JOHANN DA PAZ LAUTERBACH

Otimização da configuração de cadeia de suprimentos com análise complementar de competitividade dos cenários

São Paulo
2017

JOHANN DA PAZ LAUTERBACH

Otimização da configuração de cadeia de suprimentos com análise complementar de competitividade dos cenários

Dissertação apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Mestre em Ciências.

Área de Concentração:
Engenharia de Sistemas Logísticos

Orientador:
Prof. Dr. Miguel Cezar Santoro

v.1

São Paulo
2017

Catalogação-na-publicação

Lauterbach, Johann da Paz
Otimização da configuração de cadeia de suprimentos com análise complementar de competitividade dos cenários / J. P. Lauterbach -- São Paulo, 2017.
164 p.

Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Produção.

1.Logística 2.Pesquisa operacional 3.Localização industrial 4.Malha logística I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Produção II.t.

À minha esposa e filha, alicerces da minha vida.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, por terem me ensinado a importância dos estudos.

Aos meus amigos André Gâmbaro e Maurício Bissi Pires pelas valiosas dicas sobre modelagem matemática.

Ao professor Dr. Miguel Cezar Santoro, por toda atenção e apoio durante a orientação deste trabalho.

“Não há nada tão prático quanto uma boa teoria”

Kurt Lewin

RESUMO

Este trabalho teve como objetivo avaliar a influência do ambiente competitivo na solução de problemas de localização de instalações e desenho da cadeia desenvolvendo um modelo matemático que captasse simultaneamente muitos dos aspectos práticos que impactam no funcionamento da cadeia de suprimentos. A seleção destes aspectos foi baseada nos comentários e sugestões que autores desta linha de pesquisa propuseram para aprofundamento da literatura da área. Foi desenvolvido um modelo de programação linear inteira mista (PLIM) aplicando-o em um problema exemplo para avaliar a hipótese de que a configuração de menor custo da cadeia não necessariamente proporciona maior acessibilidade ao mercado e, em seguida, o mesmo modelo foi aplicado a um problema real, de maior porte, no setor de fertilizantes.

Palavras chave: Otimização da malha logística. Ambiente competitivo. Localização de instalações. Configuração da cadeia de suprimentos.

ABSTRACT

The goal of this study was to evaluate the influence of a competitive environment in solving facility location and network design problems by developing a mathematical model that could capture several of the practical aspects that influence both decisions and operations of the supply chain. The selection of these aspects was based on the comments and suggestions proposed by several authors of this field of the literature. The mathematical program developed is based on mixed integer linear programming (MILP) and is firstly applied on an example problem to evaluate the hypothesis that the chain configuration that provides the lowest cost not necessarily also provides the greatest accessibility to the market. Afterwards, the same optimization model is applied to a larger real problem in the fertilizer industry.

Keywords: Logistics network optimization. Competitive environment. Facility location. Network design.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Modelo de gerenciamento da cadeia de suprimentos. 24
Figura 2.2 – Exemplo 1 de cálculo de ICMS 58
Figura 2.3 – Exemplo 2 de cálculo de ICMS 60
Figura 2.4 – Posicionamento da demanda para os problemas 1 e 2 66
Figura 2.5 – Cenário A: uma nova instalação entrando em um mercado dominado por somente uma instalação pré-existente.....67
Figura 2.6 – Cenários B - G: captura do mercado com a variação do número de novas instalações e do número de instalações pré-existentes (adaptada de REVELLE, 1986).....68
Figura 3.1 – Mapa de fluxos possíveis entre os tipos de instalações presentes no modelo. 77
Figura 3.2 – Custos de transporte entre as instalações presentes no problema exemplo.....112
Figura 3.3 – Comparação dos resultados de cenários de otimização com a abordagem de minimização clássica de custos X avaliação competitiva dos resultados para os clientes.....114
Figura 3.4 – Fluxo mundial das principais matérias primas e fertilizantes em 2013. 119
Figura 3.5 - Quantidade de fertilizantes entregue ao consumidor final por unidade de área plantada, total e por tipo de nutriente – 2012 121
Figura 3.6 - Malha de produção e distribuição de fertilizantes e matérias primas ...123
Figura 3.7 – Principais países exportadores de ácido sulfúrico e ulexita (simples e calcinada) para o Brasil entre 2010 e 2016 (ALICEWEB, 2017) 125
Figura 3.8 – Principais países exportadores de MAP e ácido fosfórico (grau técnico e agrícola) e amônia anidra para o Brasil entre 2010 e 2016 (ALICEWEB, 2017).....126
Figura 3.9 - Principais portos para importação de fertilizantes.....127
Figura 3.10 - Pontos de demanda de fertilizantes 128
Figura 3.11 - Calendário agrícola de algumas grandes lavouras brasileiras.....129
Figura 3.12 – Localização da empresa concorrente.....131
Figura 4.1 – Localização da demanda por produto 136
Figura 4.2 – Localização das estruturas potenciais e atuais consideradas no modelo matemático.....137
Figura 4.3 – Cenário B1 - Distribuição do Boro Granulado obtido via importações.138
Figura 4.4 – Cenário M1 - Distribuição do MAP Técnico obtido via importações....139
Figura 4.5 – Cenário B2 – Otimização da distribuição de produtos boratados a partir da fábrica de menor custo 140
Figura 4.6 – Cenário M2 – Otimização da distribuição de MAP Técnico a partir da fábrica de menor custo 141
Figura 4.7 – Cenário M6 – Operação de distribuição de MAP Técnico da empresa concorrente 142

Figura 4.8 – Cenário C2 - Distribuição de MAP Técnico importado X Operação da empresa concorrente (sem influência do ICMS) 144
Figura 4.9 – Cenário C3 - Operação da empresa concorrente X fábrica própria de menor custo.....146
Figura 4.10 – Cenário C6 - Operação da empresa concorrente X fábrica própria de menor custo.....149

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 3.1 - Maiores países produtores de matérias primas e fertilizantes em 2013 119
Gráfico 3.2 – Histórico de aplicação de fertilizantes em kg/hectare 120
Gráfico 3.3 – Evolução do consumo e produção de fertilizantes no Brasil.....122
Gráfico 3.4 - Sazonalidade média por ano do consumo de fertilizantes no Brasil...129
Gráfico 5.1 - Resumo de custos dos cenários para atendimento da demanda dos produtos boratados 150
Gráfico 5.2 - Resumo de custos dos cenários para atendimento da demanda de MAP Técnico.....151

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Características básicas dos modelos apresentados 46
Tabela 2.2 - Aspectos de gerenciamento da cadeia de suprimentos inclusos nos modelos.....47
Tabela 2.3 – Resumo dos cenários apresentados no trabalho de Revelle (1986) 67
Tabela 3.1 - Características básicas dos modelos apresentados 94
Tabela 3.2 - Custo total (por tonelada) para atendimento de cada cliente de acordo com o cenário avaliado 113
Tabela 3.3 – Consumo mundial de fertilizantes em 2013 (em milhões de toneladas) 120
Tabela 3.4 - Potenciais localizações para construção de fábricas ou centros de distribuição 130
Tabela 3.5 – Quantidades necessárias de matéria prima para 1 tonelada de produto acabado 132
Tabela 3.6 – Processos necessários para produção de cada produto acabado 132
Tabela 4.1 – Lista de cenários avaliados para resolução do caso real 134
Tabela 4.2 – Demanda (toneladas) por produto.....136
Tabela 4.3 – Diferença % do custo de atendimento (próprio x concorrente) ao cliente e número de clientes atendidos por estado (Cenário C1) 143
Tabela 4.4 – Diferença % do custo de atendimento (próprio x concorrente) ao cliente e número de clientes atendidos por estado (Cenário C2) 145
Tabela 4.5 – Diferença % do custo de atendimento (próprio x concorrente) ao cliente e número de clientes atendidos por estado (Cenário C3) 147
Tabela 4.6 – Diferença % do custo de atendimento (próprio x concorrente) ao cliente e número de clientes atendidos por estado (Cenário C4) 147
Tabela 4.7 – Diferença % do custo de atendimento (próprio x concorrente) ao cliente e número de clientes atendidos por estado (Cenário C6) 149

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANDA	Associação nacional para difusão de adubos
CAGR	*Compound annual growth rate*, em português, taxa composta anual de crescimento.
CD	Centro de distribuição
CFL	*Competitive facility location*, em português, localização de instalações em ambiente competitivo.
CONFAZ	Conselho nacional de política fazendária
CSCND	*Competitive Supply chain network design*, em português, configuração competitiva da cadeia de suprimentos.
IBGE	Instituto brasileiro de geografia e estatística
ICMS	Imposto sobre Circulação de Mercadorias e Serviços
NCM	Nomenclatura comum do Mercosul
NPK	Expressão designada a fertilizantes compostos por nitrogênio, fósforo e potássio.
SCM	*Supply chain management*, em português, gerenciamento da cadeia de suprimentos
SCND	*Supply chain network design*, em português, configuração da cadeia de suprimentos.
SCP	*Set-Covering problem*, em português, problema de cobertura de conjunto
USP	Universidade de São Paulo

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO 17

1.1. OBJETIVO E ESCOPO DA DISSERTAÇÃO 17

1.2. RELEVÂNCIA DO TEMA 19

1.3. MOTIVAÇÃO DO TRABALHO E HIPÓTESES GUIA DA PESQUISA 20

1.4. VISÃO GERAL DA DISSERTAÇÃO 20

2. REVISÃO DA LITERATURA 22

2.1. DEFINIÇÕES 23

2.1.1. Gerenciamento da cadeia de suprimentos 23

2.1.2. Localização de instalações 24

2.1.3. Configuração da cadeia de suprimentos 26

2.2. MODELOS CLÁSSICOS DE LOCALIZAÇÃO DE INSTALAÇÕES 28

2.2.1. Modelo de cobertura 28

2.2.2. Modelo de cobertura máxima 29

2.2.3. Modelo das p-medianas e p-centros 31

2.2.4. Modelo de localização de instalações 34

2.3. EXTENSÕES DOS MODELOS CLÁSSICOS DE LOCALIZAÇÃO DE INSTALAÇÕES 36

2.3.1. Modelo de localização de instalações capacitadas e desenho da cadeia 37

2.3.2. Modelo de localização dinâmica ou modelo de localização multiperíodos 39

2.3.3. Modelo de localização de instalações capacitadas e multiproduto 40

2.3.4. Modelo de localização multicamadas 43

2.4. CONSIDERAÇÕES ADICIONAIS EM MODELOS DE LOCALIZAÇÃO E DESENHO DA CADEIA 46

2.4.1. Modelo de Jayaraman, Guide e Srivastava (1999) 47

2.4.2. Modelo de Cordeau, Pasin e Solomon (2006) 50

2.4.3. Modelo de Melachrinoudis e Min (2000) 53

2.5. CONSIDERAÇÕES SOBRE MERCADO BRASILEIRO – MODELO DE HAMAD (2014) .. 57

2.5.1. Exemplificação do cálculo do ICMS 58

2.5.2. Incentivos e reduções na tributação 60

2.6. CONSIDERAÇÕES SOBRE AMBIENTE COMPETITIVO NA DEFINIÇÃO DO DESENHO DA CADEIA 63

2.6.1. Perspectiva histórica 64

2.6.2. Competição no contexto empresarial 69

2.6.3. Classificação das características competitivas 69

2.6.4. Tipos de competição 70

2.6.5. Tipos de demanda 7

2.6.6. Tipos de comportamento do mercado 72

2.7. CONCLUSÕES DA REVISÃO DE LITERATURA E OPORTUNIDADES PARA PESQUISA .. 73

3. METODOLOGIA E MODELAGEM DO PROBLEMA 75

3.1. PROCESSO ESTUDADO 75
3.2. ABRANGÊNCIA DO PROBLEMA 78
3.3. MODELAGEM 79
3.3.1. Introdução à modelagem 79
3.3.2. Modelo Literal 80
3.3.3. Índices e conjuntos 82
3.3.4. Variáveis de decisão 83
3.3.5. Parâmetros e equações 84
3.3.6. Modelo matemático 94
3.3.7. Origens das equações do modelo 102
3.3.8. Análise de competitividade 108
3.4. APLICAÇÃO NO PROBLEMA EXEMPLO 110
3.4.1. Apresentação 110
3.4.2. Implementação e execução computacional 112
3.4.3. Apresentação dos resultados 112
3.4.4. Discussão dos resultados e considerações finais 114
3.5. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL E APLICAÇÃO EM CASO REAL 117
3.5.1. Apresentação 117
3.5.2. Panorama do Setor de fertilizantes 117
3.5.3. Definição do problema 122
3.5.4. Determinação dos parâmetros 124
3.5.5. Processamento do modelo 132

