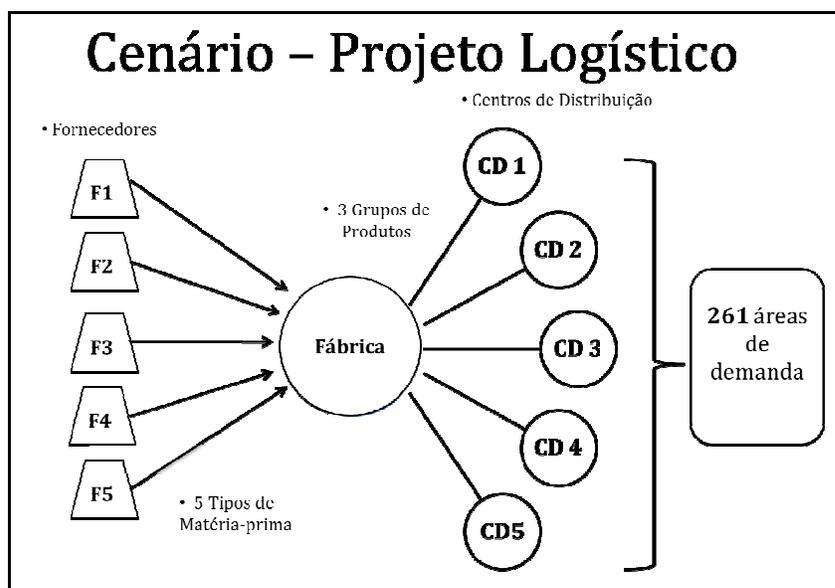
Os 3 (três) grupos de produtos agregam dados referentes a 160 diferentes tipos de produtos. Infelizmente, a empresa não possui, nesta fase do projeto, dados que possam ser aplicados no estudo.

O mercado, dividido em Mercado Original e Mercado Reposição, apresentado na Tabela 19 demonstra os 3 (três) grupos de *commodities* que servem de base para a definição dos *market shares*. Conseqüentemente, as demandas de cada área de consumo serão dadas a partir da definição dos *market shares* de cada *commodity*.

Tabela 19: Demanda do mercado de commodities

Mercado	Commodity 1	Commodity 2	Commodity 3	Demanda
Reposição	556.951	36.180.162	6.781.554	43.518.667
Original	658.996	6.366.042	3.405.523	10.430.561
Total	1.215.947	42.546.204	10.187.077	53.949.228

Para definir o projeto de rede da cadeia de suprimentos para a indústria tema de pesquisa desse trabalho as informações de capacidade e custos fixos para as instalações foram determinadas de acordo com as informações apresentadas pela empresa. Portanto, para ilustrar a funcionalidade dos modelos nesse trabalho acadêmico são utilizados valores que permitem aplicar os modelos mantendo o sigilo das informações prestadas pela empresa. A estrutura do cenário logístico é ilustrada pela Figura 17 a seguir.

**Figura 17: Projeto logístico da cadeia de suprimentos**

Conforme a Figura 17 demonstra, o Cenário do Projeto Logístico é composto por 5 (cinco) fornecedores de 5 (cinco) tipos diferentes de matérias-primas. Nesse sentido, para a aplicação dos modelos “single-source” e “arc-based” o fornecimento de matéria-prima é determinado em quantidade suficiente para atender a única fábrica disponível no cenário. Por sua vez, a capacidade de produção da fábrica representa um número suficiente para atender as demandas de acordo com o *market share* definido pela empresa.

As capacidades de processamento dos centros de distribuição são apresentadas na Tabela 20, assim como os respectivos custos fixos anuais de operação.

Tabela 20: Projeto logístico: capacidades e custos

Centro de Distribuição	Processamento por CD	Operação
	Capacidade	Custo \$
CD 1	3.500.000	2.000.000
CD 2	2.500.000	2.000.000
CD 3	3.000.000	1.800.000
CD 4	3.000.000	1.500.000
CD 5	3.500.000	1.800.000

O custo unitário de produção da fábrica é representado na Tabela 21. A taxa de utilização de matéria-prima para cada produto foi estabelecida de forma uniforme para todos os produtos, porém a taxa de utilização da capacidade da produção por unidade de produto é proporcional ao custo unitário de produção.

Tabela 21: Projeto logístico: custo unitário de produção

Fábrica	Commodity 1	Commodity 2	Commodity 3
Fábrica 1	\$10	\$2	\$4

A partir da definição das variáveis que compõem o cenário do projeto logístico os modelos são aplicados utilizando as definições de *market share* de cada *commodity*. Na seção seguinte apresentamos 3 (três) cenários com diferentes *market shares* que possibilitam visualizar as configurações viáveis para a rede da cadeia de suprimentos.

4.2.1 Cenário do Projeto Logístico - Market-share 1

O cenário proposto nessa subseção é chamado de Market-share 1 e é definido conforme a Tabela 22. Podemos classificar esse cenário como conservador em relação à estratégia de conquista de mercado. Devido à característica do mercado do Rio Grande do Sul em relação à grande demanda da Commodity 1 no mercado original (fornecimento para fábricas) há um interesse específico nesse mercado. Dessa forma, o *market share* do mercado original para o Rio Grande do Sul é definido separadamente.

Tabela 22: Market-share 1

Mercado	Commodity 1	Commodity 2	Commodity 3
Reposição	10%	10%	10%
Original	10%	10%	10%
Original RS	10%	-	-

As demandas para as áreas de consumo dos 3 (três) grupos de *commodities* são apresentadas na Tabela 23 e a partir dessas informações executamos o modelo “single-source”.

Tabela 23: Demanda Market-share 1

Mercado	Commodity 1	Commodity 2	Commodity 3	Demanda
Reposição	55.774	3.618.068	675.247	4.349.089
Original	65.626	636.609	340.557	1.042.792
Total	121.400	4.254.677	1.015.804	5.391.881

A primeira execução do modelo “single-source” a partir do cenário Market-share 1 disponibiliza a abertura dos 5 (cinco) centros de distribuição disponíveis. A Figura 18 apresenta a tela de resultados do Cplex© Studio. A solução ótima apresenta o custo total de \$56.882.604, sendo que todas as demandas são atendidas. O tempo computacional foi de 32,32 segundos² e necessitou de 4.868 iterações para encontrar a solução viável.

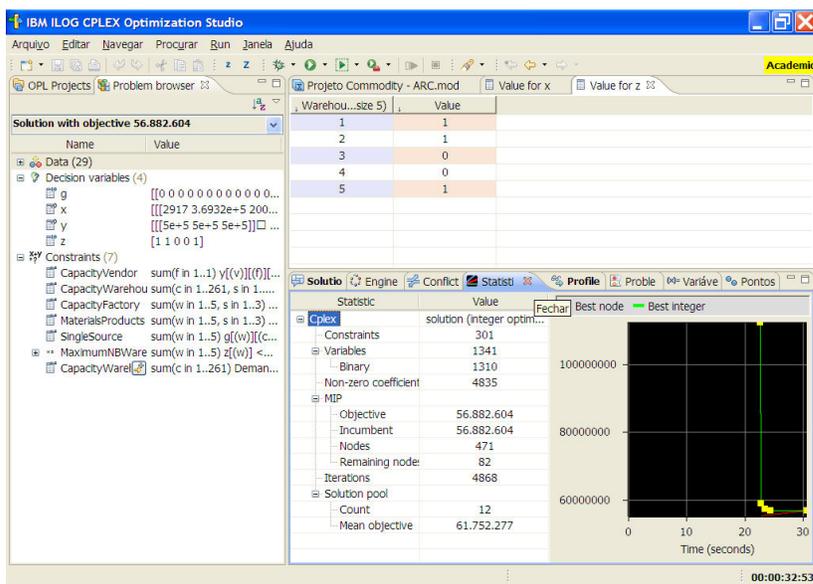


Figura 18: Resultados Cplex© Market-share 1 - “Single-source” 3 CD’s

² Os tempos computacionais do Cplex© são fornecidos no formato horas, minutos, segundos e centésimos (00:00:32:53). Nesse trabalho as informações de tempo computacional são apresentadas devidamente convertidas em segundos (32,32 segundos).

A partir dos resultados apresentados pelo modelo “single-source” é ilustrada, na Figura 19, a estrutura do projeto logístico com a configuração proposta pelo modelo.

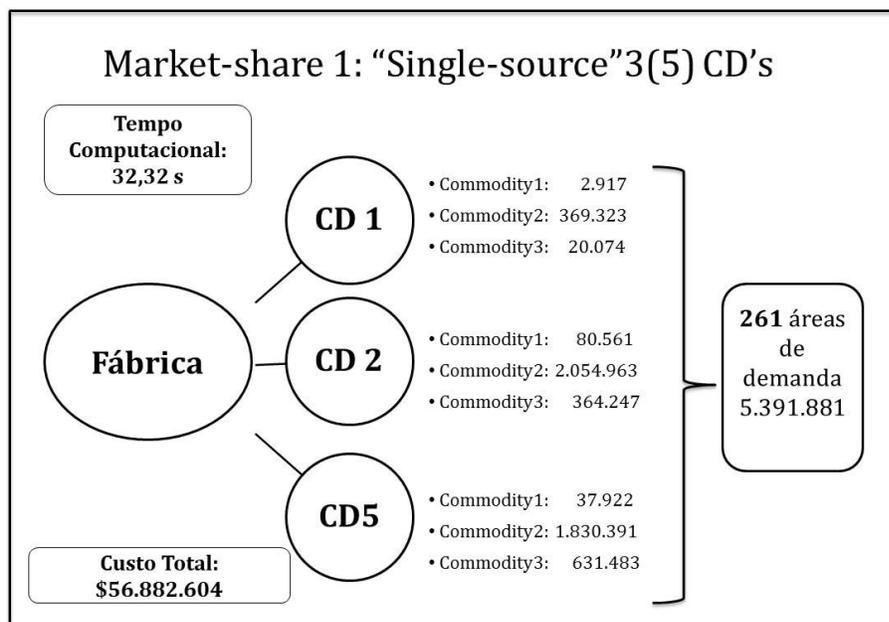


Figura 19: Projeto Logístico Market-share 1 - “Single-source” 3 CD’s

A Figura 19 possibilita identificar a quantidade de produtos processada em cada centro de distribuição, a fim de atender as 261 áreas de demandas. Nessa execução “single-source” 3 (três) centros de distribuição são abertos para processar 5.391.881 produtos.

Para identificar as possibilidades através da abordagem “single-source” rodamos o modelo no cenário Market-share 1 restringindo o número de centros de distribuição que podem ser abertos. O número máximo de centros de distribuição para essa instância foi limitado em 2 (dois). Os resultados são mostrados na Figura 20 apresentam o custo de operação de \$66.020.663, o qual é superior em relação à instância anterior que utilizava 3 (três) centros de distribuição. Foram realizadas 767 iterações no tempo computacional de 10,32 segundos.

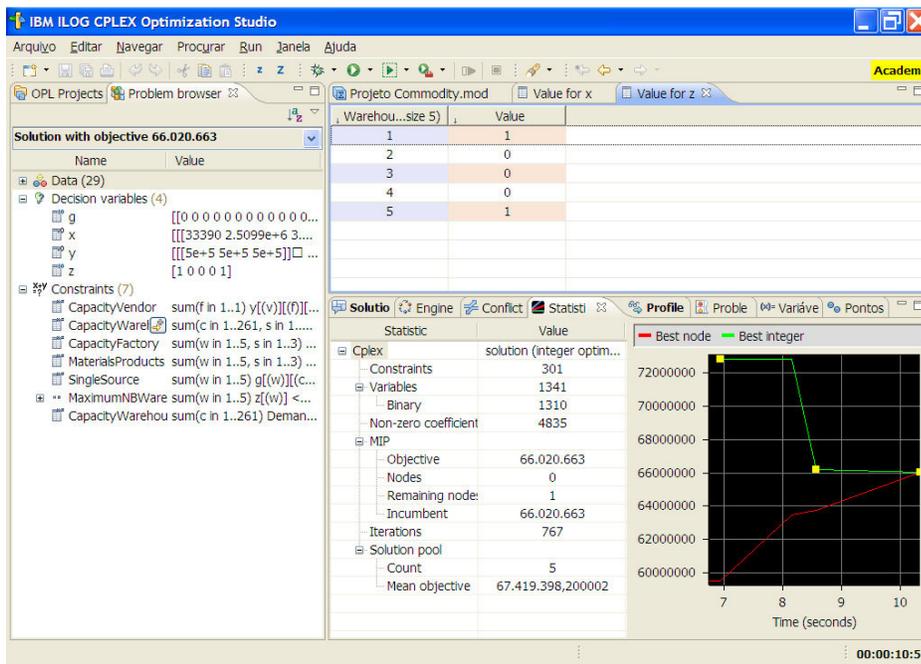


Figura 20: Resultados Cplex® Market-share 1 - “Single-source” 2 CD’s

A estrutura proposta pela abordagem “single-source” é representada pela Figura 21, na qual apresenta também a quantidade de produtos processados a partir de cada centro de distribuição.