4. RESULTADOS OBTIDOS 134

4.1. INTRODUÇÃO 134
4.2. APRESENTAÇÃO E DETALHAMENTO DOS CENÁRIOS 136
4.2.1. Demanda a ser atendida e estruturas presentes no problema 136
4.2.2. Cenários Base: B1 e M1 137
4.2.3. Otimização da distribuição de produtos boratados – Cenário B2139
4.2.4. Otimização da distribuição de MAP Técnico – Cenário M2 140
4.2.5. Operação de distribuição de MAP Técnico da empresa concorrente – Cenário M6 142
4.2.6. Distribuição de MAP Técnico importado X Operação da empresa concorrente – Cenário C1 143
4.2.7. Distribuição de MAP Técnico importado X Operação da empresa concorrente (sem ICMS) – Cenário C2 144
4.2.8. Operação da empresa concorrente X fábrica própria de menor custo – Cenário C3 145
4.2.9. Operação da empresa concorrente X fábrica própria de menor custo (sem ICMS) – Cenário C4 1
4.2.10. Operação da empresa concorrente X melhor localização de fábrica própria contra operação concorrente – Cenário C5 148
4.2.11. Operação da empresa concorrente X melhor localização de fábrica própria contra operação concorrente (sem ICMS) – Cenário C6 148

5. CONCLUSÕES 149
5.1. APLICABILIDADE DO MODELO 150
5.2. COMPARAÇÃO DOS CENÁRIOS TESTADOS 150
5.3. RECOMENDAÇÕES PARA OPERAÇÃO 151
5.4. CRÍTICAS E COMENTÁRIOS SOBRE A MODELAGEM EMPREGADA 152
5.5. PROPOSTAS DE ESTUDOS FUTUROS 153
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 154
7. APÊNDICE A – LEGISLAÇÃO VIGENTE ACERCA DE FERTILIZANTES 159
8. ANEXO A – MESORREGIÕES USADAS COMO PONTOS DE DEMANDA 161

1. INTRODUÇÃO

A decisão de localização de instalações é um elemento crítico no planejamento estratégico de uma grande variedade de empresas. As ramificações de decisões desta natureza são amplas e tendem a impactar diretamente a operação da companhia.

Os altos custos associados à construção de uma nova instalação ou ao reposicionamento da estrutura atual tornam projetos de localização de instalações investimentos de longo prazo. Devido a isto, diversos fatores devem ser considerados para que a empresa não só atue bem na configuração atual do sistema em que se encontra, mas também durante toda a vida útil da instalação.

Dentre os fatores que influenciam fortemente a configuração da cadeia logística ao longo do tempo é possível encontrar fatores ambientais, políticos, legais, mudanças no perfil e localização do mercado consumidor, tendências de mercado, novas tecnologias, empresas concorrentes dentre outros, fazendo com que projetos robustos de localização de instalações necessitem incluir variáveis de natureza incerta nas análises.

Tendo em vista a extensão da literatura existente sobre todas as variáveis relevantes para problemas de localização, esta dissertação aprofunda-se mais especificamente em abordagens para otimização em ambientes competitivos, comparando diferentes métodos de solução para esta categoria de problemas. Sobre a localização de instalações em ambientes competitivos, tema central deste trabalho, será desenvolvido um modelo matemático para aplicação em um caso real de uma empresa do setor de fertilizantes.

1.1. Objetivo e escopo da dissertação

O objetivo da pesquisa é a proposição e implementação de um modelo matemático que considere simultaneamente a otimização da localização e configuração de uma série de instalações que competirão com algumas instalações concorrentes preexistentes pela demanda dos clientes. O objetivo principal é desenvolver uma estrutura de modelagem que seja suficientemente rica e flexível para responder a

algumas questões chave comumente enfrentadas pelos planejadores de instalações e configuração da cadeira, que são:

- Quantas instalações devem ser localizadas?
- Onde devem estar localizadas essas instalações?
- Que tipo de instalações devem ser localizadas? (Em termos de tamanho, variedade de produtos e outros aspectos de design).

Para atingir esse objetivo, o presente trabalho propõe o desenvolvimento de um modelo matemático de otimização, para localização de instalações, avaliando os seguintes pontos:

- construção de fábricas e determinação das suas localizações ideais, quantas devem ser construídas e qual vocação de cada uma delas (produtos produzidos);
- construção de pontos avançados de estoque (armazéns / centros de distribuição) para aproveitamento de eventuais sazonalidades em fretes ou capacidade ociosa de produção em períodos de baixa utilização dos ativos e determinação das localizações ideais, quantos devem ser construídos e a capacidade de armazenagem exigida para cada um;
- avaliação da influência de empresas concorrentes na configuração da malha;
- avaliação do benefício no imposto de importação e do Imposto sobre Circulação de Mercadorias e Serviços (ICMS) no desenho da malha;
- aplicação em problema exemplo reduzido para avaliação de todas as características presentes no modelo matemático construído;
- aplicação em caso real mostrando a generalização do modelo matemático construído.

1.2. Relevância do tema

A gestão da cadeia de suprimentos não abrange somente a movimentação de mercadorias, mas também decisões sobre onde, o quê e o quanto produzir em cada local; quanto manter em estoque em cada etapa do processo; como compartilhar informações ao longo da cadeia e, finalmente, onde posicionar plantas e/ou centros de distribuição (DASKIN; SNYDER; BERGER, 2005).

A decisão sobre localização de instalações é o mais importante problema de planejamento estratégico de logística e cadeia de suprimentos para grande parte das empresas (BALLOU, 2006). Além de ser uma decisão crítica para a organização, é também uma das mais difíceis de serem tomadas para a obtenção de uma cadeia eficiente e competitiva no mercado (DASKIN; SNYDER; BERGER, 2005).

Decisões de transporte e níveis de estoque podem ser alteradas em relativamente pouco tempo, adequando-se às mudanças de disponibilidade de matéria prima, custos de mão de obra, preço de componentes, custos de transporte, custo de manutenção de estoques, taxa de câmbio e mudanças na carga tributária. O compartilhamento de informações com os demais elos da cadeia também é uma decisão relativamente flexível, podendo ser alterada em resposta a novas alianças ou mudanças na estratégia da companhia. Resumidamente, decisões concernentes a transportes, estoques e compartilhamento de informações podem ser “re-otimizadas” de acordo com as diversas possibilidades de mudança na cadeia de suprimentos em que a empresa está inserida (DASKIN; SNYDER; BERGER, 2005).

A capacidade das instalações também é comumente considerada fixa no curto prazo, apesar dos níveis de produção poderem variar ao longo do tempo, de acordo com disponibilidade e preço dos insumos. Em contrapartida, a localização de instalações é uma decisão de difícil mudança, até mesmo no médio prazo. Um exemplo, é a localização de plantas multibilionárias para montagem de automóveis, a qual é difícil, se não impossível de ser alterada, somente devido a variações no mercado consumidor, ou nos custos de transporte e preços dos componentes, exceto no longo prazo. Localizações equivocadas para plantas de produção e montagem, bem como para centros de distribuição, resultam em custos excessivos durante toda a vida útil da instalação, independentemente do quão otimizada seja produção ou gestão dos

transportes, o controle de estoque e o compartilhamento das informações (DASKIN; SNYDER; BERGER, 2005).

A correta reconfiguração das instalações de uma cadeia logística pode proporcionar reduções de custo que variam entre 5 e 15%, mantendo ou até melhorando o nível de serviço ao cliente (BALLOU, 2001).

A opinião destes autores sobre a relevância da localização de instalações é compartilhada em uma pesquisa que revelou um aumento considerável de publicações acerca do tema nos últimos anos (e.g. MELO; NICKEL; SALDANHA-DA-GAMA, 2007).

1.3. Motivação do trabalho e hipóteses guia da pesquisa

A hipótese guia deste trabalho é a de que a inclusão do maior número de restrições consideradas simultaneamente em um trabalho de localização de instalações e desenho da cadeia impacta positivamente na qualidade do resultado e aumenta a aplicabilidade dos modelos matemáticos de otimização para solução destes problemas em situações reais. Para avaliar esta hipótese serão levantados os principais questionamentos abordados pela literatura existente no assunto e avaliada criticamente a possibilidade de inclusão dessas variáveis em um novo modelo matemático que represente de maneira abrangente as situações enfrentadas por uma empresa em um ambiente competitivo.

1.4. Visão geral da dissertação

O restante deste trabalho está organizado da seguinte maneira: o capítulo 2 contém a revisão da literatura e está dividida 6 grandes tópicos. (1) Definições dentro do contexto de gestão da cadeia de suprimentos, problemas de localização de instalações e configuração da cadeia de suprimentos, (2) Modelos clássicos de localização de instalações, (3) Extensões dos modelos de clássicos de localização de instalações, (4) Considerações adicionais em modelos de localização de instalações e desenho da cadeia, (5) Considerações sobre ambiente competitivo em decisões de localização de instalações e desenho da cadeia, finalizando com (6) Oportunidades de pesquisa identificadas e uma conclusão da revisão da literatura apresentada.

O capítulo 3 apresenta a metodologia e modelagem do problema abordado neste trabalho. Este capítulo apresenta o processo estudado, a abrangência do problema, descreve o problema exemplo utilizado para teste do modelo matemático, apresenta modelagem matemática utilizada e, ao final, o procedimento experimental e aplicação em caso real.

Por fim, o capítulo 4 conclui o trabalho apresentando as conclusões obtidas durante a elaboração deste estudo e fornecendo sugestões para aprofundamento da pesquisa.

2. REVISÃO DA LITERATURA

O propósito desta revisão de literatura é identificar os principais questionamentos e variáveis que vêm sendo abordados nos algoritmos de otimização utilizados para solucionar problemas de localização de instalações e desenho da cadeia de suprimentos, identificando lacunas nessa literatura que possam ser supridas com a proposição de um novo modelo matemático.

Diversos dos trabalhos publicados captam muitos dos aspectos práticos que impactam no funcionamento da cadeia de suprimentos, porém não de maneira simultânea (MELO; NICKEL; SALDANHA-DA-GAMA, 2006). O destaque nesta argumentação foi a preocupação em combinar “aspectos práticos” de maneira “simultânea” na modelagem matemática, ou seja, embora o tema já venha sendo amplamente explorado pela comunidade científica nas últimas décadas, como pode ser visto nos trabalhos de Francis; Mcginnis; White (1983), Aikens (1985), Owen e Daskin (1998), Snyder (2006), Melo, Nickel e Saldanha-da-Gama (2009) e Farahani et al. (2014), a praticidade das abordagens bem como a aplicabilidade em situações reais não receberam atenção adequada (MELO; NICKEL; SALDANHA-DA-GAMA, 2006).

Portanto, identificar e sintetizar criticamente as abordagens já utilizadas, bem como os questionamentos que direcionaram pesquisas anteriores, proporcionará uma perspectiva mais ampla sobre a necessidade de incluir ou não novas variáveis em um novo modelo de otimização que possa refletir de maneira abrangente o ambiente em que as empresas se encontram, atendendo as restrições às quais elas podem estar sujeitas.

Para tanto, esta revisão está dividida em três partes. Primeiramente são esclarecidas algumas definições relativas a termos usados frequentemente no trabalho, tais como gerenciamento da cadeia de suprimentos, localização de instalações e configuração da cadeia de suprimentos. Em seguida são apresentados diversos modelos matemáticos utilizados para solução de problemas de localização de instalações e configuração da cadeia de suprimentos finalizando com a revisão da literatura sobre a influência de aspectos competitivos na literatura revista anteriormente.

2.1. Definições

Antes de iniciar a revisão em si sobre o tema proposto, cabe formalizar algumas definições importantes que serão usadas ao longo do trabalho. Apesar de possuírem caraterísticas semelhantes e serem componentes que impactam profundamente na cadeia de suprimentos, os termos “localização de instalações” e “configuração da cadeia de suprimentos” não são sinônimos. As definições que seguem sobre gerenciamento da cadeia de suprimentos, localização de instalações e configuração da cadeia de suprimentos almejam delimitar a abrangência de cada tema, bem como explicitar a influência que exercem entre si.

2.1.1. Gerenciamento da cadeia de suprimentos

Existem diversas definições de gerenciamento da cadeia de suprimentos, (em inglês, *Supply Chain Management*, SCM) disponíveis na literatura e dentre elas, o *Council of Supply Chain Management Professionals* define SCM como o planejamento e gerenciamento de todas as atividades envolvidas no fornecimento e aquisição, conversão e todas as atividades de gestão de logística, incluindo coordenação e colaboração com canais parceiros, que podem ser fornecedores, intermediários, prestadores de serviços terceirizados e clientes . Em sua essência, é uma função de integração com responsabilidade principal de conectar as principais funções de negócios e de processos dentro de e entre empresas, em um modelo de negócios coeso e de alto desempenho. SCM inclui todas as atividades de gestão de logística mencionadas anteriormente, além de operações de manufatura, bem como a coordenação dos processos com marketing, vendas, design de produto, finanças e tecnologia da informação (CSCMP, 2013).

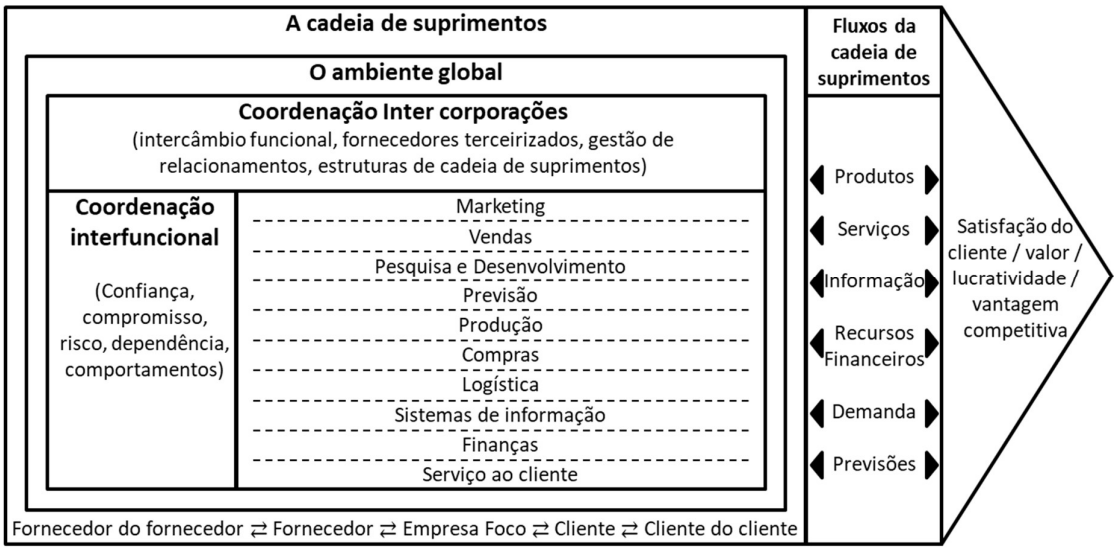
Já Ballou (2003) prefere abordar a definição de SCM de uma maneira mais gerencial, tal qual a seguinte definição proposta por Mentzer et al. (2001, p 4):

“O gerenciamento da cadeia de suprimentos é definido como a coordenação estratégica sistemática das tradicionais funções de negócios e das táticas ao longo dessas funções de negócios no âmbito de uma determinada empresa e ao longo dos negócios no âmbito da cadeia de suprimentos, com o objetivo de aperfeiçoar o

desempenho a longo prazo das empresas isoladamente e da cadeia de suprimentos como um todo".

A Figura 2.1 representa o modelo proposto por Mentzer et al. (2001) sobre gerenciamento da cadeia de suprimentos e explicita de maneira abrangente os diversos componentes inter-relacionados de uma cadeia de suprimentos.

Figura 2.1 – Modelo de gerenciamento da cadeia de suprimentos.



Fonte: Mentzer et al. (2001)

As definições de localização de instalações e configuração da cadeia de suprimentos apresentadas nos próximos itens esclarecerão a influência que elas recebem e exercem nos diversos componentes de uma cadeia de suprimentos, tais como marketing, vendas, pesquisa e desenvolvimento, previsão, produção, compras, sistemas de informação, finanças, serviço ao cliente e especialmente logística.

2.1.2. Localização de instalações

A otimização completa da cadeia de suprimentos só é atingida através do planejamento eficiente das decisões. No planejamento no nível estratégico, dentre as diversas decisões típicas está a decisão de localização das instalações de produção e/ou armazenagem. A localização de novas instalações, bem como redução ou realocação das instalações existentes são tipicamente projetos de longo prazo, envolvendo atividades demoradas (exemplo: construção de instalações) e geralmente envolvendo grandes investimentos de capital. A principal implicação disso para as

empresas é a necessidade de gerenciar a cadeia de suprimentos de maneira que os planos sejam conduzidos e implementados eficientemente, mitigando quaisquer chances de rompimento das atividades da cadeia (MELO; NICKEL; SALDANHA-DA-GAMA, 2006).

Segundo Hamad e Gualda (2011), modelos de localização têm sido estudados já há algum tempo sendo que alguns dos primeiros trabalhos encontrados na literatura remetem à década de 60, como os trabalhos de Kuehn e Hamburger (1963), Efroymson e Ray (1966) e Spielberg (1969). Uma das primeiras revisões da literatura encontrada acerca de localização de instalações foi o trabalho de Aikens (1985), que objetivava ilustrar a evolução das abordagens ao problema de localização e já se preocupando em mostrar como a pesquisa operacional vinha impactando o planejamento dos sistemas de distribuição e as diversas possíveis aplicações.

Tão importante quanto estas decisões é a reavaliação de toda essa infraestrutura quando mudanças significativas forem percebidas em: padrões de demanda do mercado, portfólio de produtos, processos de produção, estratégias de fornecimento/abastecimento, custo de operação das instalações e até mesmo eventuais fusões e aquisições ocorridas. Essa necessidade de avaliação contínua do estado da cadeia estabelece bem claramente o vínculo e impacto entre modelos de localização e gerenciamento estratégico da cadeia de suprimentos (SIMCHI-LEVI, KAMINSKY E SIMCHI-LEVI, 2007).

O termo “análise de localização” se refere a modelagem, formulação e solução de uma classe de problemas que pode ser descrita por instalações posicionadas em um espaço determinado. Segundo Revelle e Eiselt (2005), existem quatro componentes que caracterizam um problema típico de localização de instalações. São eles:

- clientes previamente localizados em pontos específicos ou em rotas determinadas;
- instalações a serem posicionadas;
- posição determinada na qual clientes e instalações estão alocados e
- métrica indicando distância ou tempo entre clientes e instalações.

De acordo com estas características, os principais questionamentos que podem ser levantados, como expostos no trabalho de Melo, Nickel e Saldanha-da-Gama (2007), são:

- quais instalações devem ser usadas (abertas)?
- quais clientes devem ser atendidos por qual instalação (ou quais instalações), de maneira que os custos totais da cadeia sejam mínimos?

Dentre os modelos de localização de fábricas e armazéns (instalações em geral) tidos como clássicos, Melkote e Daskin (2001a) citam os modelos de cobertura de Toregas et al. (1971), de cobertura máxima de Church e Revelle (1974), das p-medianas e p-centros de Hakimi (1964) e o de localização de instalações não-capacitadas de Kuehn; Hamburger (1963).

2.1.3. Configuração da cadeia de suprimentos

Historicamente, pesquisadores têm se focado na configuração de redes de distribuição, mas sem considerar a cadeia de suprimentos de maneira completa, ou seja, sem considerar a integração outras áreas tais como compras, produção, estoques, distribuição e roteirização. Estes temas só recentemente receberam mais atenção dos pesquisadores. Melo, Nickel e Saldanha-da-Gama (2009) também argumentam que está, dentre as decisões que influenciam a melhoria do desempenho de longo prazo da cadeia de suprimentos como um todo, encontrar a melhor configuração desta cadeia para que todas as operações possam ser realizadas de maneira otimizada.

Este problema foi motivado principalmente pela observação de que, em determinados contextos, mudar a configuração/topologia da cadeia de suprimentos é frequentemente mais efetivo, em termos de custo, frente a adicionar novas instalações na rede para melhorar o atendimento (MELKOTE; DASKIN, 2001b).

O termo “configuração” nesse tópico é utilizado para caracterizar algumas decisões que não estão presentes em problemas exclusivamente sobre localização de instalações. Chopra e Meindl (2008) explicam que decisões de configuração da cadeia incluem designação do papel da instalação, localização de unidades relacionadas a

produção, armazenagem ou transporte, alocação de capacidade a cada instalação e especificação de que mercados serão atendidos por quais instalações bem como quais fornecedores as atenderão. Dentre tais decisões, uma das mais significativas é a do papel de cada instalação, uma vez que esta escolha influencia diretamente o grau de flexibilidade que a cadeia possui para a alterar o modo em que o cliente é atendido.

Em geral, problemas combinando localização de instalações e configuração da cadeia são muito utilizados em uma série de situações nas quais o custo das instalações, custo de desenho da cadeia e custos de operações devem ser avaliados (MELKOTE; DASKIN, 2001b).

Os questionamentos que podem ser respondidos a partir dos modelos de configuração da cadeia são, portanto, mais abrangentes e incluem os questionamentos de modelos exclusivos de localização de instalações. A partir dos trabalhos de Geoffrion e Powers (1980), Geoffrion; Powers (1995) e Farahani et al. (2014) foi possível compilar uma lista não exaustiva de exemplos, tais como:

- quantos pontos de estoque devem existir, onde devem ser localizados e devem ser próprios ou de terceiros?
- os pontos de estoque devem armazenar todos os produtos ou serem exclusivos para determinadas linhas de produtos?
- quais clientes devem ser atendidos por quais pontos de estoque?
- onde as plantas devem ser localizadas?
- que produtos e quanto deve ser produzido em cada planta?
- quais fornecedores devem ser utilizados?
- quais deverão ser os fluxos de transporte na cadeia ao longo do ano?
- quais modos de transporte devem ser utilizados em cada fluxo?
- as instalações devem operar com qual capacidade em cada período?

- expansões de capacidade podem/devem ser realizadas em quais períodos?
- qual a lucratividade de clientes e produtos?
- todas as combinações clientes-produto são rentáveis e merecem ser atendidas?
- atendimento direto da fábrica, a partir de ponto de estoque ou ainda a partir de algum ponto de cross dock?

Embora decisões de localização de instalações sejam de extrema relevância dentro do conceito de configuração da cadeia, essa lista não exaustiva de questionamentos que podem ser respondidos com trabalhos de otimização da cadeia de suprimentos demonstra que localizações de instalações não são as únicas decisões que merecem atenção para a otimização da cadeia de suprimentos como um todo.

2.2. Modelos clássicos de localização de instalações

Inicialmente, os modelos clássicos de localização de instalações citados por Melkote e Daskin (2001a) são apresentados e em seguida, algumas das extensões oriundas destes trabalhos clássicos são apresentadas, finalizando com modelos mais abrangentes, envolvendo diversos aspectos que influenciam o planejamento e configuração da cadeia de suprimentos.