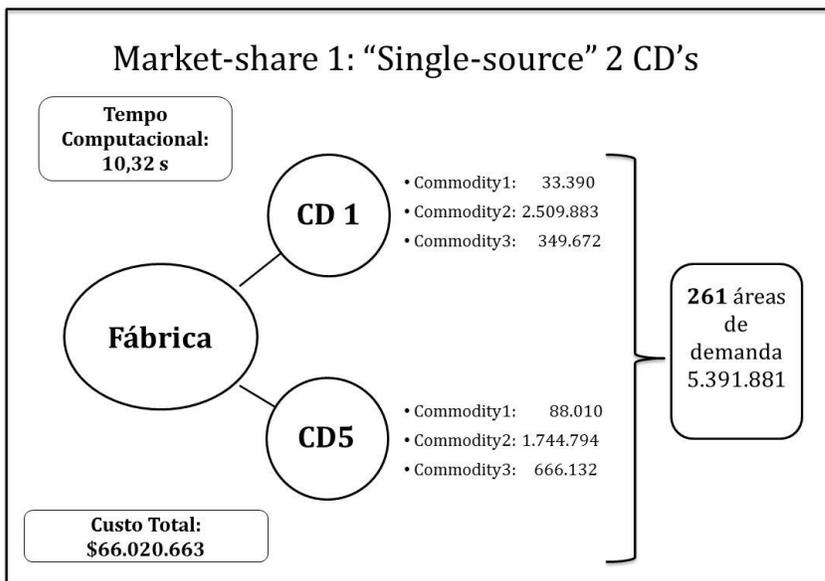


Figura 21: Projeto Logístico Market-share 1 - “Single-source” 2 CD’s

Todas as demandas continuam sendo satisfeitas, assim como a condição de abastecimento de uma área de demanda por somente um centro de distribuição (restrição single-source). A restrição de abertura da quantidade de centros de

distribuição para compor a rede da cadeia de suprimentos exige que os modelos apresentem resultados distintos. Dessa forma, a Tabela 24 traz a comparação entre as instâncias executadas do modelo “single-source” a partir das informações do cenário Market-share 1.

Tabela 24: Market-share 1: modelo “Single-source”

Modelo	Informações e estrutura		
	CD's abertos	Custo \$	Tempo (s)
Single-source até 5 CD's	3	\$56.882.604	32,32
Single-source até 2 CD's	2	\$66.020.663	10,32

Analisando os resultados, observa-se que ao limitar a abertura de centros de distribuição para no máximo 2 (dois), o custo total cresce 16%. No entanto, o tempo computacional para resolução diminuiu 20 segundos. Esse tipo de análise proporciona aos gestores identificar as melhores alternativas para a configuração da cadeia de suprimentos.

Seguindo a proposta dessa subseção, submetemos o cenário Market-share 1 à abordagem “arc-based”. Os parâmetros do cenário original são mantidos, ou seja, nessa primeira instância não há limitação de abertura de centros de distribuição. As demais variáveis e restrições do modelo também não sofrem nenhum tipo de alteração. A Figura 22 apresenta os resultados através da tela do Cplex® Studio.

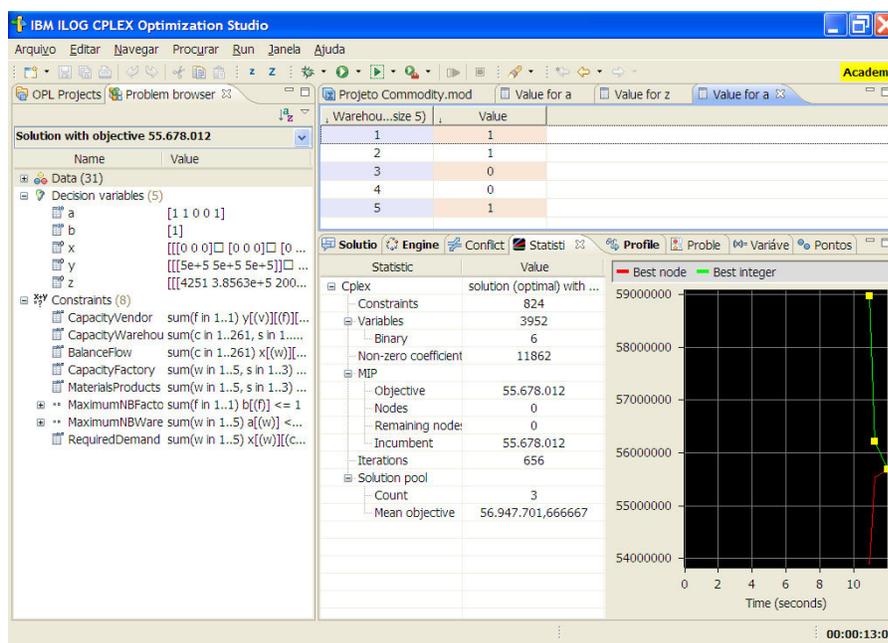


Figura 22: Resultados Cplex® Market-share 1 – “Arc-based” 3 CD's

A abordagem “arc-based” apresenta o custo operacional total de \$55.678.012, sendo que é mantida a abertura de 3 (três) centros de distribuição (mesma quantidade da instância gerada pelo modelo “single-source”). Além disso, o modelo “arc-based” propõe a abertura dos mesmos centros de distribuição apresentados na solução “single-source”, porém o custo operacional é menor no modelo “arc-based”. O tempo computacional para desenvolver a solução ótima é de 13,04 segundos e o número de iterações de 656.

De acordo com os resultados apresentados a partir da execução do modelo “arc-based” a Figura 23 representa a estrutura logística da solução encontrada. Nessa figura é possível visualizar os fluxos dos grupos de produtos (Commodity 1, 2 e 3) pelos centros de distribuição. Dessa forma, todas as zonas de consumo são atendidas integralmente, sendo assim todas as restrições do modelo são respeitadas.

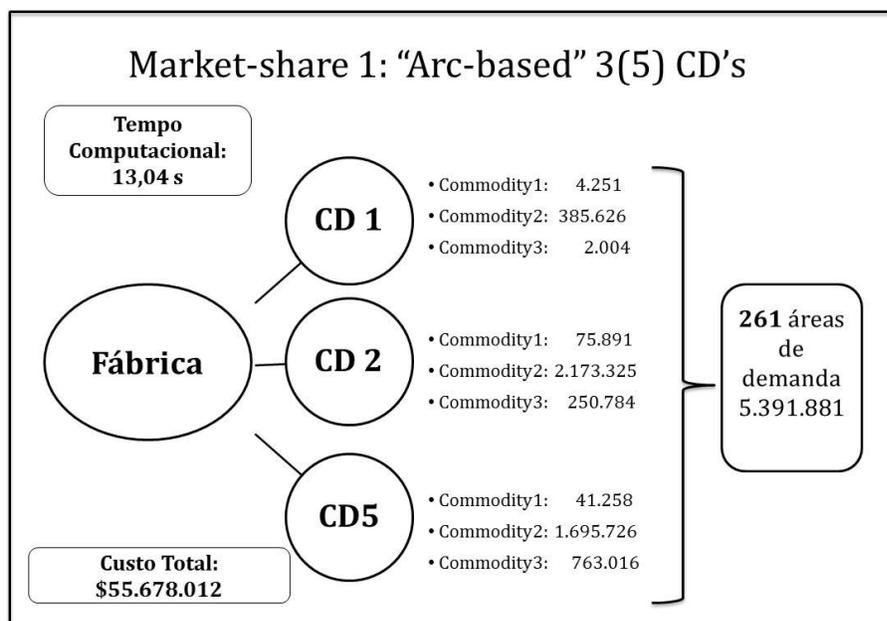


Figura 23: Projeto Logístico Market-share 1 – “Arc-based” 3 CD’s

Do mesmo modo que foi realizado no modelo “single-source”, o modelo “arc-based” é aplicado limitando-se a quantidade de centros de distribuição que podem ser utilizados pelo modelo. Para essa instância, o limite de abertura é de 2 (dois) centros de distribuição. Os resultados apresentados na Figura 24 mostram a solução ótima propondo a abertura dos centros de distribuição 1 e 5.

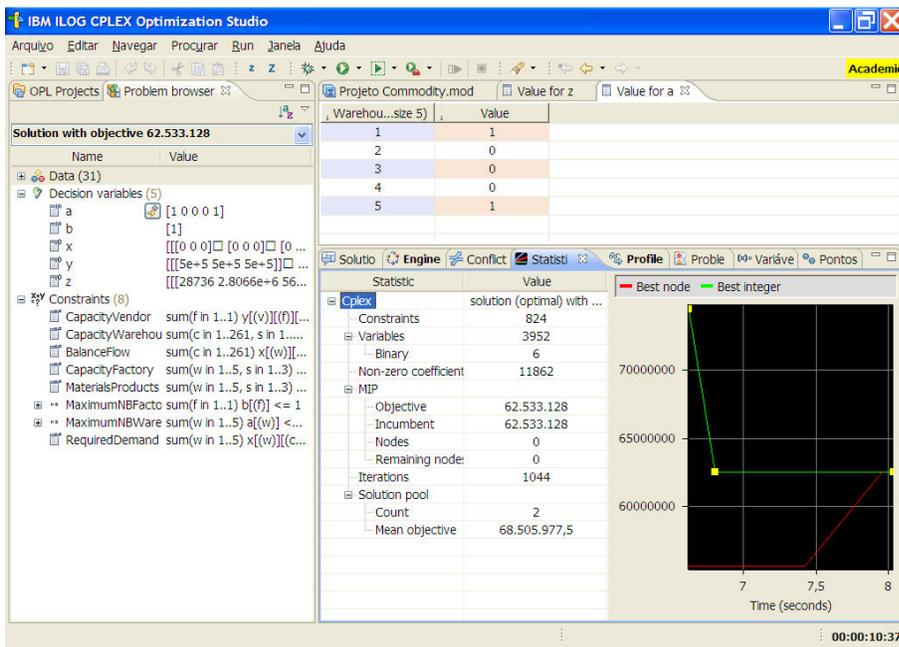


Figura 24: Resultados Cplex® Market-share 1 – “Arc-based” 2 CD’s

Ao utilizar 2 (dois) centros de distribuição o modelo “arc-based” eleva o custo operacional para \$62.533.128. O tempo computacional para execução do modelo é de 10,22 segundos e número de iterações realizadas pelo solver para encontrar a solução do problema foram 1.044. A Figura 25 apresenta a estrutura de distribuição através de (2) centros de distribuição e as respectivas quantidades de produtos que são processadas para em cada um deles.

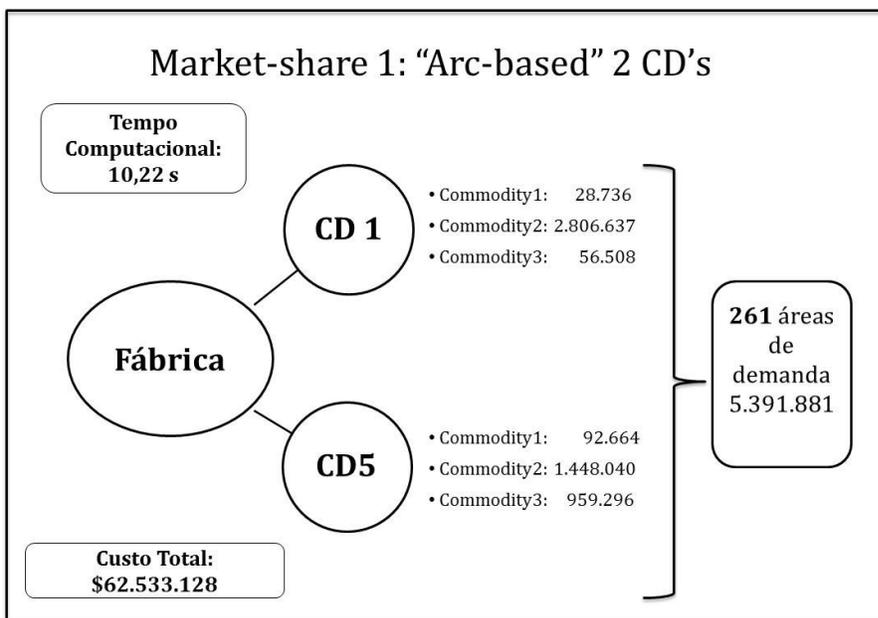


Figura 25: Projeto Logístico Market-share 1 – “Arc-based” 2 CD’s

Ao limitar a quantidade de centros de distribuição para resolução do problema encontramos uma configuração diferente em relação à instância executada anteriormente sem essa restrição. Consequentemente, os resultados de ambas as execuções da abordagem “arc-based” podem ser comparados e analisados, conforme as informações da Tabela 25.

Tabela 25: Market-share 1: modelo “Arc-based”

Modelo	Informações e estrutura		
	CD's abertos	Custo \$	Tempo (s)
Arc-based até 5 CD's	3	\$55.678.012	13,04
Arc-based até 2 CD's	2	\$62.553.128	10,22

A partir das informações da Tabela 25 é possível identificar que ao restringir o uso de apenas 2 (dois) centros de distribuição para configuração do projeto de rede da cadeia de suprimentos o custo operacional aumenta 12%. No entanto, o tempo computacional sofre uma redução de aproximadamente 3 (três) segundos.

Os resultados apresentados para solução do problema proposto no cenário Market-share 1 são comparados em relação à performance das abordagens “single-source” e “arc-based” na Tabela 26. Os resultados são analisados de acordo com as mesmas restrições para cada modelo.

Tabela 26: Market-share 1: análise dos resultados com limite de 5 CD's

Modelo	Informações e estrutura			
	CD's abertos	Custo \$	Tempo (s)	Var. % Custo
Single-source até 5 CD's	3	\$56.882.604	32,32	
Arc-based até 5 CD's	3	\$55.678.012	13,04	-2,12%

Na configuração original da execução, que possibilitava aos modelos utilizarem os 5 (cinco) centros de distribuição disponíveis para resolução do problema, as duas abordagens sugerem a abertura dos mesmos centros de distribuição. Porém, o custo total da operação é 2,12% menor na solução encontrada pela modelagem “arc-based”. A performance computacional do modelo “arc-based” também é mais satisfatória, pois alcança a solução cerca de 20 segundos mais rápido que a implementação “single-source”.

Ao limitar a quantidade de centros de distribuição os modelos são novamente comparados em relação aos resultados, conforme Tabela 27.

Tabela 27: Market-share 1: análise dos resultados com limite de 2 CD's

Modelo	Informações e estrutura			
	CD's abertos	Custo \$	Tempo (s)	Var. % Custo
Single-source até 2CD's	2	\$66.020.663	10,32	-5,25%
Arc-based até 2CD's	2	\$62.553.128	10,22	

Através da análise dos resultados da Tabela 27 percebe-se que o modelo “arc-based” mantém a melhor proposta em relação a custo total da operação. Nesse sentido, o custo é 5,25% menor em relação à solução ótima apresentada pelo modelo “single-source”. Em relação ao tempo de computacional as instâncias apresentaram diferenças consideradas desprezíveis.

4.2.2 Cenário do Projeto Logístico – Market-share 2

Nessa subseção tratamos o novo cenário denominado de Market-share 2. Nesse cenário os percentuais de participação no mercado nacional são alterados em relação aos percentuais utilizados na estruturação do cenário Market-share1. Conforme é apresentado na Tabela 28, os percentuais de participação da Commodity 1 nos mercados reposição e original são elevados para 20%. Para o mercado original do Rio Grande do Sul o percentual é ainda mais arrojado e alcança 25%.

Tabela 28: Market-share 2

Mercado	Commodity 1	Commodity 2	Commodity 3
Reposição	20%	10%	15%
Original	20%	10%	15%
Original RS	25%	-	-

O cenário Market-share 2 enfatiza o mercado da Commodity 1 por se tratar de um nicho de mercado bastante rentável no qual a indústria tratada nessa pesquisa demonstra interesse em atender. Nesse sentido, é também ampliada a participação de mercado da Commodity 3. A Tabela 29 ilustra em números as demandas para cada um desses mercados.

Tabela 29: Demanda Market-share 2

Mercado	Commodity 1	Commodity 2	Commodity 3	Demanda
Reposição	111.460	3.618.068	1.012.853	4.742.381
Original	147.781	636.609	510.833	1.295.223
Total	259.241	4.254.677	1.523.686	6.037.604

Definido o *market share* de cada mercado e, conseqüentemente, as demandas partimos para execução do modelo “single-source”. Conforme a Figura 26 os resultados apresentado pelo modelo “single-source” o custo total de operação para atender as demandas do mercado definido pelo cenário Market-share 2 é de \$68.747.638. O tempo computacional foi de 13,05 segundos e necessitou de 1.016 iterações para encontrar a solução viável.

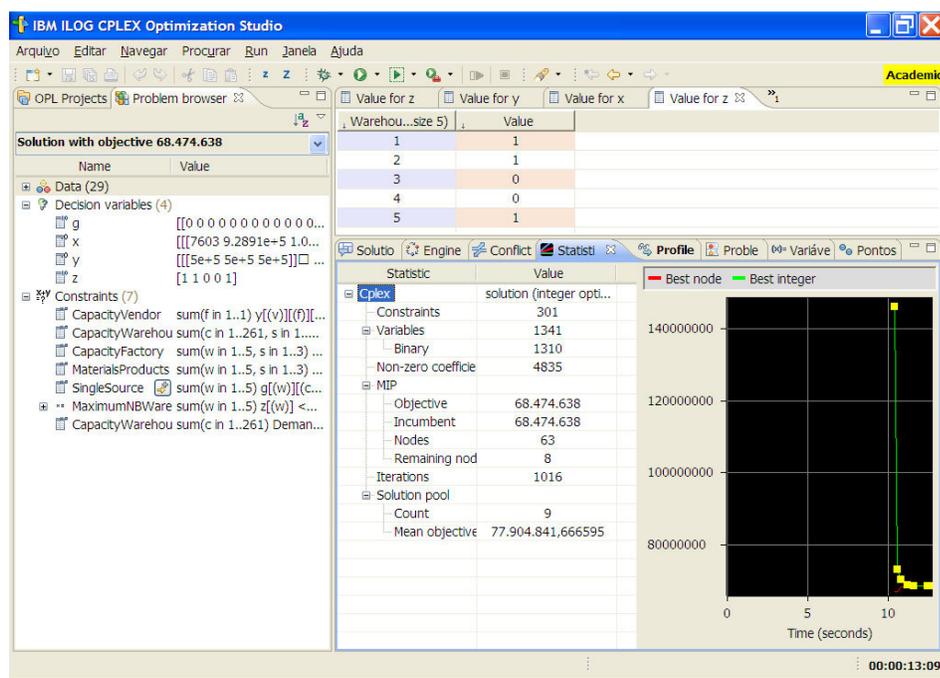


Figura 26: Resultados Cplex© Market-share 2 - “Single-source” 3 CD’s

A estrutura demonstrada pela Figura 27 representa a solução encontrada pela execução “single-source”.

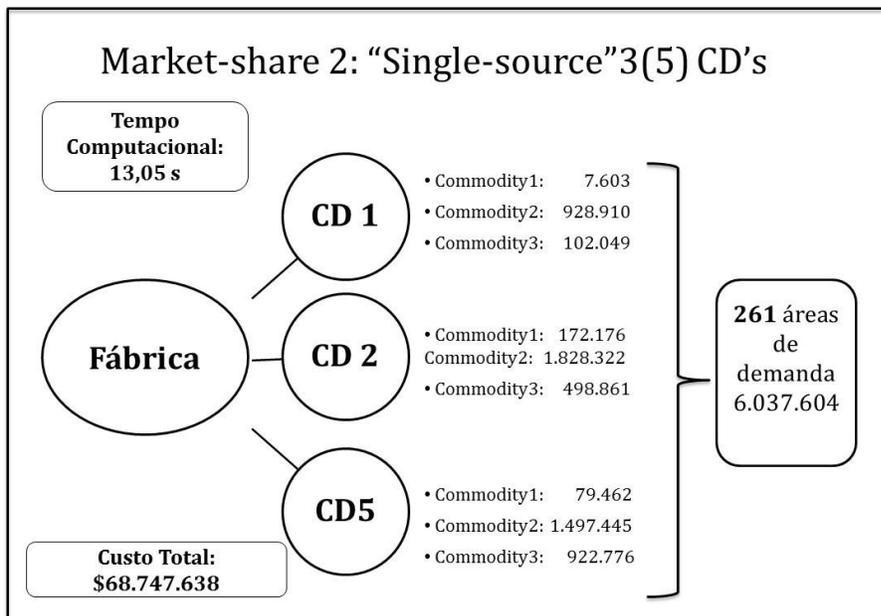


Figura 27: Projeto Logístico Market-share 2 - "Single-source" 3 CD's

A solução do modelo sugere a abertura dos centros de distribuição 1, 2 e 5. Sendo que é possível identificar a quantidade de produtos processados em cada centro de distribuição. Os resultados atendem a demanda das 261 áreas de consumo e respeitam as restrições impostas pela formulação do modelo.

Para analisar o comportamento modelo "single-source" realizamos a execução dessa abordagem limitando o número de centros de distribuição para 2 (dois). Da mesma forma que realizamos anteriormente, o modelo é forçado a atender as demandas com um número menor de possibilidades para configurar a rede de distribuição. A tela do Cplex© Studio apresentada na Figura 28 traz os resultados a partir dessa nova restrição. É possível identificar que o tempo computacional mantém-se satisfatório (8,30 segundos).

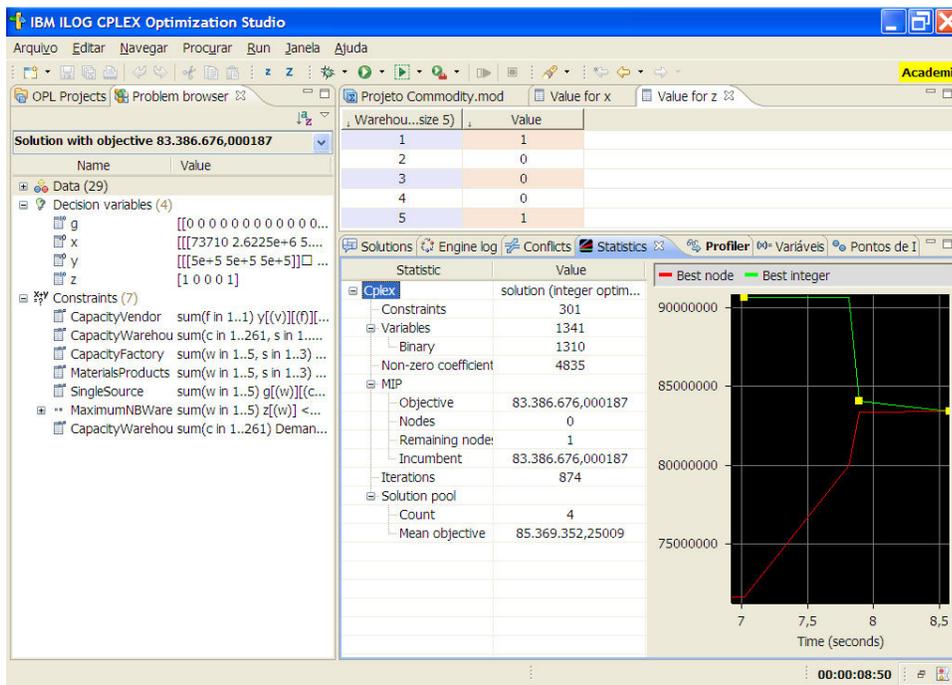


Figura 28: Resultados Cplex© Market-share 2 - “Single-source” 2 CD’s

O custo total da operação é de \$83.386.676, sendo que a cadeia de distribuição é estruturada utilizando os centros de distribuição 1 e 5. A Figura 29 demonstra as quantidades de cada produto que os centros de distribuição são responsáveis de processar e distribuir. Nessa instância a restrição de exclusividade no abastecimento das áreas de demanda é respeitada, assim como todas as demandas são atendidas na plenitude.