2.2.1. Modelo de cobertura

De acordo com Farahani et al. (2012), o primeiro modelo matemático relacionado a problemas de cobertura foi desenvolvido por Toregas et al. (1971) ao tentar otimizar a localização de instalações de serviços de emergência, tais como estações do corpo de bombeiros. Esse problema possui uma característica muito específica, na qual a distância e/ou tempo máximos entre a estação de serviço e o usuário é um parâmetro crucial. Em termos genéricos, o modelo tenta minimizar os custos de satisfazer um determinado nível de cobertura. Eles consideraram problema da seguinte maneira:

Sendo:

S: distância máxima aceitável para atendimento da demanda.

i: índice de nós de demanda;

j: índice de instalações;

N_i: conjunto de localizações potenciais em S para que $N_i = \{j | d_{ij} \leq S\}$;

x_j: variável binária indicando se a instalação foi instalada no ponto j ou não;

d_{ij}: distância entre nó de demanda i e a instalação j;

z: número total de instalações utilizadas;

Tem-se então:

$$Min\ z = \sum_{j=i}^{n} x_j \tag{2.1}$$

Sujeito a:

$$\sum_{j \in N_i} x_j \geq 1 \quad i = 1, 2, 3, \dots, m \tag{2.2}$$

$$x_j \in \{0,1\} \quad j = 1, 2, 3, \dots, n \tag{2.3}$$

A equação 2.1 representa a função objetivo que visa minimizar o número total de instalações utilizadas. A equação 2.2 representa a demanda de cada nó i. Já a equação 2.3 é restrição de integralidade para a variável binária x_j.

Desde a publicação deste modelo pioneiro, diversas novas contribuições foram realizadas na área, expandindo a abrangência de variáveis consideradas. Farahani et al. (2012) realizaram uma extensa revisão da literatura sobre problemas de cobertura para localização de instalações, na qual eles apresentam algumas das diversas extensões do modelo original de cobertura.

2.2.2. Modelo de cobertura máxima

Em diversas aplicações práticas, não existem recursos suficientes para atender todos os clientes com o nível desejado de cobertura. Church e Revelle (1974) citam o seguinte exemplo didático como motivador para o desenvolvimento do modelo de cobertura máxima:

Ao serem posicionadas 5 instalações, 90% da população é atingida. Para que 100% desta população tenha acesso ao serviço, seriam necessárias 10 instalações. Neste caso, o tomador de decisão pode ficar dividido entre a construção das 5 instalações adicionais e a utilização desse investimento para alternativas mais interessantes.

Com esse objetivo, o modelo de Church e Revelle (1974) maximiza a quantidade de pessoas cobertas por uma distância aceitável S ao localizar um número predeterminado de instalações e é formulado da seguinte maneira:

Sendo:

i: índice de nós de demanda;

j: índice de instalações;

h_i: demanda no nó i;

S: tempo ou distância padrão na qual a instalação deve ser encontrada;

P: número total de instalações a serem adicionadas;

a_{ij}: Parâmetro binário = 1 se distância entre j e i for menor do que S;

x_j: variável binária indicando se a instalação é adicionada no local j ou não;

z_i: variável binária indicando se o nó I é atendido ou não.

Tem-se então:

$$Max \ \sum_i h_i \, . \, z_i \tag{2.4}$$

Sujeito a:

$$z_i \leq \sum_j a_{ij} \, . \, x_j \tag{2.5}$$

$$\sum_j x_j \leq P \tag{2.6}$$

$$x_j \in \{0,1\} \quad \forall \, j \tag{2.7}$$

$$z_i \in \{0,1\} \quad \forall\, i \tag{2.8}$$

A equação 2.4 representa a função objetivo do modelo e visa maximizar a demanda coberta.

A equação 2.5 explica a relação entre a cobertura da demanda e variáveis de localização, na qual um nó j está coberto quando é alocada pelo menos uma instalação em um local que tem potencial para cobrir o nó j. Já a equação 2.6 representa a restrição que limita em P o número de instalações que podem ser alocadas. Por fim, as equações 2.7 e 2.8 representam as restrições de integralidade para as variáveis binárias x_j e z_i, respectivamente.

Uma extensão imediata do modelo de cobertura máxima de Church e Revelle (1974) é de que, apesar do interesse do tomador de decisão em atender à maior porcentagem possível da população dentro de uma distância ideal S, ele também pode se preocupar com a qualidade do serviço que as pessoas não cobertas estão recebendo. Outra extensão deste modelo é a preocupação de que exista uma distância máxima padrão T $(T > S)$ na qual nenhuma pessoa deve estar, apesar de não ser a distância ideal. De maneira resumida, o tomador de decisão pode querer manter a maior parte possível da população abaixo de uma distância ideal e, ao mesmo tempo, garantir que ninguém esteja localizado em uma distância superior a T $(T > S)$ da instalação mais próxima. Quanto mais próximo T for de S, significa que a solução encontrada proporciona um atendimento com poucas discrepâncias para a população.

Tal como ocorrido nos modelos de cobertura de Toregas et al. (1971), desde a publicação modelo de cobertura máxima de Church e Revelle (1974), diversas novas contribuições foram realizadas na área. Farahani et al. (2012) apresentam uma lista não exaustiva dos diversos avanços realizados na área.

2.2.3. Modelo das p-medianas e p-centros

De acordo com Farahani et al. (2012), um dos trabalhos pioneiros nesse campo foi o modelo de Hakimi (1964), ao tentar otimizar a localização de centrais telefônicas e estações policiais em uma rodovia. Em seu artigo, Hakimi expõe que os conceitos de “centro” e do “vértice mediano” de um gráfico são generalizados para “centro absoluto”

e “mediana absoluta” de um grafo ponderado (um gráfico com pesos associados a seus vértices, bem como para suas arestas). Estes resultados são usados para encontrar o local ideal de uma central de atendimento em uma rede de comunicação e para localizar o melhor lugar para construir uma delegacia de polícia em um sistema de rodovias.

A rede de comunicação, tal como um sistema de interligação de telefone, inclui geralmente uma central de atendimento S. Todos os fluxos de tráfego (mensagens) da rede têm de chegar ao centro S antes de serem processadas e, em seguida, enviadas para o seu destino. O problema é encontrar a localização exata deste centro de atendimento S de tal modo que o comprimento total dos fios de ligação seja mínimo. O problema da ótima localização de postos policiais ou hospitais é um pouco semelhante. Considera-se um número de comunidades de tamanhos diferentes que estão interligados por um sistema de rodovias. Busca-se encontrar a localização da delegacia P tal que a distância máxima de qualquer ponto da rede até P seja mínima.

Current, Daskin e Schilling (2002) apresentam em notação matemática os modelos dos p-Centros e das p-Medianas, como segue adiante.

2.2.3.1. p-Centros

O modelo de localização de p-Centros aborda o problema de minimizar a distância máxima entre um ponto de demanda e a instalação mais próxima que pode atender este determinado ponto, sendo que existe um número pré-determinado de instalações que podem ser utilizadas/adicionadas. Este modelo foi escrito da seguinte maneira:

Sendo:

i: índice de nós de demanda;

j: índice de instalações;

I: Conjunto dos nós de demanda existente;

J: Conjunto dos locais que podem ser selecionados para fixar uma instalação;

$$y_{ij} = \begin{cases} 1 & \textit{Se a demanda do nó } i \textit{ está associad à instalação do nó } j \\ 0 & \textit{Caso contrário} \end{cases}$$

W = a distância máxima entre os pontos de demanda e a instalação a qual o ponto está designado.

Tem-se então:

$$Min\ W \tag{2.9}$$

Sujeito a:

$$\sum_{j \epsilon J} x_j = P \tag{2.10}$$

$$\sum_{j \epsilon J} y_{ij} = 1 \quad \forall\, i \,\epsilon\, I \tag{2.11}$$

$$y_{ij} - x_j \leq 0 \quad \forall\, i \,\epsilon\, I, j \,\epsilon\, J \tag{2.12}$$

$$W - \sum_{j \epsilon J} h_i d_{ij} y_{ij} \geq 0 \quad \forall\, i \,\epsilon\, I \tag{2.13}$$

$$x_j \,\epsilon\, \{0,1\} \quad \forall\, j \,\epsilon\, J \tag{2.14}$$

$$y_{ij} \,\epsilon\, \{0,1\} \quad \forall\, i \,\epsilon\, I, j \,\epsilon\, J \tag{2.15}$$

A equação 2.9 representa a função objetivo do modelo, que minimiza a máxima distância de cada nó de demanda até a instalação mais próxima, ponderada pela demanda do nó. A equação 2.10 representa o limite de P instalações que podem ser abertas. A expressão 2.11 define que cada nó pode ser atendido por exatamente uma instalação e a restrição 2.12 limita o atendimento da demanda do nó somente a instalações abertas. A expressão 2.13 define a máxima distância de cada nó até a instalação mais próxima, ponderada pela demanda do nó que está sendo minimizada. As expressões 2.14 e 2.15 são referentes às decisões binárias de se estabelecer ou não a localização de uma instalação no ponto x_j e sobre estabelecer que a demanda de cada nó só pode ser atendida por no máximo uma instalação.

2.2.3.2. p-Medianas

O modelo das p-Medianas encontra os locais de P instalações que minimizam a distância total entre nós e as instalações que os atendem, ponderando pela demanda de cada nó.

Tem-se:

$$Min \quad \sum_{i \epsilon I} \sum_{j \epsilon J} h_i d_{ij} y_{ij} \tag{2.16}$$

Sujeito a:

$$\sum_{j \epsilon J} x_j = p \tag{2.17}$$

$$\sum_{j \epsilon J} y_{ij} = 1 \quad \forall\, i \,\epsilon\, I \tag{2.18}$$

$$y_{ij} - x_j \leq 0 \quad \forall\, i \,\epsilon\, I, j \,\epsilon\, J \tag{2.19}$$

$$x_j \,\epsilon\, \{0,1\} \quad \forall\, j \,\epsilon\, J \tag{2.20}$$

$$y_{ij} \,\epsilon\, \{0,1\} \quad \forall\, i \,\epsilon\, I, j \,\epsilon\, J \tag{2.21}$$

A equação 2.16 representa a função objetivo do modelo, que visa minimizar a distância total viajada ponderada pela demanda.

As expressões 2.17 até 2.21 atendem às mesmas funções das expressões 2.10 até 2.15 (exceto 2.12, específica para o modelo dos p-Centros).

Maiores detalhes em extensões e outras aplicações para os modelos de p-Centros e p-Medianas podem ser encontrados em uma pesquisa do tipo *survey* realizada por Tansel, Francis e Lowe (1983).

2.2.4. Modelo de localização de instalações

Também conhecido como modelo de localização de instalação única ou modelo de localização de armazém, o último modelo tido como clássico por Melkote e Daskin (2001a) é o modelo de localização de instalações de Kuehn e Hamburger (1963). Os autores descrevem a motivação do trabalho pela seguinte situação:

Armazéns regionais podem executar uma variedade de funções na distribuição. Algumas delas incluem: a redução dos custos de transporte quando comparados a embarque direto aos clientes, permitindo embarques consolidados e com maior ocupação entre fábrica e armazém; a redução dos custos de entrega através da combinação em remessas individuais de produtos fabricados em várias fábricas e a

melhoria das relações com os clientes, diminuindo o tempo de entrega em relação ao embarque direto da fábrica, permitindo assim que os clientes reduzam seus estoques. Há, no entanto, os custos substanciais associados com a operação de um sistema de armazéns regionais. O problema em questão pode, portanto, ser enunciado da seguinte maneira: determinar a posição do armazém que será mais rentável para a empresa, igualando o custo marginal de operação do armazém com a redução de custos de transporte e os lucros incrementais resultantes do melhor relacionamento com o cliente (entrega mais rápida).