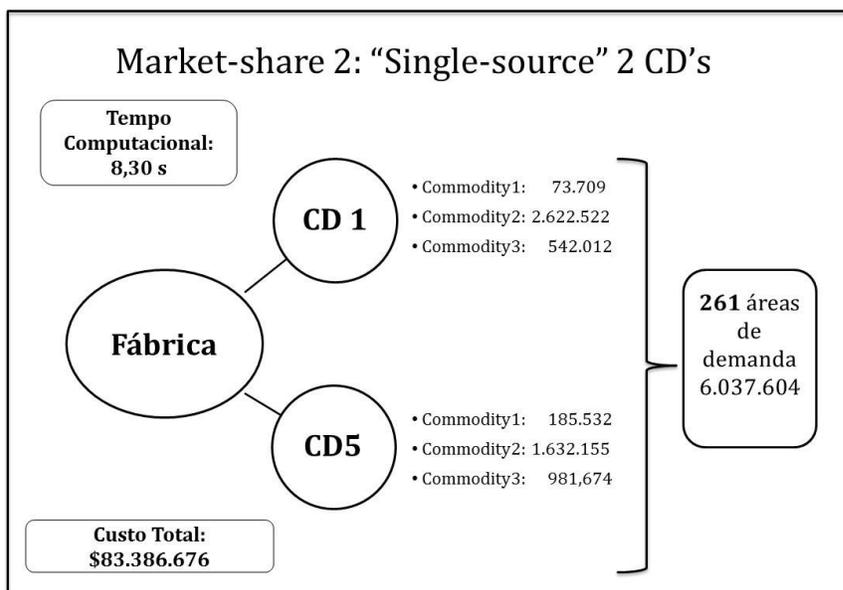


Figura 29: Projeto Logístico Market-share 2 - “Single-source” 2 CD’s

Embora exista redução na quantidade de centros de distribuição no conjunto da solução viável, o custo total da operação para o modelo “single-source”, limitado a utilizar no máximo 2 (dois) centros de distribuição, cresce 21% em relação custo total da solução que utiliza 3 (três) centros de distribuição, conforme Tabela 30.

Tabela 30: Market-share 2: modelo “Single-source”

Modelo	Informações e estrutura		
	CD's abertos	Custo \$	Tempo (s)
Single-source até 5 CD's	3	\$68.747.638	13,05
Single-source até 2 CD's	2	\$83.386.676	8,30

Os tempos computacionais para as duas instâncias são aceitáveis, sendo que a execução “single-source” que dispõe de 5 (cinco) centros de distribuição para resolver o problema tem um tempo computacional superior de aproximadamente 4 segundos.

Para realizar a execução da abordagem “arc-based” no cenário Market-share 2, nesse primeiro momento, não é limitada a quantidade de centros de distribuição. Os resultados do modelo são apresentados tela do Cplex© Studio da Figura 30.

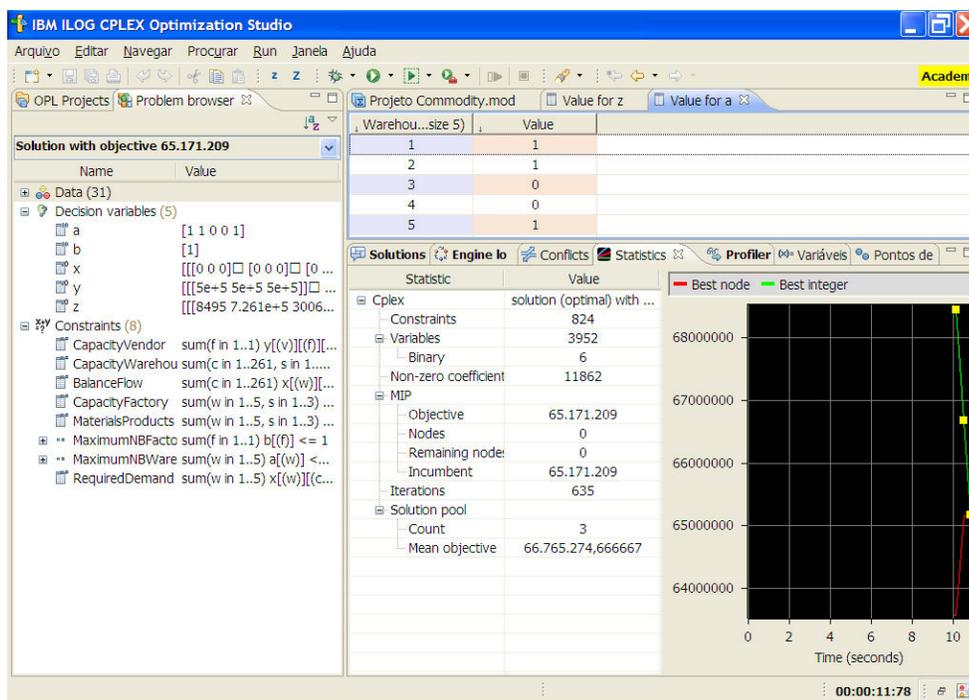


Figura 30: Resultados Cplex© Market-share 2 - “Arc-based” 3 CD's

O custo total de operação é de \$65.171.209, sendo que foram realizadas 635 iterações em 11,47 segundos. A partir dos resultados encontrados pelo Cplex®, a Figura 31 ilustra a estrutura de rede logística de acordo com a solução ótima.

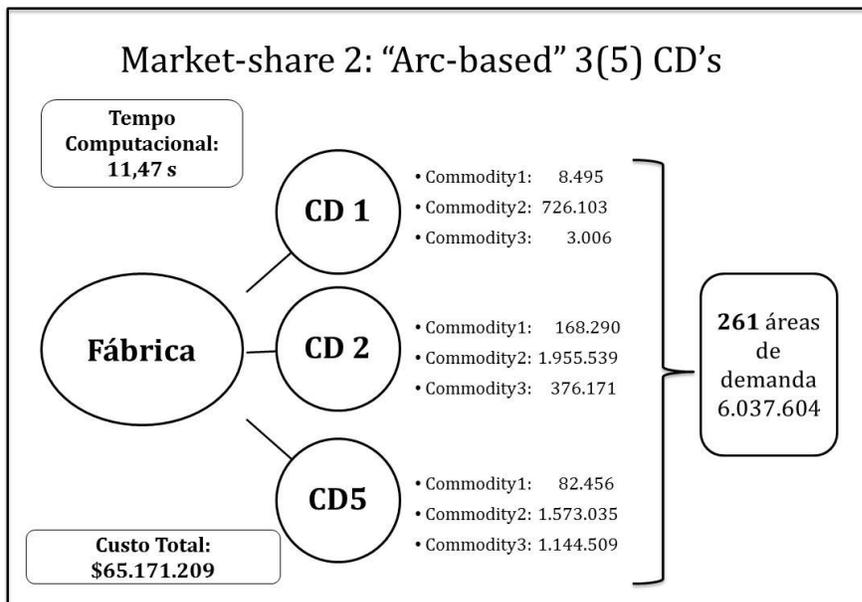


Figura 31: Projeto Logístico Market-share 2 – "Arc-based" 3 CD's

A solução do modelo "arc-based" propõe a abertura de 3 centros de distribuição para atender a demanda total de 6.037.604 produtos. A Figura 31 mostra a quantidade de produtos processada em cada centro de distribuição.

Ao restringir a quantidade de centros de distribuição para 2 (dois) o modelo "arc-based" apresenta os resultados conforme a Figura 32. A solução ótima apresentada nessa instância sugere um custo operacional de \$78.109.464. O tempo computacional é de 8,35 segundos e são realizadas 1.139 iterações para encontrar a solução viável.

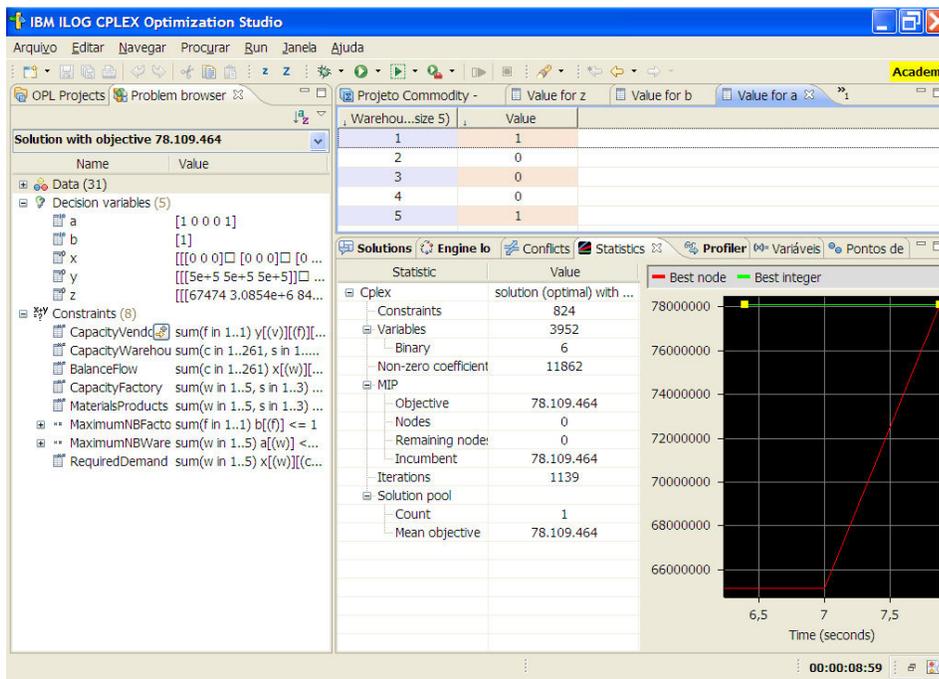


Figura 32: Resultados Cplex© Market-share 2 – “Arc-based” 2 CD’s

De acordo com os resultados do modelo “arc-based”, a Figura 33 ilustra a estrutura de rede da cadeia de suprimentos utilizando 2 (dois) centros de distribuição, visto que esse é o número máximo permitido nessa instância. Nesse sentido, a resolução do problema é obtida propondo a abertura dos centros de distribuição 1 e 5. Essa configuração é a mesma obtida pelo modelo “single-source” quando executado sob as mesmas restrições de abertura de centros de distribuição.

Na Figura 33 é possível visualizar ainda a quantidade de produtos enviada para cada centro de distribuição, a qual atende de forma integral às demandas das 261 zonas de consumo.

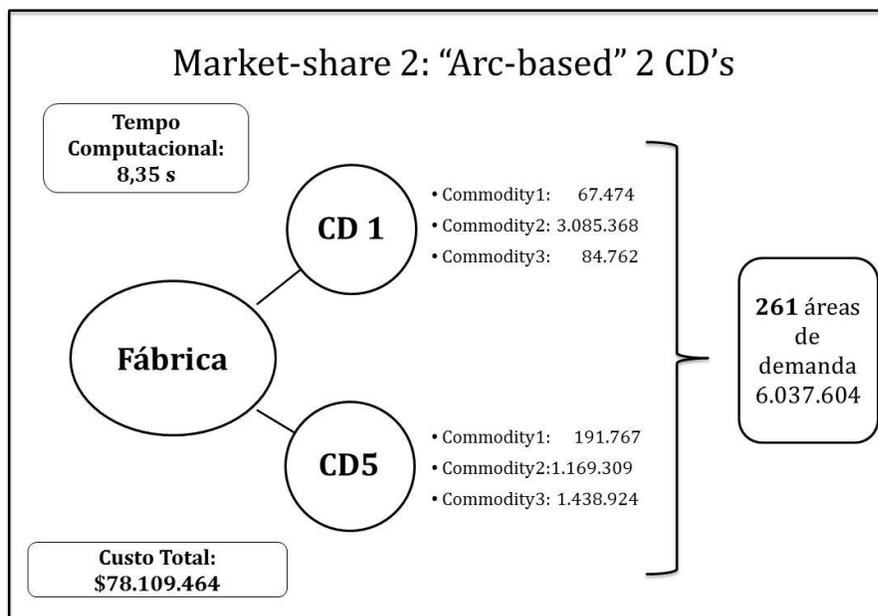


Figura 33: Projeto Logístico Market-share 2 - "Arc-based" 2 CD's

Para analisar os resultados encontrados com as execuções das instâncias "arc-based" é apresentada a Tabela 31 a seguir.

Tabela 31: Market-share 2: modelo "Arc-based"

Modelo	Informações e estrutura		
	CD's abertos	Custo \$	Tempo (s)
Arc-based até 5 CD's	3	\$65.171.209	11,47
Arc-based até 2CD's	2	\$78.109.464	8,35

Limitando o número de centros de distribuição para no máximo 2 (dois) o custo total de operação aumenta 20%. Em relação ao tempo computacional, os modelos seguem a tendência observada nas análises anteriores, nas quais as instâncias executadas a partir da limitação do número de centros de distribuição apresentam menor tempo em relação às que não possuem essa condição.

Os modelos "single-source" e "arc-based" foram executados a partir das premissas definidas pelo cenário Market-share 2. Na Tabela 32 são apresentadas as informações comparativas entre as duas abordagens a partir dos resultados encontrados de acordo as mesmas restrições.

Tabela 32: Market-share 2: análise dos resultados com limite de 5 CD's

Modelo	Informações e estrutura			
	CD's abertos	Custo \$	Tempo (s)	Var. % Custo
Single-source até 5 CD's	3	\$68.747.638	13,05	-5,20%
Arc-based até 5 CD's	3	\$65.171.209	11,47	

Sendo permitido que os modelos utilizem os 5 (cinco) centros de distribuição disponíveis para resolução do problema, as duas abordagens apresentam o mesmo conjunto de centros de distribuição. No entanto, na solução ótima da abordagem “arc-based” o custo total da operação é 5,20% mais baixo do que o custo total da abordagem single-source. Em relação ao desempenho computacional os modelos mantêm semelhantes tempos para encontrar as soluções.

Ao limitar a quantidade de centros de distribuição os modelos são novamente comparados em relação aos resultados, conforme Tabela 33.

Tabela 33: Market-share 2: análise dos resultados com limite de 2 CD's

Modelo	Informações e estrutura			
	CD's abertos	Custo \$	Tempo (s)	Var. % Custo
Single-source até 2CD's	2	\$83.386.676	8,30	-6,33%
Arc-based até 2 CD's	2	\$78.109.464	8,55	

Através da análise dos resultados da Tabela 33 percebe-se que o modelo “arc-based” mantém a melhor proposta em relação a custo total da operação. O custo total da operação é 6,33% menor em relação à solução ótima apresentada pelo modelo “single-source”. O tempo de computacional para execução dos modelos é praticamente o mesmo em ambas as execuções.

4.2.3 Cenário do Projeto Logístico – Market-share 3

O cenário Market-share 3 (Tabela 34) apresenta o aumento da participação de mercado da Commodity 1 no mercado original da do Rio Grande do Sul. A empresa considera esse cenário bastante factível e sugeriu utilizar esse cenário para analisar a configuração logística dos centros de distribuição a partir desse mercado.

Tabela 34: Market-share 3

Mercado	Commodity 1	Commodity 2	Commodity 3
Reposição	20%	10%	15%
Original	20%	10%	15%
Original RS	35%	-	-

A Tabela 35 apresenta a quantidade de demanda de cada um dos produtos para seus respectivos mercados. O total de produtos envolvidos nesse cenário é de 6.070.523 para 261 áreas de demanda.

Tabela 35: Demanda Market share 3

Mercado	Commodity 1	Commodity 2	Commodity 3	Demanda
Reposição	111.460	3.618.068	1.012.853	4.742.381
Original	180.700	636.609	510.833	1.328.142
Total	292.160	4.254.677	1.523.686	6.070.523

A execução dos modelos “single-source” e “arc-based” é realizada nessa subseção com o objetivo de determinar o menor custo de operação restringindo a configuração da rede da cadeia de suprimentos a utilizar somente 2 (dois) centros de distribuição. Essa restrição tem como objetivo identificar alternativas de distribuição com menor custo de investimento em novas instalações, nesse caso centros de distribuição. Nesse sentido, as instâncias realizadas nos cenário Market-share 1 e 2 apresentam os potenciais centros de distribuição para compor a cadeia de suprimento. Dessa forma, percebe-se que os centros de distribuição 1 e 5 aparecem em todas as instâncias realizadas.

O centro de distribuição 5 tem uma posição geográfica privilegiada em relação aos demais, pois se localiza próximo à fábrica e a áreas de grande demanda da Commodity 1, a qual é priorizada em relação à participação de mercado principalmente no Rio Grande do Sul. Sendo assim, as instâncias realizadas para o Market-share 3 apresentam a limitação de 2 (dois) centros de distribuição e a imposição de abertura do centro de distribuição 5. Ainda como restrição para o cenário Market-share 3, não é considerada a abertura do centro de distribuição 2, visto que o mesmo tem proximidade geográfica com o centro de distribuição 5, e não seria interessante utilizar somente esses dois centros de distribuição para compor a rede logística nesse tipo de indústria.

Apresentado os aspectos que envolvem as execuções dos modelos a partir do cenário Market-share 3, a Figura 34 mostra a tela de resultados do Cplex© Studio para o

modelo “single-source” considerando a abertura dos centros de distribuição 1 e 5. Nessa execução o custo operacional é de \$83.920.572 e o tempo computacional é 6,41 segundos. O número de iterações realizadas para encontrar a solução viável é de 15.

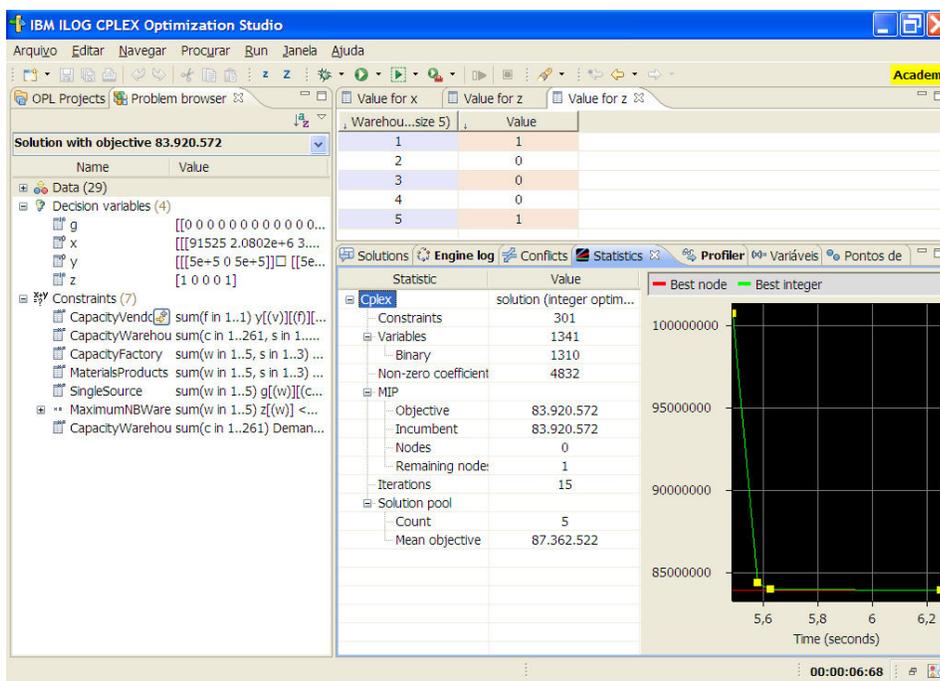


Figura 34: Resultados Cplex© Market-share 3 – “Single-source” CD’s 1 e 5

Na Figura 35 é apresentada a estrutura de distribuição para atender a demanda total de 6.070.660 produtos para as 261 áreas de consumo.

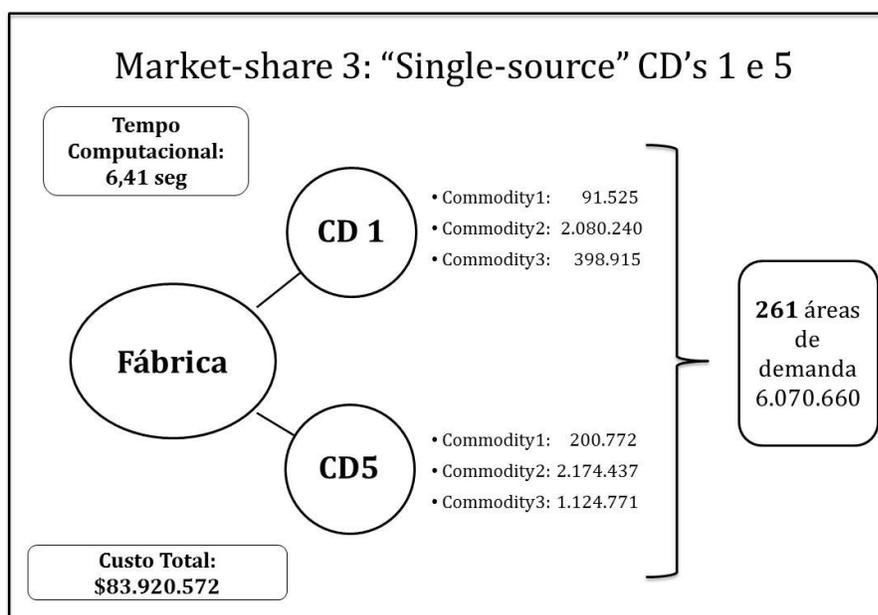


Figura 35: Projeto Logístico Market-share 3 – “Single-source” CD’s 1 e 5

A segunda execução do modelo “single-source” propõe a distribuição dos produtos através dos centros de distribuição 3 e 5. A Figura 36 mostra o custo da operação de \$93.663.497, o tempo computacional de 6,10 segundos e as 21 iterações.

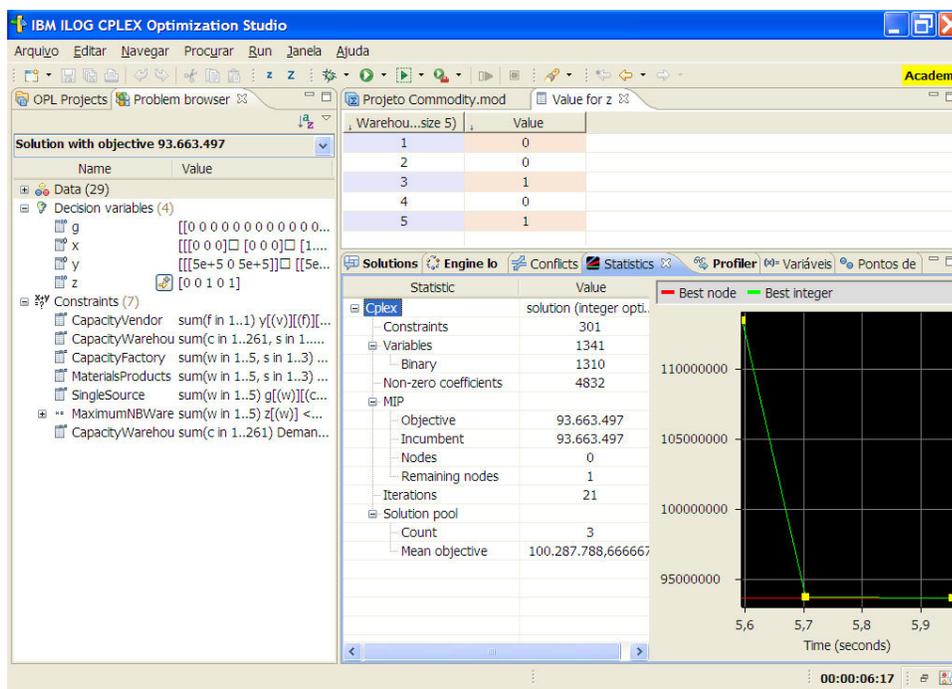


Figura 36: Resultados Cplex® Market-share 3 - “Single-source” CD’s 3 e 5

A Figura 37 apresenta a quantidade de produtos processada em cada centro de distribuição para atender a demanda das 261 áreas de consumo.