Para solucioná-lo, a seguinte modelagem matemática foi utilizada:

Sendo:

X_{hij} = quantidade do produto h $(h = 1, \dots, p)$ enviado da fábrica i $(i = 1, \dots, q)$ através do armazém j $(j = 1, \dots, r)$ para o cliente k $(k = 1, \dots, s)$;

A_{hij} = custo unitário de transportar o produto h da fábrica i para o armazém j;

B_{hjk} = custo unitário de transportar o produto h do armazém j para o cliente k;

$C_{hj}\left(\sum_{ik} X_{hijk}\right)$ = custo total da operação do armazém ao processor o produto h no armazém j. Sem perda de generalização, é possível expressar esta função como a soma de F_j e S_{hj} definidas como:

$D_{hk}(T_{hk})$ = custo de atrasar T unidades de tempo do produto h para o cliente k;

F_j = Custo fixo por unidade de tempo de operação do armazém j;

$S_{hj}\left(\sum_{ik} X_{hijk}\right)$ = custo semi-variável de operar o armazém j por unidade h processado;

Q_{hk} = Quantidade do produto h demandado pelo cliente k;

W_j = Capacidade do armazém j;

Y_{hi} = Capacidade da fábrica i de produzir o produto h;

$$Z_j = \begin{cases} 1 & \sum_{ik} X_{hijk} > 0 \\ 0 & Caso\ contrário \end{cases}$$

$\sum Z_j$ = número de armazéns utilizados.

Tem-se então:

$$Min \sum_{hijk}(A_{hij} + B_{hjk})X_{hijk} + \sum_j F_j Z_j + \sum_{hj} S_{hk}\left(\sum_{ik} X_{hijk}\right) + \sum_{hk} D_{hk}(T_{hk}) \quad (2.22)$$

Sujeito a:

$$\sum_{ij} X_{hijk} = Q_{hk} \quad (2.23)$$

$$\sum_{jk} X_{hijk} \leq Y_{hi} \quad (2.24)$$

$$I_j\left(\sum_{hik} X_{hijk}\right) \leq W_j \quad (2.25)$$

A equação 2.22 representa a função objetivo do modelo, que visa minimizar os custos totais do sistema. A expressão 2.23 é referente à restrição de atendimento integral da demanda do cliente k, pelo produto h e a expressão 2.24 limita a produção da fábrica i de produzir o produto h de acordo com a capacidade instalada. A equação 2.25 refere-se à capacidade do armazém j, onde $I_j\left(\sum_{hij} X_{hijk}\right)$ é a função que atribui um nível máximo de estoque associado ao fluxo de todos os produtos, de todas as fábricas para todos os clientes, passando pelo armazém j.

2.3. Extensões dos modelos clássicos de localização de instalações

Tal como descrito anteriormente, os modelos clássicos de localização de instalações foram motivados por situações particulares que as empresas da época enfrentavam e os esforços desses autores pioneiros foram direcionados para otimizar a situação dessas empresas. Quer seja localizando postos de atendimento de emergência em locais estratégicos visando o atendimento da maior parcela possível da população de determinada região no menor tempo possível, ou até mesmo encontrar a configuração da cadeia que proporcione o melhor retorno financeiro para a empresa, tornando-a mais competitiva e eficiente.

Hoje em dia, as pesquisas na área de gerenciamento da cadeia de suprimentos (localização de instalações e configuração da cadeia de suprimentos no caso deste trabalho) permanecem com o mesmo foco de otimizar a situação das empresas ou de

aprimorar o planejamento delas. A grande diferença é que novas variáveis entraram no contexto, gerando situações inusitadas, impactando no planejamento e operação. Melo, Nickel e Saldanha-da-Gama (2009) realizaram um extenso trabalho de revisão da literatura sobre localização de instalações e gerenciamento da cadeia de suprimentos, associando trabalhos da área com as respectivas variáveis e questionamentos abordados.

Primeiramente, foi sugerida uma classificação dos modelos de acordo com a estrutura da cadeia de suprimentos considerando número de elos, número de elos com decisão, número de produtos, número de períodos e tipo de dados.

Dentre a gama de trabalhos encontrados com cada uma dessas características, foram selecionados alguns dos que continham ao menos uma delas para exemplificar o impacto que exercem na modelagem dos problemas, introduzindo os diferentes tipos de restrições que podem ser usadas nos modelos matemáticos sobre este tema.

2.3.1. Modelo de localização de instalações capacitadas e desenho da cadeia

Melkote e Daskin (2001b) apresentam um modelo determinístico de localização de instalações capacitadas e desenho da cadeia, com uma camada (consequentemente decisão de localização em somente uma camada), um produto e um período. O problema foi formulado da seguinte maneira:

Sendo:

N = conjunto de nós da rede;

L = conjunto de links (não direcionais) na rede;

d_i = demanda no nó i;

M = $\sum_{i \in N} d_i$ (demanda total da rede);

t_{ij} = custo unitário de viagem no fluxo (i, j);

f_i = custo de construção da instalação no nó i;

K_i = capacidade da instalação construída no nó i;

c_{ij} = custo de construção do link (i,j);

$Z_i = \begin{cases} 1 & se\ a\ instalação\ é\ alocada\ no\ nó\ i \\ 0 & Caso\ contrário \end{cases}$;

$X_{ij} = \begin{cases} 1 & se\ o\ link\ (i,j)\ é\ construído \\ 0 & Caso\ contrário \end{cases}$;

Y_{ij} = fluxo no link (i,j);

W_i = demanda total atendida por uma instalação no nó i.

Todas os parâmetros de entrada não negativos.

Tem-se então:

$$Min\ \sum_{(i,j)\in L} t_{ij}\left(Y_{ij} + Y_{ji}\right) + \sum_{i\in N} f_i Z_i + \sum_{(i,j)\in L} c_{ij} X_{ij} \tag{2.26}$$

Sujeito a:

$$\sum_{j\in N} Y_{ji} + d_i = \sum_{j\in N} Y_{ij} + W_i \quad \forall\ i \in N \tag{2.27}$$

$$W_i \leq MZ_i, \forall\ i \in N \tag{2.28}$$

$$Y_{ij} \leq MX_{ij},\ \forall (i,j) \in L \tag{2.29}$$

$$Y_{ji} \leq MX_{ij},\ \forall (i,j) \in L \tag{2.30}$$

$$Y_{ij}, Y_{ji} \geq 0,\ X_{ij} \in \{0,1\},\ \forall (i,j) \in L \tag{2.31}$$

$$W_i \geq 0,\ Z_i \in \{0,1\},\ \forall i \in N \tag{2.32}$$

A equação 2.26 representa a função objetivo do modelo, que visa minimizar os custos totais do sistema. A equação 2.27 representa a conservação de massa do sistema (soma de entradas = soma de saídas). A expressão 2.28 garante que somente instalações ativas podem atender as demandas dos clientes. Já as expressões 2.29 e 2.30 estipulam que o fluxo no link só pode ocorrer quando link estiver ativo. Por fim, as expressões 2.30 e 2.31 representam restrições de não negatividade das variáveis.

2.3.2. Modelo de localização dinâmica ou modelo de localização multiperíodos

O problema de localização dinâmica é uma generalização modelo de localização de instalações de Kuehn e Hamburger (1963) que considera a localização de instalações ao longo de um horizonte de planejamento. Em cada período deste horizonte, existe garantia de atendimento de todos os clientes por alguma instalação operante (DIAS; CAPTIVO; CLÍMACO, 2007).

Erlenkotter (1981) argumenta a existência de duas características essenciais que determinam a necessidade do uso de modelos de localização dinâmica: A primeira é a necessidade de mudanças em demanda e/ou custo ao longo do tempo e a segunda é a existência de custos significativos para realocar ou redimensionar as instalações utilizadas. Na ausência da primeira característica, a aplicação do modelo de localização de instalações de Kuehn e Hamburger (1963) já seria suficiente e na ausência da segunda característica, uma série modelos de modelo de localização de instalações desconectados seriam suficientes para atender o problema. Assumindo que ambas as características estejam presente, o autor propõe a seguinte formulação em um horizonte discreto de tempo, sendo:

x_{ijt} = quantidade produzida e enviada da fonte i para o local de demanda j no período t, $(x_{ijt} \geq 0)$;

z_{it} = capacidade da fonte i no período t, $(z_{it} \geq 0)$;

c_{ijt} = valor presente do custo unitário de movimentar produto da fonte i para o local de demanda j no período t;

$f_{it}(z_{it})$ = valor presente dos custos fixos incorridos por operar uma instalação de capacidade z_{it} no local i no período t;

D_{jt} = demanda j que precisa ser atendida no período t.

Tem-se então:

$$Min \quad \sum_{ijt} c_{ijt} x_{ijt} + \sum_{ijt} f_{it}(z_{it}) \tag{2.33}$$

Sujeito a:

$$\sum_i x_{ijt} \geq D_{jt} \quad \forall\,(j,t) \tag{2.34}$$

$$\sum_j x_{ijt} \leq \sum_{T \leq t} z_{iT} \quad \forall\,(i,t) \tag{2.35}$$

A equação 2.32 representa a função objetivo do sistema que visa minimizar os custos totais do sistema e as equações 2.34 e 2.35 são restrições de não negatividade das variáveis.

O trabalho de Erlenkotter (1981) não considera a possibilidade de abertura, fechamento e reabertura de uma instalação mais de uma vez durante o horizonte de planejamento. Dias, Captivo e Clímaco (2007) ampliaram a formulação deste problema para permitir esta flexibilidade. A vantagem dessa variação do modelo de localização dinâmica é permitir a diferenciação dos custos fixos em situações na qual as instalações já foram adquiridas, porém estão inoperantes.

2.3.3. Modelo de localização de instalações capacitadas e multiproduto

Inicialmente proposto por Geoffrion e Graves (1974), esse modelo de localização de instalações capacitadas e multiproduto foi motivado por um problema recorrente na configuração do sistema de distribuição das empresas, que é determinar a localização ótima de uma instalação intermediária de distribuição entre fábricas e clientes. Os autores expõem a seguinte situação: diversos produtos são produzidos em diversas fábricas com capacidades conhecidas. Para cada produto existe uma demanda conhecida de algum cliente. Esta demanda é atendida por entregas realizadas a partir do centro de distribuição (CD), com cada cliente recebendo produtos de um único CD. Existem restrições de movimentação mínima e máxima em cada CD sendo que as possíveis localizações deles são dadas e a localização é selecionada de acordo com a configuração que proporcione o menor custo possível ao sistema. Os CDs possuem custos fixos (caso sejam usados) além de um custo variável, de acordo com a movimentação de carga, sendo os custos de transporte assumidos como lineares.

Este modelo permite os seguintes questionamentos: quais localizações devem receber um CD, qual o tamanho do CD para cada local, quais clientes devem ser atendidos por cada instalação e qual a configuração dos fluxos de transporte para

cada produto. Para atender a toda demanda com um custo mínimo de distribuição, este problema foi modelado da seguinte maneira, sendo:

i = índice para produtos;

j = índice para fábricas;

k = índice para possíveis centros de distribuição;

l = índice para pontos de demanda;

S_{ij} = capacidade de produção do produto i na fábrica j;

D_{il} = demanda do cliente l pelo produto i;

V_k, V'_k = nível mínimo e máximo de movimentação anual do CD no local k;

f_k = custo fixo de operação do CD no local k;

v_k = custo variável unitário de movimentação do CD no local k;

c_{ijkl} = custo médio de produzir e expedir o produto i da planta j através do CD k para o cliente l;

x_{ijkl} = quantidade do produto i enviado da planta j através do CD k para o cliente l;

$$y_{kl} = \begin{cases} 1 & se\ CD\ k\ atende\ cliente\ l \\ 0 & Caso\ contrário \end{cases}$$

$$z_k = \begin{cases} 1 & se\ um\ CD\ é\ adquirido\ no\ local\ \ k \\ 0 & Caso\ contrário \end{cases}$$

Tem-se então:

$$Min: \ \sum_{ijkl} c_{ijkl} x_{ijkl} + \sum_k [f_k z_k + \ v_k \sum_{il} D_{il} y_{kl}] \tag{2.36}$$

Sujeito a:

$$\sum_{kl} x_{ijkl} \leq \ S_{ij} \quad \forall\ i, j \tag{2.37}$$

$$\sum_j x_{ijkl} = \ D_{il} y_{kl} \quad \forall\ i, k, j \tag{2.38}$$

$$\sum_k y_{kl} = 1 \quad \forall\, l \tag{2.39}$$

$$V_k z_k \leq \sum_{il} D_{il} y_{kl} \leq V'_k z_k \quad \forall\, k \tag{2.40}$$

"Restrições lineares adicionais" usando y e/ou z. (2.41)

A equação 2.36 representa a função objetivo do modelo, e visa minimizar os custos totais do sistema. A restrição 2.37 limita a quantidade de produtos i produzidos, de acordo com a capacidade da fábrica j. Já a expressão 2.38 representa a obrigatoriedade de atendimento integral da demanda de todos os clientes. A equação 2.39 define que cada cliente deve ser atendido por somente 1 CD e a restrição 2.40 define o limite superior e inferior de movimentação de carga no CD somente quando o CD estiver ativo.