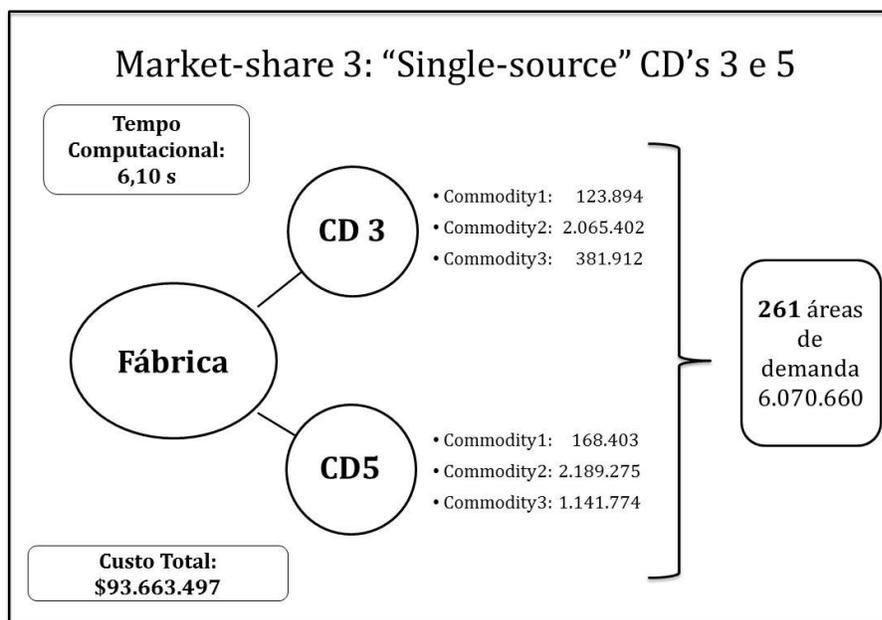


Figura 37: Projeto Logístico Market-share 3 - “Single-source” CD’s 3 e 5

A terceira execução do modelo “single-source” para o cenário Market-share 3 é restrita à abertura dos centros de distribuição 4 e 5. Nessa instância o custo total da operação é de \$104.956.316. A solução viável é obtida através de 12 iterações com tempo computacional de 5,57 segundos, conforme a tela de resultados do Cplex® Studio da Figura 38.

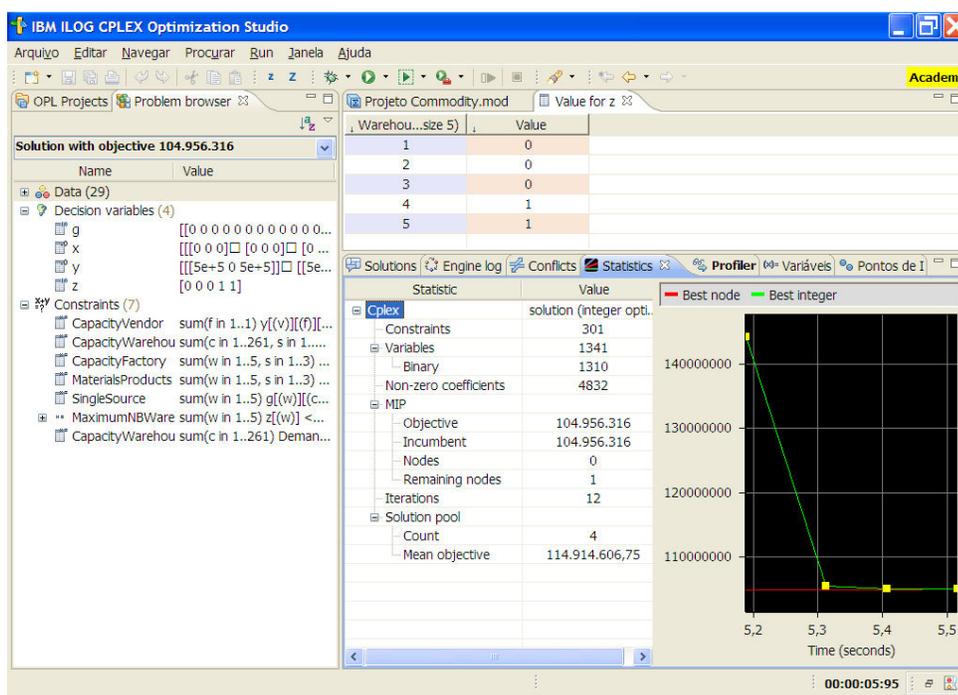


Figura 38: Resultados Cplex® Market-share 3 – “Single-source” CD’s 4 e 5

A estrutura do projeto logístico apresentada na Figura 39 mostra o fluxo de produtos enviados para cada centro de distribuição para atender a demanda de todas as zonas de consumo.

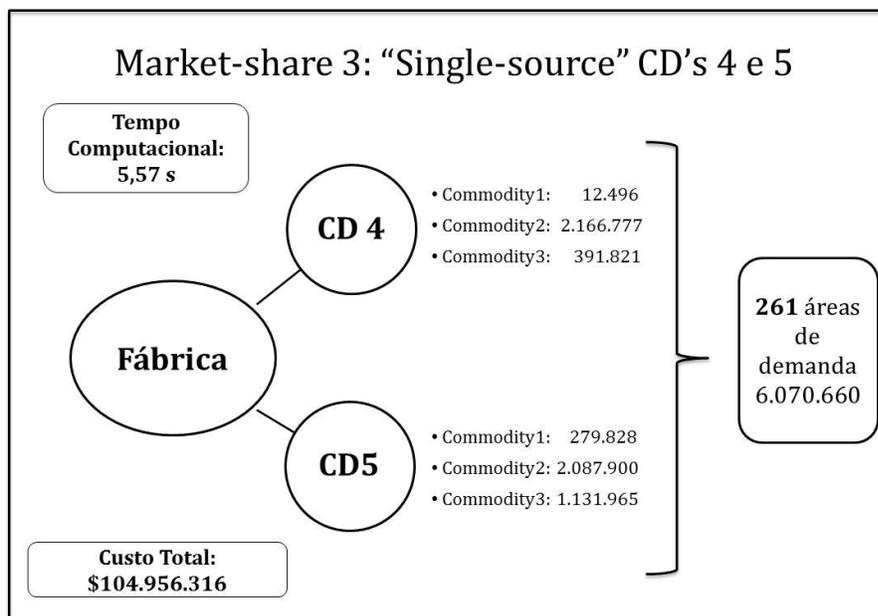


Figura 39: Projeto Logístico Market-share 3 – "Single-source" CD's 4 e 5

O cenário Market-share 3 foi submetido às 3 (três) execuções de acordo com as restrições de utilização de centros de distribuição. A Tabela 36 apresenta os principais elementos para análises das instâncias executadas a partir da abordagem "single-source".

Tabela 36: Análise dos resultados: "Single-source" 2 CD's

Modelo	Informações e estrutura			
	CD's abertos	Custo \$	Tempo (s)	Var. % Custo
Single-source	1 e 5	\$83.920.572	6,41	
Single-source	3 e 5	\$93.663.497	6,10	11,61%
Single-source	4 e 5	\$104.956.316	5,57	25,07%

Observa-se que as instâncias que propõem a utilização dos centros de distribuição 1 e 5 apresentam o menor custo operacional para compor a rede da cadeia de suprimentos. O custo operacional da instância que utiliza os centros de distribuição 3 e 5 é 11,61% superior em relação ao menor custo obtido através da abertura dos centros de distribuição 1 e 5. O custo operacional utilizando os centros de distribuição 4 e 5 é 25,07% maior em comparação à solução ótima encontrada na execução "single-source" usando os centros de distribuição 1 e 5.

Dessa forma, a solução viável que propõe a abertura dos centros de distribuição 1 e 5 possui o menor custo operacional através da abordagem "single-source". O tempo

computacional para encontrar a solução ótima em cada uma das instâncias não apresenta diferenças significativas em relação à performance.

Após realizar as execuções “single-source”, a aplicação da abordagem “arc-based” é executada a partir do cenário Market-share 3 utilizando a mesma sistemática aplicada no modelo “single-source”. Sendo assim, a Figura 40 apresenta os resultados da execução “arc-based” obtidos com a restrição de utilização dos centros de distribuição 1 e 5.

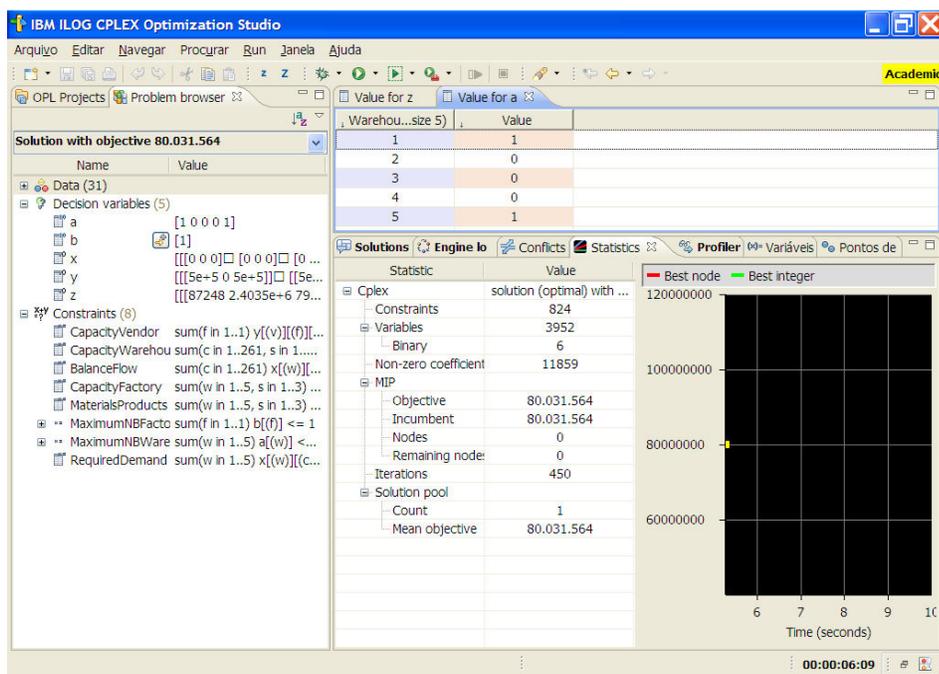


Figura 40: Resultados Cplex© Market-share 3 – “Arc-based” CD’s 1 e 5

A instância que utiliza abertura dos centros de distribuição 1 e 5 apresenta o custo total da operação de \$80.031.564. Foram realizadas 450 iterações em tempo computacional de 6,05 segundos.

Nessa solução todas as demandas são satisfeitas e as restrições respeitadas. Os 6.070.660 produtos são atendidos utilizando os centros de distribuição 1 e 5. Na Figura 41 é apresentada a quantidade de produtos processada em cada centro de distribuição para atender as 261 áreas de demanda.

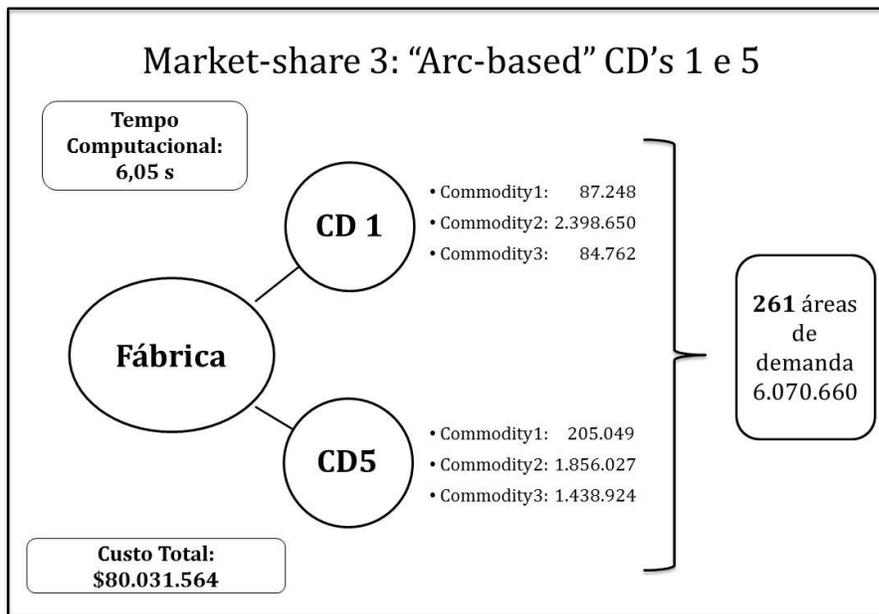


Figura 41: Projeto Logístico Market-share 3 - “Arc-based” CD’s 1 e 5

Os resultados utilizando os centros de distribuição 3 e 5 são apresentados na Figura 42. Nessa instância o custo total da operação é de \$88.414.182, sendo a solução viável encontrada em 6,14 segundos através de 457 iterações.

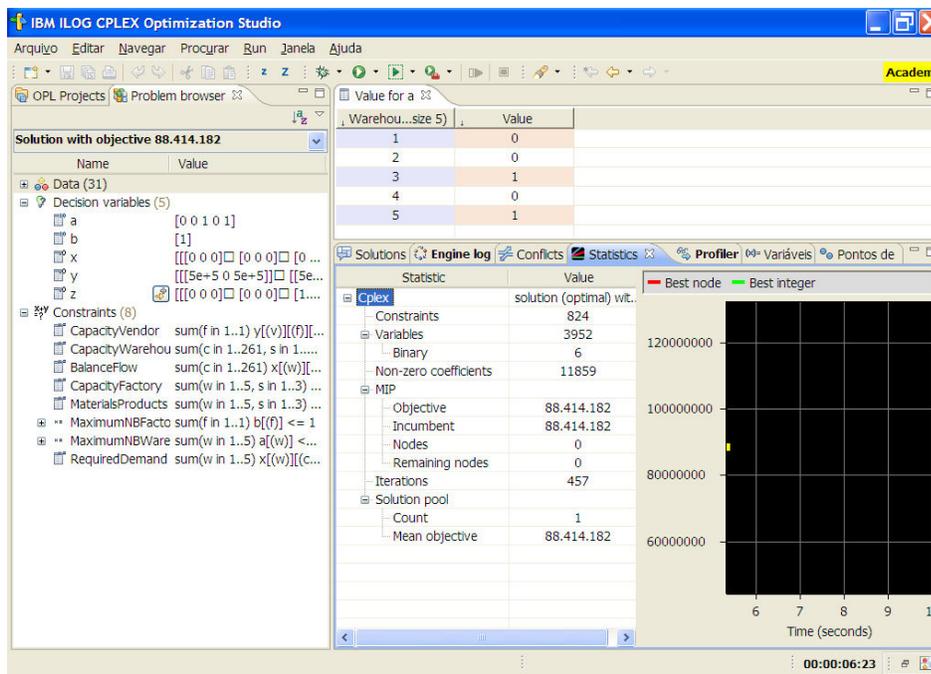


Figura 42: Resultados Cplex® Market-share 3 - “Arc-based” CD’s 3 e 5

A Figura 43 apresenta a quantidade de produtos processada em cada centro de distribuição para atender a demandas das 261 zonas de consumo.

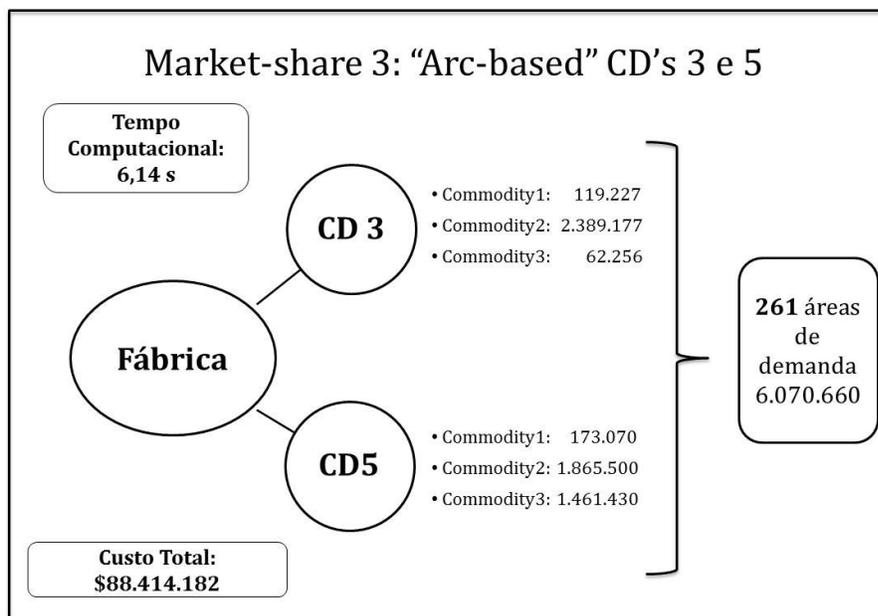


Figura 43: Projeto Logístico Market-share 3 – “Arc-based” CD’s 3 e 5

Na Figura 44 a seguir são apresentados os resultados da execução “single-source” a partir da restrição de utilizar os centros de distribuição 4 e 5.

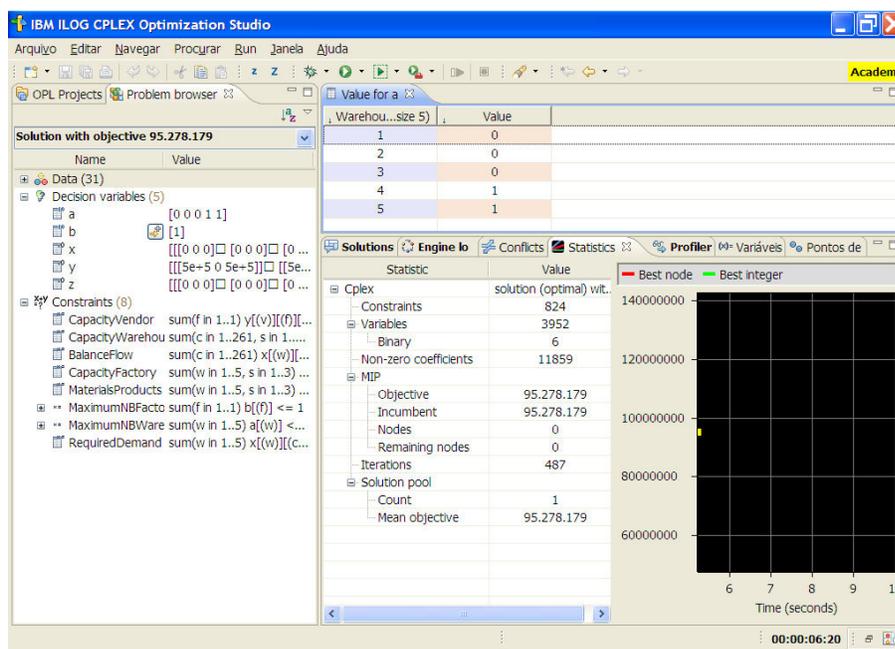


Figura 44: Resultados Cplex® Market-share 3 – “Arc-based” CD’s 4 e 5

Nessa instância a abordagem “arc-based” apresenta um custo operacional de \$95.278.179 com a abertura dos centros de distribuição 4 e 5. O tempo computacional foi de 6,12 segundos e o número de iterações 487.

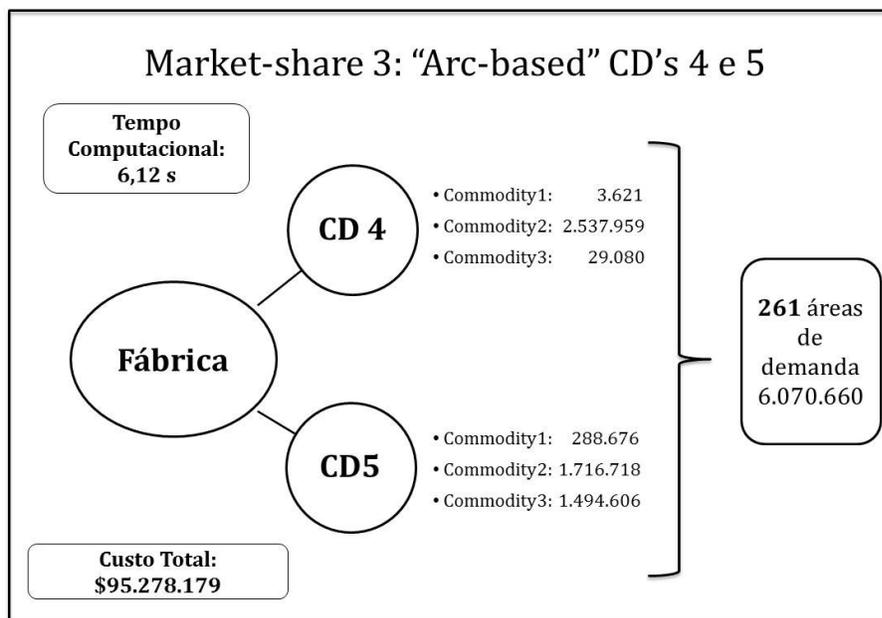


Figura 45: Projeto Logístico Market-share 3 - "Arc-based" CD's 4 e 5

A quantidade de produtos processada pelos centros de distribuição 4 e 5 é apresentada na Figura 45. Nessa instância todas as demandas são atendidas, assim como as restrições de capacidade. De acordo com as execuções do modelo "arc-based" apresentadas é possível analisar os resultados através da Tabela 37.

Tabela 37: Análise dos resultados: "Arc-based" 2 CD's

Modelo	Informações e estrutura			
	CD's abertos	Custo \$	Tempo (s)	Var. % Custo
Arc-based	1 e 5	\$80.031.564	6,05	
Arc-based	3 e 5	\$88.414.182	6,14	10,47%
Arc-based	4 e 5	\$95.278.179	6,12	19,05%

Em primeira análise, o custo total utilizando a abordagem "arc-based" através da abertura dos centros de distribuição 1 e 5 é o menor entre as 3 (três) configurações propostas. Os custos das instâncias utilizando os centros de distribuição 3 e 5 e os centros de distribuição 4 e 5 são 10,47% e 19,05% superiores ao menor custo total encontrado (abertura dos centros de distribuição 1 e 5), respectivamente. Comparando os modelos em relação aos tempos computacionais não há diferença significativa entre as 3 (três) instâncias executadas.

A Tabela 38 possibilita analisar os resultados obtidos a partir das instâncias realizadas no cenário Market-share 3. Através da análise dos resultados é possível

identificar que as abordagens “arc-based” apresentam menor custo quando comparadas com as execuções “single-source”.

Tabela 38: Análise dos resultados: cenário Market-share 3

Modelo	Informações e estrutura			
	CD's abertos	Custo \$	Tempo (s)	Var. % Custo
Single-source	1 e 5	\$83.920.572	6,41	-4,63%
Arc-based	1 e 5	\$80.031.564	6,05	
Single-source	3 e 5	\$93.663.497	6,10	-5,60%
Arc-based	3 e 5	\$88.414.182	6,14	
Single-source	4 e 5	\$104.956.316	5,57	-9,22%
Arc-based	4 e 5	\$95.278.179	6,12	

Nesse sentido, a solução viável que utiliza o conjunto de centros de distribuições 1 e 5 representa o menor custo em relação às outras combinações apresentadas. No entanto, os tempos computacionais apresentam diferenças consideradas irrelevantes.

Ao estabelecer as demandas para os 3 (três) grupos de produtos foi possível analisar a funcionalidade dos modelos, assim como identificar os potenciais centros de distribuição para compor a cadeia de suprimentos. Em qualquer das situações, os modelos apresentam resultados satisfatórios em relação à qualidade da solução e ao tempo computacional necessário para desenvolver as instâncias.

A partir das instâncias executadas foi construído um quadro de síntese que apresenta os principais resultados obtidos pelos modelos quando aplicados no problema da empresa. No Quadro 2 é possível identificar que os resultados apresentados pela abordagem “arc-based” são sempre mais satisfatórios em relação à abordagem “single-source”.