A equação 2.41 foi propositalmente não detalhada no artigo visando explorar a potencial abrangência que um modelo genérico de localização de instalações pode ter, proporcionando uma alta flexibilidade para inclusão de diversas complexidades encontradas em aplicações reais.

Os autores citam diversas dessas possibilidades de restrições que podem ser incluídas (frisando somente que precisam ser restrições lineares, dependentes de y e/ou z e não envolver nenhuma variável x), por exemplo:

- limite superior e inferior para número de CDs abertos;
- relações de precedência entre CDs (A não pode ser aberto a não ser que B seja aberto);
- maior detalhamento da capacidade de movimentação (exemplo: capacidade por produto, caso apresentem características físicas distintas);
- nível de serviço para atendimento ao cliente (exemplo: $\sum_{kl} t_{ikl} D_{il} y_{kl} / \sum_t D_{il} \leq T_i$, onde t_{ikl} é o tempo médio de entrega do produto i ao cliente j a partir do CD k, e T_i é o tempo limite de entrega).

Essa flexibilidade modular de incluir e/ou detalhar restrições que são aplicáveis a situações que as empresas enfrentam diariamente é uma característica desejável para a proposição do modelo matemático almejado por este trabalho.

2.3.4. Modelo de localização multicamadas

Barros, Dekker e Scholten (1998) desenvolveram um modelo de localização multicamadas no campo da logística reversa para resolver o seguinte problema de reciclarem de resíduos de construção civil: dadas as potenciais localizações de depósitos regionais e instalações de tratamento, as capacidades dessas instalações, as estruturas de custos (transporte, processamento e custos fixos), a localização das fontes de areia peneirada, dos locais para projetos e as respectivas disponibilidades e demandas de areia, descobrir que tipo de instalação deve ser construída, como a areia deve ser classificada, armazenada, limpa e entregue aos locais de projetos de modo que os custos totais do sistema sejam mínimos. A situação foi formulada da seguinte maneira:

Sendo:

m = número de fontes de areia peneirada;

n = número de locais potenciais para armazéns;

p = número de locais potenciais para estações de tratamento;

q = número de locais com projetos com demanda;

t_s = % da areia tipo s, onde $s = 1$ é limpa, $s = 2$ parcialmente limpa, e $s = 3$ é poluída;

o_i = fornecimento de areia na instalação de classificação i;

d_{ls} = demanda da areia tipo $s = 1, 2$ no projeto l;

a_{ij} = soma dos custos de transporte de areia peneirada entre estação de classificação i e armazém regional j e custos de processamento, por tonelada, neste depósito;

b_{jk} = soma dos custos de transporte da areia peneirada entre o depósito regional j e a estação de tratamento k e os custos de processamento por tonelada nesta estação de tratamento;

c_{kl} = custos de transporte (por ton) de areia limpa entre estação de tratamento k e projeto g;

e_{jls} = custos de transporte (por ton) da areia tipo $s = 1, 2$ entre armazém regional j e projeto l;

f_j = custo fixo de abertura do armazém regional j;

H_j = capacidade máxima de armazenagem no armazém regional j;

g_k = custo fixo de abertura da estação de tratamento k;

R_k = capacidade máxima de processamento da estação de tratamento k;

u_{ij} = quantidade de areia peneirada enviada da estação de classificação i até armazém j;

v_{jk} = quantidade de areia poluída enviada do armazém j para estação de tratamento k;

w_{kl} = quantidade de areia limpa enviada da estação de tratamento k para o projeto l;

x_{jls} = quantidade de areia tipo s = 1,2 enviada do armazém regional j para o projeto l;

$$y_j = \begin{cases} 1 & se\ um\ depósito\ regional\ j\ é\ aberto \\ 0 & Caso\ contrário \end{cases};$$

$$z_k = \begin{cases} 1 & se\ a\ estação\ de\ tratamento\ k\ é\ aberta \\ 0 & Caso\ contrário \end{cases};$$

Tem-se então:

$$Min: \sum_{j=1}^{n} f_i y_i + \sum_{k=1}^{p} g_k z_k + \sum_{i=1}^{m}\sum_{j=1}^{n} a_{ij} u_{ij} + \sum_{j=1}^{n}\sum_{k=1}^{p} b_{jk} v_{jk} + \sum_{k=1}^{p}\sum_{l=1}^{q} c_{kl} w_{kl} + \sum_{j=1}^{n}\sum_{l=1}^{q}\sum_{s=1}^{2} e_{jls} x_{jls} \quad (2.42)$$

Sujeito a:

$$\sum_{j=1}^{n} u_{ij} = o_i, \quad i = 1, \dots, m; \quad (2.43)$$

$$\sum_{j=1}^{n} x_{jl1} + \sum_{k=1}^{p} w_{kl} = d_{l2}, \quad l = 1, \dots, q; \quad (2.44)$$

$$\sum_{j=1}^{n} x_{jl2} = d_{l2}, \quad l = 1, \dots, q; \quad (2.45)$$

$$\sum_{k=1}^{p} v_{jk} = t_3 \sum_{i=1}^{m} u_{ij}, \quad j = 1, \dots, n; \tag{2.46}$$

$$\sum_{l=1}^{q} x_{jls} \leq t_s \sum_{i=1}^{m} u_{ij}, \quad j = 1, \dots, n, \quad s = 1, 2; \tag{2.47}$$

$$\sum_{l=1}^{q} w_{kl} \leq \sum_{j=1}^{n} v_{jk}, \quad k = 1, \dots, p; \tag{2.48}$$

$$(1 - t_3) \sum_{i=1}^{m} u_{ij} \leq H_j y_j, \quad j = 1, \dots, n; \tag{2.49}$$

$$\sum_{j=1}^{n} v_{jk} \leq R_k z_k, \quad k = 1, \dots, p; \tag{2.50}$$

$$y_j, z_k \in \{0, 1\}, \quad j = 1, \dots, n, k = 1, \dots, p; \tag{2.51}$$

$$u_{ij}, v_{jk}, w_{kl}, x_{jls} \geq 0, \quad i = 1, \dots, m, j = 1, \dots, n, k = 1, \dots, p, l = 1, \dots, q, s = 1, 2; \tag{2.52}$$

A equação 2.42 representa a função objetivo do modelo, que visa minimizar os custos totais do sistema. Os primeiros dois termos da função objetivo calculam os custos fixos totais incorridos na operação, enquanto o terceiro e quarto termos calculam respectivamente os custos de transporte para depósitos regionais e para as estações de tratamentos e os custos de processamento incorridos em cada local. Finalmente, o quinto e sexto termo correspondem aos custos de transporte remanescentes.

A expressão 2.43 representa o montante de areia peneirada expedida pelas estações de classificação e as expressões 2.44 e 2.45 são referentes as restrições de satisfação integral da demanda de todos os projetos. A equação 2.46 garante que toda de areia poluída, enviada para os depósitos regionais, seja direcionada posteriormente para estações de tratamento. As equações 2.47 e 2.48 representam os balanços de massa nas instalações (somatória das entradas menos somatória das saídas = somatório dos estoques). As equações 2.49 e 2.50 garantem respectivamente que os limites de capacidade de armazenagem e processamento das instalações não sejam excedidos. Por fim, 2.51 e 2.52 representam as restrições sobre a natureza das variáveis.

Os autores ainda propõem a seguinte adaptação no modelo para possibilitar a abrangência de restrições de estoque e/ou processamento mínimo associados a abertura de novas instalações:

$$(1 - t_3) \sum_{i=1}^{m} u_{ij} \geq h_j y_j \,, \quad j = 1, \dots, n; \tag{2.53}$$

$$\sum_{j=1}^{n} v_{jk} \geq r_k z_k \,, \quad k = 1, \dots, p; \tag{2.54}$$

Onde:

h_j = capacidade mínima de armazenagem no armazém regional j;

r_k = capacidade mínima de processamento da estação de tratamento k.

A equação 2.53 representa a restrição de processamento mínimo da instalação e 2.54 a restrição de capacidade mínima de processamento.

Nesse contexto, cada tipo de instalação cliente ou fornecedora de outra instalação é considerado uma “camada” do modelo matemático. Fontes de areia podendo fornecer para armazéns, que por sua vez podem fornecer para estações de tratamento que, por fim, poderiam atender os projetos com demanda, ou seja, um modelo matemático de quatro camadas.

2.4. Considerações adicionais em modelos de localização e desenho da cadeia

Os modelos apresentados até o momento possuíam as seguintes características apresentadas na Tabela 2.1 apresentada a seguir:

Tabela 2.1 - Características básicas dos modelos apresentados

	# Camadas	# Camadas com decisão	# produtos	# períodos
Melkote e Daskin (2001b)	1	1	1	1
Erlenkotter (1981)	1	1	1	>1
Geoffrion e Graves (1974)	1	1	>1	1
Barros, Dekker e Scholten (1998)	>1	>1	>1	1

Fonte: Elaboração do autor

Durante a apresentação que cada autor fez dos modelos apresentados anteriormente, foi possível notar que, apesar de plenamente aplicáveis a situações reais, tais modelos ainda não captam diversos aspectos que impactam o planejamento das empresas. A presente seção aproveita os exemplos de modelagem vistos até o momento e os

incrementa com decisões típicas de uma cadeia de suprimentos, tal como apresentados na Tabela 2.2, adaptada de Melo, Nickel e Saldanha-da-Gama (2009):

Tabela 2.2 - Aspectos de gerenciamento da cadeia de suprimentos inclusos nos modelos.

Item	Decisão / Característica	Modelos		
		Jayaraman, Guide e Srivastava (1999)	Cordeau, Pasin e Solomon (2006)	Melachrinoudis e Min (2000)
Decisões	Capacidade			X
	Estoque	X		
	Compras		X	
	Produção	X	X	
	Modais de transporte		X	
Aspectos financeiros	Incentivos fiscais/tributários			X
	Restrições de orçamento			X
Outros	Redesenho da cadeia			X
	Lista de materiais		X	

Fonte: Adaptada de Melo, Nickel e Saldanha-da-Gama (2009)

2.4.1. Modelo de Jayaraman, Guide e Srivastava (1999)

Ambientes de recolhimento, coleta, recuperação de produtos estão crescendo em importância à medida que as indústrias aumentam a consciência ambiental de suas ações. Esse sistema inclui estratégias que aumentam a vida do produto, tais como reparos, remanufatura e reciclagem e o fluxo dos materiais e produtos nesse ambiente. Isso acontece tanto da empresa responsável pela remanufatura para os clientes, quanto de clientes para o remanufaturador (fluxo reverso). Dado que a maioria dos produtos são conservados ao longo do tempo, o sistema acaba funcionando como um circuito fechado. Esse modelo de programação inteira mista resolve simultaneamente a localização de instalações de remanufatura e instalações de distribuição, transbordo, produção e estoque das quantidades ótimas de produtos a serem reparados e do produto já remanufaturado. A formulação do problema proposta pelos autores foi a seguinte:

Sendo:

I = Conjunto de produtos que precisam ser remanufaturados;

J = Conjunto de locais potenciais para instalação de distribuição;

K = Conjunto de clientes que demandam produtos remanufaturados;

V = Conjunto de locais de coleta de núcleos;

F_j = Custo fixo de operar no local j;

WR_j = Capacidade de armazenagem de produtos remanufaturados na instalação j;

WU_j = Capacidade de armazenagem de núcleos na instalação j;

S_v = Espaço disponível na zona de coleta v;

d_{jk} = Previsão de demanda da zona de clientes k, para produtos remanufaturados i;

CI_{ijv} = Custo unitário de transporte do núcleo i, da zona de coleta v para a instalação j;

CO_{ijk} = Custo unitário de atender cliente k, com produtos remanufaturados i a partir de j;

CR_{ij} = Custo unitário de remanufatura do núcleo i, na instalação j;

CU_{iv} = Custo unitário do núcleo i, em função da zona de clientes v;

h = Custo de carregamento de estoque;

R_i = Espaço unitário ocupado por produtos remanufaturados i;

U_j = Espaço unitário ocupado por núcleos j.

M_{ijv} = Quantidade de núcleos i, enviados da zona de coleta v, para a instalação j;

Q_{ijk} = Quantidade de produtos remanufaturados i, distribuídos a partir de j, para clientes k;

P = Número máximo de instalações que podem ser abertas;

$$z_j = \begin{cases} 1 & se\ a\ instalação\ é\ aberta\ no\ local\ j \\ 0 & Caso\ contrário \end{cases}$$

Tem-se então:

$$Min: \sum_{ijv} CU_{iv}M_{ijv} + \sum_{ijv} CI_{ijv}M_{ijv} + \sum_{ijk} CR_{ij}Q_{ijk} + \sum_{ijk} CO_{ijk}Q_{ijk} + \sum_{ijv} h\left(\frac{CU_{iv}}{2}\right)M_{ijv} + \sum_{ijk} h\left(\frac{CU_{ij}}{2}\right)Q_{ijk} + \sum_{j} F_jZ_j \quad (2.55)$$

Sujeito a:

$$\sum_j Q_{ijk} \leq d_{ik} \quad \forall\, i,k \quad (2.56)$$

$$\sum_k Q_{ijk} \leq \sum_v M_{ijv} \quad \forall\, i,j \quad (2.57)$$

$$\sum_{ik} R_iQ_{ijk} \leq WR_iZ_i \quad \forall\, j \quad (2.58)$$

$$\sum_{iv} R_iM_{ijv} \leq WU_jZ_j \quad \forall\, j \quad (2.59)$$

$$\sum_j Z_j \leq P \quad (2.60)$$

$$\sum_{ij} U_iM_{ijv} \leq S_v \quad \forall\, v \quad (2.61)$$

$$M_{ivj}, M_{ivj} \geq 0 \quad \forall\, i,j,k,v \quad (2.62)$$

$$Z_j \in \{0,1\} \quad \forall\, j \quad (2.63)$$

A equação 2.55 representa a função objetivo do modelo, que visa minimizar os custos totais do sistema. Ela é composta por sete termos, que representam respectivamente os custos de adquirir o produto que necessita reparo, transportar até a estação de remanufatura, reparar, vender para o cliente; além do custo financeiro de carregamento de estoque dos produtos antes e depois do reparo e, por fim, o custo fixo de operar as unidades ativas.

A restrição 2.56 garante que o número de unidades produzidas não ultrapasse a demanda total por cliente. Já a expressão 2.57 garante que a quantidade remanufaturada de produtos de qualquer instalação seja menor ou igual a quantidade de produtos que foram recebidos pela instalação, de modo que a quantidade de produtos remanufaturados não ultrapasse a quantidade de produtos defeituosos que foram fornecidos por determinada zona de coleta. As expressões 2.58 e 2.59 representam as restrições de capacidade de armazenagem de produtos reparados e que ainda precisam de reparo. A equação 2.60 limita o número de instalações que

podem ser abertas e 2.61 restringe o número de produtos que podem ser podem ser fornecidos por uma zona de coleta, de acordo com a disponibilidade deles em cada instalação. As equações 2.62 e 2.63 representam as restrições de não negatividade das variáveis de decisão e a natureza binária da variável z_j, de abertura ou não de uma instalação.

2.4.2. Modelo de Cordeau, Pasin e Solomon (2006)

A fim de resolver o problema de configuração da cadeia de uma empresa de manufatura o trabalho utilizou uma formulação flexível que otimiza diversas decisões. Primeiramente, decisões estratégicas, referentes a localização, capacidade e tecnologia das fábricas e armazéns, em seguida, decisões táticas, como seleção de fornecedores, portfólio de produtos, canais de venda e modos de transporte. Por fim, decisões operacionais, tais como fluxo de matérias primas, produtos acabados e semiacabados. Para tal tarefa, os autores propõem a seguinte abordagem:

Sendo:

C = Conjunto de clientes;

C^f = Conjunto de clientes que requerem o produto f;

D = Conjunto de destinos;

D^k = Conjunto de destinos potenciais para o produto k;

F = Conjunto de produtos acabados;

F^r = Conjunto de produtos acabados que requerem material prima r;

K = Conjunto de produtos acabados;

M_{od} = Conjunto de modos de transporte entre o e d;

M_{od}^k = Conjunto de modos entre o e d para o produto k;

O = Conjunto de origens;

O^k = Conjunto de origens potenciais para produto k;

P = Conjunto de locais potenciais para instalações;

P^f = Conjunto de potenciais instalações que podem produzir o produto f;

R = Conjunto de matérias primas;

S = Conjunto de fornecedores potenciais;

S^r = Conjunto de fornecedores potenciais da matéria prima r;

W = Conjunto de armazéns potenciais;

W^f = Conjunto de armazéns potenciais que armazenam produto f;

a_c^f = Demanda do cliente c, pelo produto f;

b^{rf} = Quantidade de matéria prima r no produto f;

c_o = Custo fixo de selecionar a origem o;

c_o^k = Custo fixo de designar o produto k à origem o;

c_{od}^k = Custo fixo de entregar o produto k, no destino d, a partir da origem o;

c_{od}^m = Custo fixo de usar o modo de transporte m entre o e d;

c_{od}^{km} = Custo unitário de entregar o produto k em d a partir de o com o modo m;

g_{od}^m = Capacidade do modo m entre o e d;

g^{km} = Capacidade requerida para transporte de uma unidade do produto k no modo m;

Tem-se então:

q_o^k = Limite superior de quantos produtos k podem ser enviados a partir da origem o;

q_{od}^k = Limite superior de quantos produtos k podem ser enviados de o para d;

u_o = Capacidade (em unidades) da origem o;

u_o^k = Capacidade requerida para uma unidade do produto k na origem o;

X_{od}^{km} = Quantidade do produto k fornecido por o para d usando o modo m;

U_o = 1 se origem o é selecionada;

V_o^k = 1 se produto k é designado à origem o;

Y_{od}^k = 1 se origem o fornece o produto k para destino d;

Z_{od}^m = 1 se o modo m é selecionado entre o e d.

B = Conjunto de números inteiros compostos somente por $\{0; 1\}$.

$$Min \quad \sum_{o\in O}[C_O U_o + \sum_{d\in D}\sum_{m\in Mod} c_{od}^m Z_{od}^m] + \sum_{k\in K}\sum_{o\in O^k}\Big[c_o^k V_o^k + \sum_{d\in D^k}\Big[c_{od}^k Y_{od}^k + \sum_{m\in M_{od}^k} c_{od}^{km} X_{od}^{km}\Big]\Big] \tag{2.64}$$

Sujeito a:

$$\sum_{s\in S^r}\sum_{m\in M_{sp}^r} X_{sp}^{rm} - \sum_{f\in F^r}\sum_{w\in W^f}\sum_{m\in M_{pw}^f} b^{rf} X_{pc}^{fm} = 0 \quad \forall\, r \in R;\ p \in P \tag{2.65}$$

$$\sum_{p\in P^f}\sum_{m\in M_{pw}^f} X_{pw}^{fm} - \sum_{c\in C^f}\sum_{m\in M_{wc}^f} X_{wc}^{fm} = 0 \quad \forall\, f \in F;\ w \in W^f \tag{2.66}$$

$$\sum_{w\in W^f}\sum_{m\in M_{wc}^f} X_{wc}^{fm} = a_c^f \quad \forall\, f \in F;\ c \in C^f \tag{2.67}$$

$$\sum_{k\in K}\sum_{d\in D^k}\sum_{m\in M_{od}^k} u_o^k X_{od}^{km} - u_o U_o \le 0 \quad \forall\, o \in O \tag{2.68}$$

$$\sum_{d\in D^k}\sum_{m\in M_{od}^k} X_{od}^{km} - q_o^k V_o^k \le 0 \quad \forall\, k \in K; o \in O^k \tag{2.69}$$

$$\sum_{m\in M_{od}^k} X_{od}^{km} - q_{od}^k V_{od}^k \le 0 \quad \forall\, k \in K; o \in O^k; d \in D^k \tag{2.70}$$

$$\sum_{k\in K} g^{km} X_{od}^{km} - g_{od}^m Z_{od}^m \le 0 \quad \forall\, o \in O; d \in D; m \in M_{od} \tag{2.71}$$

$$X_{od}^{km} \ge 0 \quad \forall\, k \in K; o \in O^k; d \in D^k; m \in M_{od} \tag{2.72}$$

$$U_o \in B \quad \forall\, o \in O \tag{2.73}$$

$$V_o^k \in B \quad \forall\, k \in K; o \in O^k \tag{2.74}$$

$$V_{od}^k \in B \quad \forall\, k \in K; o \in O^k; d \in D^k \tag{2.75}$$

$$Z_{od}^m \in B \quad \forall\, o \in O; d \in D; m \in M_{od} \tag{2.76}$$

A equação 2.64 representa a função objetivo do modelo, e visa minimizar os custos totais do sistema. Ela está dividida em cinco termos, respectivamente custos fixos de operar a unidade, de usar determinado modo de transporte, de instalar a tecnologia para produção para determinado produto em determinada unidade, de entregar o produto de uma instalação ao cliente (destino) e, por fim, o custo unitário de transporte

de um produto de uma origem à um destino utilizando-se determinado modo de transporte.

A restrição 2.65 garante que o total de matéria-prima r enviado para a planta p é igual ao total de requerimentos da planta. A expressão 2.66 representa o balanço de massa nos armazéns e a restrição de atendimento integral da demanda é representada pela equação 2.67. As restrições 2.68 e 2.69 referem-se à limitação de capacidade sendo 2.68 a restrição de capacidade dos fornecedores, fábricas e armazéns e 2.69 a restrição específica para os produtos.

A restrição 2.70 assegura que o produto k não seja transportado de o para d a menos que a origem o seja selecionada para fornecer a mercadoria ao destino d. Já a capacidade de cada modo de transporte é imposta pela restrição 2.71.

A expressão 2.72 representa a natureza positiva da variável X_{od}^{km} e, por fim, 2.73 até 2.76 representam a natureza binária das variáveis.

2.4.3. Modelo de Melachrinoudis e Min (2000)

Decisões de realocação e término gradativo das operações (*phase out)* são necessárias para adaptar as empresas de modo dinâmico às mudanças que ocorrem no ambiente de negócios que cercam a respectivas cadeias de suprimentos. Algumas das mudanças que podem ser enfrentadas incluem mudanças nas bases de clientes e fornecedores, redes de distribuição, clima de negócios (crise, prosperidade), reengenharia corporativa, legislação governamental etc.

O modelo proposto por Melachrinoudis e Min (2000) é oriundo de um estudo de caso realizado em uma empresa que precisou realocar suas fábricas e armazéns (considerando *phase out*). Para auxiliar a gerência da empresa em questão a formular estratégias mais efetivas de realocação. Foi necessária a construção de um modelo matemático inteiro-misto, dinâmico, multiperíodos e multi-objetivo, que incluísse decisões de localização em múltiplas camadas na cadeia com tempos distintos de concretização da realocação e *phase out* das instalações envolvidas. A formulação do modelo multi-objetivo proposto pelos autores foi:

Sendo:

i = índice de instalações (plantas / armazéns) (i = 1, 2, …, I-1 para instalações recém realocadas, $(i = I)$ para instalações existentes);

j = índice de clientes (j = 1, ..., J);

k = índice de fornecedores ou portos de importação (k = 1, 2, ..., K);

m = índice de infraestrutura de transportes (rodovias, terminais) (m = 1, 2, ..., M);

t = índice de períodos de tempo (t = 1, 2, ..., T);

a_{ij} = média de tempo de deslocamento (minutos) entre instalação i e cliente j;

a_{ik} = média de tempo de deslocamento da instalação i e fornecedor (ou porto) k;

a_{im} = média de tempo de deslocamento entre instalação i e a infraestrutura de transporte m;

D_{tij} = demanda do cliente j no período t dado que a instalação i está aberta (i = 1, 2, ..., $I - 1$). Para $i = I$, D_{tIj} representa a demanda do cliente j no período t antes de uma instalação nova realocada estar aberta.