Ao utilizar a abordagem “arc-based”, a empresa não aplica a exclusividade de fornecimento de produtos de um centro de distribuição para uma área de demanda. Dessa forma, aumenta a necessidade de controle da empresa em gerir o atendimento das zonas de consumo, assim como a necessidade de estudos mais apurados em relação à demanda de cada um dos produtos.

Cenário	Modelo	Demanda (produtos)	CD's abertos	Custo \$	Tempo (segundos)	Iterações
Market share 1	Single-source	5.391.881	1, 2 e 5	\$56.882.604	32,32	4.868
	Single-source	5.391.881	1 e 5	\$66.020.663	10,32	767
	Arc-based	5.391.881	1, 2 e 5	\$55.678.012	13,04	656
	Arc-based	5.391.882	1 e 5	\$62.553.128	10,22	1.044
Market share 2	Single-source	6.037.604	1, 2 e 5	\$68.474.638	13,05	1.016
	Single-source	6.037.604	1 e 5	\$83.386.676	8,30	874
	Arc-based	6.037.604	1, 2 e 5	\$65.171.209	11,47	635
	Arc-based	6.037.604	1 e 5	\$78.109.464	8,35	1.139
Market share 3	Single-source	6.070.660	1 e 5	\$83.920.572	6,41	15
	Single-source	6.070.660	3 e 5	\$93.663.497	6,10	21
	Single-source	6.070.660	4 e 5	\$104.956.316	5,57	12
	Arc-based	6.070.660	1 e 5	\$80.031.564	6,05	450
	Arc-based	6.070.660	3 e 5	\$88.414.182	6,14	457
	Arc-based	6.070.660	4 e 5	\$95.278.179	6,12	487

Quadro 2: Síntese de resultados do estudo de caso

Em relação ao conjunto de centros de distribuição propostos para solução ótima, observa-se que há unanimidade na seleção de abertura do centro de distribuição 5 (cinco). Esse centro de distribuição é visto como potencial devido à localização próxima à planta de produção (fábrica). Além disso, ele também tem uma posição geográfica favorável em relação às zonas de consumo de grande potencial de mercado, tanto mercado reposição quanto mercado original. Por fim, independentemente do cenário, os modelos “single-source” e “arc-based” apresentam soluções para o projeto logístico da cadeia de suprimentos que atendem integralmente as demandas, assim como o fornecimento de matéria-prima em quantidade e custos alinhados à proposta de minimização do custo operacional.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A motivação em realizar esse trabalho é relacionada ao potencial prático desse estudo no desenvolvimento de soluções para a área de logística, principalmente em relação à cadeia de suprimentos. O objetivo do trabalho, conforme apresentado na introdução, foi desenvolver a modelagem matemática para atender o projeto logístico de uma indústria de *multi-commodity*, visando minimizar os custos totais de operação. Para realizar esse objetivo, foi necessário formular diferentes modelos matemáticos, visto que a empresa não tem uma definição em relação à estratégia de distribuição. Na revisão de literatura foram apresentados os principais trabalhos que envolvem soluções matemáticas para problemas na área de *Supply Chain Management*.

A metodologia de trabalho, apresentada no Capítulo 3, é fundamentada nas etapas de Pesquisa Operacional. Sendo assim, foi preciso determinar as principais variáveis e informações necessárias, definir o problema e formular os modelos matemáticos. As formulações das equações matemáticas foram baseadas no modelo de Jayaraman e Pirkul (2001), nesse trabalho os autores abordam o problema de projeto de rede da cadeia de suprimentos similar ao problema pesquisado nessa dissertação. Para implementação computacional dos modelos optou-se pelo desenvolvimento através do IBM ILOG CPLEX© versão 12.2. A utilização da versão atualizada do *software* foi possível devido ao fornecimento gratuito da versão acadêmica. Além disso, o CPLEX© é uma das principais ferramentas utilizadas para solução de problemas de programação linear, sendo bastante utilizado nos artigos das principais publicações da área de programação matemática. Ainda no desenvolvimento do método, foram realizados extensos experimentos computacionais utilizando diferentes cenários de diversas dimensões. Os cenários foram elaborados em tamanhos que pudessem representar ao máximo as situações reais do problema. Dessa forma, foi possível verificar a aderência dos modelos implementados, assim como validar a funcionalidade dos mesmos.

No Capítulo 4, os dois principais modelos desenvolvidos foram aplicados ao projeto inicial da cadeia de suprimentos de uma empresa industrial o qual pode ser considerado o foco desse trabalho. Para a aplicação dos modelos foi necessário realizar o levantamento da demanda para os principais mercados atendidos pela empresa. Dada a

grande quantidade de produtos, foram definidos 3 (três) famílias de produtos para pesquisa de mercado. Após definir os principais polos de consumo (261 áreas de demanda), foi necessário mapear as distâncias de todas as áreas de demanda até as localidades onde se encontram os centros de distribuição. A partir da definição das distâncias foi possível determinar o custo de transporte para cada localidade baseado no custo médio de transporte de cada grupo de produtos.

A aplicação dos modelos “single-source” e “arc-based” foi realizada a partir da definição de diferentes *market shares*. Dessa forma, foi possível analisar a funcionalidade dos modelos em atender às mais diversas demandas. Nesse sentido, os modelos forneceram soluções viáveis em tempos computacionais aceitáveis, além de apresentarem o conjunto de centros de distribuição que minimiza o custo total de operação da cadeia de suprimentos. Embora o foco desse trabalho seja determinar quais os centros de distribuição devem ser abertos para compor o projeto logístico da indústria, os modelos desenvolvidos abrangem toda a rede da cadeia de suprimentos, ou seja, os modelos determinam a quantidade de matéria-prima que deve ser fornecida, assim como de quais fornecedores a fábrica deve receber essas matérias-primas. O Quadro 2 demonstra uma síntese das informações apresentadas na execução dos modelos “single-source” e “arc-based”. Através de uma análise sucinta é possível identificar que o modelo “arc-based” apresenta os melhores resultados em relação ao custo de operação. Além disso, percebe-se que os centros de distribuição 1 e 5, em geral, aparecem no conjunto de centros de distribuição das soluções ótimas para os problemas abordados. No entanto, ambas as abordagens apresentam performances computacionais similares em relação ao tempo de execução das instâncias.

Por se tratar da modelagem de processos logísticos que ainda carecem de definições táticas e estratégicas por parte de empresa, os modelos apresentados não foram expostos a circunstâncias que necessitem de complexos modelos matemáticos, assim como métodos heurísticos de solução. Essas limitações serão superadas a partir da definição das demandas de cada um dos produtos que envolvem as indústrias pesquisadas.

O resultado final desse trabalho pode ser descrito como o desenvolvimento de modelos matemáticos que permitem analisar diferentes cenários da cadeia de suprimentos. Os modelos construídos servem de apoio a importantes decisões em

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

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

REFERÊNCIAS

ANDRADE, E. L. **Introdução à pesquisa operacional: métodos e modelos para análise de decisão**. LTC, 1990.

ALONSO-AYUSO, A.; ESCUDERO, L.F.; GARIN, A.; ORTUNO, M. T.; PERES, G. An approach for strategic supply chain planning under uncertainty based of stochastic 0-1 programming. **Journal of Global Optimization**, v. 26, 2003. p. 97-124.

BALLOU, R. **Gerenciamento da cadeia de suprimentos**. Porto Alegre: 5a Ed., Bookman, 2006.

BORENSTEIN, D.; BECKER, J. L. Validating decision support systems. **Encyclopedia of Microcomputers**. New York, v.26, n.5, 2000. p. 323-341.

BOWERSOX, D. J.; CLOSS, D. J.; COOPER M. B. **Gestão logística de cadeias de suprimentos**. Porto Alegre: Bookman, 2006.

COHEN, M. A.; LEE, H. L. Resource deployment analysis of global manufacturing and distribution networks. **Journal of Manufacturing and Operations Management**, v. 2, 1989. p. 71-104.

COHEN, M. A.; MOON, S. An integrated plant loading model with economics of scale and scope. **European Journal of Operational Research**, v. 50, n.3, 1991. p. 266-279.

COLE, M. H. **Service considerations and the design of strategic distribution systems**. Doctoral Dissertation. Georgia Institute of Technology, Atlanta, GA, 1995.

DASKIN, M. S. **Network and discrete location: models, algorithms, and applications**. Northwestern University, Evanston, IL, USA, 1995.

GEOFFRION A. M.; GRAVES, G. W. Multicommodity distribution system design by benders decomposition. **Management Science**, v. 20, n.5, 1974. p. 822-844.

GEOFFRION, A. M.; POWERS, R. F. Twenty years of strategic distribution system design: An evolutionary perspective. **Interfaces**, v. 25, 1995. p. 105-128.

GOLMOHAMMADI, V.; AFSHARI, H.; HASANZADEH, A.; RAHIMI, M. A heuristic approach for designing a distribution network in a supply chain system. **African Journal of Business Management**, v.4, n.3, 2010, p.308-311.

GOLDBARG, M. C.; LUNA, H. P. **Otimização combinatória e programação linear – modelos e algoritmos**. Rio de Janeiro: Campus, 2000.

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

JANG, Y. J.; JANG, S. Y.; CHANG, B. M.; PARK, J. A combined model of network design and production/distribution planning for a supply network. **Computers & Industrial Engineering**, v. 43, 2002. p. 269-281.

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

JOHNSON, L. A.; MONTGOMERY, D. C. **Operations Research in Production Planning, Scheduling, and Inventory Control**. New York: John Wiley, 1974.

LEE, Y. H.; KWON, S. G., The hybrid planning algorithm for the distribution center operation using tabu search and decomposed optimization. **Expert Systems with Applications**, v. 37, 2010. p. 3093-3103.

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

MA, H.; SUO, C. A model for designing multiple products logistics networks. **International Journal of Physical Distribution and Logistics Management**, v. 36, n. 2, 2006. p. 127-135.

MAGNANTI, T. L.; MIREAULT, P.; WONG, R. T. Tailoring benders decomposition for uncapacitated network design. **Math Programming Study**, v. 26, 1986. p. 112-154.

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

MOHAMMADI BIDHANDI, H.; ROSNAH, M. Y.; MEGAT AHMAD, M. M. H.; ABU BAKAR, M. R. Development of a new approach for deterministic supply chain network design. **European Journal of Operational Research**, v. 198, 2009. p. 121-129.

PAPAGEORGIU, G. E.; ROTSTEIN, G. E.; SHAH, N. Strategic supply chain optimization for the pharmaceutical industries. **Industrial Engineering of Chemical Research**, v. 40, 2001. p. 275-286.

PIRKUL, H.; JAYARAMAN, V. Distribution planning in a multi-Commodity tri-echelon system. **Transportation Science**, v. 30, n. 4, 1996, p. 291-302.

_____. A multi-commodity, multi-plant, capacitated facility location problem: Formulation and efficient heuristic solution. **Computer and Operations Research**, v. 25, n. 10, 1998. p. 869-878.

RAGSDALE, C. T. **Modelagem e análise de decisão**. São Paulo: Cengage Learning, 2009.

REVELLE, C. S.; MARKS, D.; LIEBMAN, J. C. An analysis of private and public sector location models, **Management Science**, v. 16, 1970. p. 692-707.

SHEN, Z.J. A multi-commodity supply chain design problem. **Institute of Industrial Engineers Transactions**, v. 37, 2005. p. 753-762.

VIDAL, C. J.; GOETSCHALCKX, M. Strategic production-distribution models: A critical review with emphasis on global supply chain models. **European Journal of Operational Research**, v. 98, 1997. p. 1-18.

WAGNER, H. M. **Pesquisa operacional**. Prentice-Hall: Rio de Janeiro, 1986.

WINSTON, L. W. **Operations research applications and algorithms**. California-Belmont: Duxbury Press, 1994.

WU, D. S.; GOLBASI, H. Multi-item, multi-facility supply chain planning: models, complexities, and algorithms. **Computational Optimization and Applications**, v. 28, 2004. p. 325-356.

YIN, R. K. **Estudo de caso: planejamento e métodos**. 2^a Edição. Porto Alegre: Bookman, 2001.