R_{ti} = valor presente da unidade de receita gerada por uma instalação i no período t;

L_{ti} = incentivos locais (em notas de 0 a 100) disponíveis para uma instalação i no período t;

Q = capacidade de produção da instalação em termos de número de unidade fabricadas;

u_{ti} = fração superior da capacidade de produção que pode ser realocada para uma instalação i, no período de transição t. (Obs: Durante o período não transicional, $u_{ti} = 1.0$);

b_t = limite de orçamento para operação e manutenção de uma instalação no período t;

s_{tij} = custo unitário de transporte da instalação i para o cliente j no período t descontado no início do horizonte de tempo;

c_{ti} = custo variável unitário de produção da instalação i, no período t, descontado no início do horizonte de tempo;

w_{ti} = custo variável unitário de armazenagem na instalação i, no período t, descontado no início do horizonte de tempo;

r_{ti} = custo unitário de realocação de capacidade de produção de uma instalação existente para uma instalação i, no período t, descontado no início do horizonte de tempo;

f_{ti} = custo fixo de setup por alocar uma nova instalação i, no período t, ou o custo unitário de fechar a instalação existente $(i = I)$ no período $t$descontado no início do horizonte de tempo;

x_{ti} = quantidade produzida pela instalação i, no período t;

y_{tij} = número de produtos expedidos da instalação i para o cliente j, no período t;

π_{Iti} = capacidade de produção transferida da instalação existente para a instalação i, no período t.

$$z_i^t = \begin{cases} 1 & se\ uma\ instalação\ é\ aberta\ no\ início\ do\ período\ t\ no\ local\ i = 1, \dots, I-1; \\ 0 & Caso\ contrário \end{cases}$$

$$z_I^t = \begin{cases} 1 & se\ uma\ instalação\ é\ fechada\ no\ inicio\ do\ período\ t; \\ 0 & Caso\ contrário \end{cases}$$

Tem-se então:

$$Max \quad [TP(X,Y,Z,\pi), -AC(Z), LI(Z)] \tag{2.77}$$

$$TP(X,Y,Z,\pi) = \sum_{tij}\left(R_i^t - S_{ij}^t\right)y_{ij}^t - \sum_{ti}(c_i^t w_i^t)x_i^t - \sum_{ti} F_i^t z_i^t - \sum_{i=1}^{I-1}\sum_t r_i^t \pi_i^t \qquad \text{A}$$

$$AC(Z) = \sum_i^{I-1}\left(\sum_j a_{ij} + \sum_k a_{ik} + \sum_m a_{im}\right)\left(\sum_{t=1}^T z_i^t\right) \qquad \text{B}$$

$$LI(Z) = \sum_t \sum_{i=1}^{I-1} L_i^t \sum_{\tau=1}^t z_i^\tau + \sum_t L_I^t \left(1 - \sum_{i=1}^{I-1}\sum_{\tau=1}^t z_i^\tau\right) \qquad \text{C}$$

Sujeito a:

$$\pi_i^t \leq u_i^t Q \sum_{\tau=1}^{t} z_i^\tau, \quad i = 1, 2, \dots, I-1; \ \forall\, t \tag{2.78}$$

$$\pi_i^t \leq u_i^t Q \sum_{\tau=1}^{T} z_I^\tau, \quad i = 1, 2, \dots, I-1; \ \forall\, t \tag{2.79}$$

$$\pi_i^t \leq \sum_{\tau=1}^{t} \pi_i^\tau, \quad i = 1, 2, \dots, I-1; \ \forall\, t \tag{2.80}$$

$$x_I^t = Q - \sum_{i=1}^{I-1} \sum_{\tau=1}^{t} \pi_i^\tau, \quad \forall\, t \tag{2.81}$$

$$x_i^t = \sum_j y_{ij}^t, \quad \forall\, i, t \tag{2.82}$$

$$\sum_i y_{ij}^t = \sum_{i=1}^{I-1} D_{ij}^t \sum_{\tau=1}^{t} z_i^\tau + D_{Ij}^t \left(1 - \sum_{\tau=1}^{t} \sum_{i=1}^{I-1} z_i^\tau\right), \quad \forall\, j, t \tag{2.83}$$

$$\sum_i (c_i^t + w_i^t) x_i^t + \sum_{ij} S_{ij}^t y_{ij}^t + \sum_{i=1}^{I-1} r_i^t \pi_i^t \leq B^t \quad \forall\, t \tag{2.84}$$

$$\sum_t z_I^t = 1 \tag{2.85}$$

$$\sum_{i=1}^{I-1} \sum_t z_i^t = 1 \tag{2.86}$$

$$x_i^t \geq 0 \quad \forall\, i, t \tag{2.87}$$

$$y_{ij}^t \geq 0 \quad \forall\, i, j, t \tag{2.88}$$

$$\pi_i^t \geq 0 \quad i = 1, 2, \dots, I-1, \forall\, t \tag{2.89}$$

$$z_i^t \in (0, 1) \quad \forall\, i, t \tag{2.90}$$

A função objetivo do modelo é representada pela equação 2.77 e visa maximizar três termos: **A**: Lucro (receita – custo) do sistema; **B**: Proximidade das novas instalações a seus cliente, fornecedores e terminais; e **C**: incentivos locais disponíveis para abrir uma instalação no horizonte de tempo disponível.

A expressão 2.78 representa a restrição da capacidade de produção a ser realocada para o local i no período t. A exigência de que a instalação esteja aberta no período t para que a realocação possa ocorrer é garantida pela equação 2.79. Já 2.80 garante que capacidade suficiente seja transferida para o novo local no período t para manter os níveis de produção desejados e a expressão 2.81 garante que o número de unidades produzidas nas instalações existentes em um período t não exceda a capacidade residual da instalação.

A expressão 2.82 representa o balanço de massa em cada instalação e a restrição 2.83 representa a obrigatoriedade de atendimento da demanda integral dos clientes. Os custos da operação são limitados ao orçamento planejado pela restrição 2.84 e a expressão 2.85 exige que a instalação existente deva fechar em algum período dentro do horizonte de planejamento. A exigência de que algum local candidato seja escolhido para abrir é garantida pela expressão 2.86 (porém, somente após atendimento de 2.85).

Por fim, as expressões 2.87, 2.88 e 2.89 restringem as variáveis somente a valores positivos e 2.90 determina z_i^t ser uma variável binária.

2.5. Considerações sobre mercado brasileiro – Modelo de Hamad (2014)

O trabalho de trabalho Hamad (2014) analisa o impacto do Imposto sobre Circulação de Mercadorias e Serviços (ICMS) e do Imposto de Importação (II), assim como a influência dos estoques operacionais e de segurança na solução de problemas de localização em âmbito global, envolvendo vários elos da cadeia de suprimentos. Foi utilizado um modelo de programação linear inteira mista visando minimizar os custos operacionais, levando em conta os créditos referentes ao ICMS, o custo de estoque total da cadeia e o melhor aproveitamento do benefício fiscal *drawback* (as empresas que exportam podem eliminar ou suspender os tributos incidentes sobre os insumos importados, desde que seja comprovada a utilização dessas matérias primas em produtos que estão sendo vendidos ao exterior).

ICMS é a sigla que identifica o Imposto sobre Operações relativas à Circulação de Mercadorias e sobre Prestações de Serviços de Transporte Interestadual e Intermunicipal e de Comunicação. É um imposto que cada um dos Estados e o Distrito Federal podem instituir, como determina a Constituição Federal de 1988. É um imposto não cumulativo, compensando-se o valor devido em cada operação ou prestação com o montante cobrado anteriormente. Em cada etapa da circulação de mercadorias e em toda prestação de serviço sujeita ao ICMS deve haver emissão da nota fiscal ou cupom fiscal. Esses documentos serão escriturados nos livros fiscais para que o imposto possa ser calculado pelo contribuinte e arrecadado pelo Estado. (SECRETARIA DA FAZENDA, 2017)

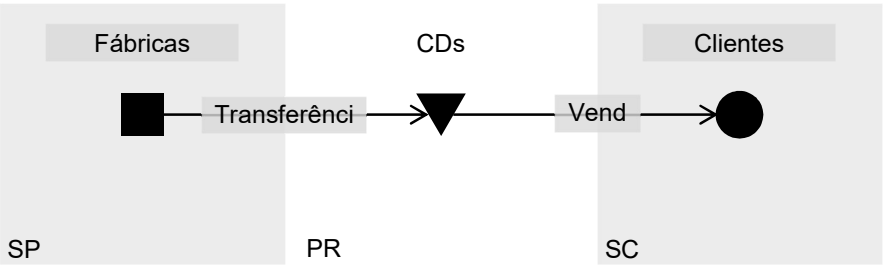
Hamad (2014) resume os artigos 153 e 155 da Constituição Brasileira citando as seguintes características sobre este imposto:

- é seletivo: as alíquotas podem variar conforme os produtos ou serviços;
- é não-cumulativo: é calculado sobre a agregação de valor. Em cada estágio do processo o valor devido em estágios anteriores é deduzido do valor devido do estágio em questão;
- é indireto: o fator gerador é uma situação momentânea e pode ser transferido ao longo da cadeia comercial;
- é proporcional: é calculado com base na aplicação de uma proporção constante sobre o valor a ser tributado.

2.5.1. Exemplificação do cálculo do ICMS

Para exemplificar o cálculo do ICMS, Pantalena (2004) expõe a seguinte situação problema, ilustrado na figura 2.2 apresentada a seguir:

Figura 2.2 – Exemplo 1 de cálculo de ICMS



Fonte: Adaptado de Pantalena (2004)

Uma indústria localizada no estado de São Paulo abastece um centro de distribuição localizado no estado do Paraná. A partir desse CD, a empresa atenderá um cliente localizado em Santa Catarina.

Sendo:

- a alíquota de ICMS de São Paulo para o Paraná: 12%;
- a alíquota de ICMS do Paraná para Santa Catarina: 12%;

- quantidade movimentada de mercadorias: 10 toneladas;
- valor de transferência: R$100,00 por tonelada (valor da Nota Fiscal de transferência);
- preço de venda: R$ 150,00 por tonelada (valor da Nota Fiscal de venda);
- crédito anterior formado na compra de matérias primas: R$ 100,00 por tonelada.

O balanço na conta de ICMS pode ser calculado da seguinte forma:

Operação de transferência entre fábrica (SP) e CD (PR):

Crédito	R$ 100 (proveniente de operações anteriores)	R$ 100
Débito	R$ 100 x 10 ton x 12%	R$ 120
Balanço	R$ 120 – R$ 100	R$ 20

Operação de venda entre CD (PR) e cliente (SC):

Crédito	R$ 120 (proveniente da operação de transferência)	R$ 120
Débito	R$ 150 / ton * 10 ton x 12%	R$ 180
Balanço	R$ 180 – R$ 120	R$ 60

- total a ser pago na operação de transferência de SP para PR: R$ 20 (R$ 120 - R$ 100)
- total a ser pago na operação de venda do PR para SC: R$ 60 (R$ 180 - R$ 120)
- total a ser pago pela indústria: R$ 80 (R$ 20 + R$ 60)

Hamad (2014) ainda explica que como o valor do ICMS é embutido na Nota Fiscal de venda e repassado ao cliente, geralmente não existe impacto para a empresa no saldo de ICMS, porém dependendo da localização do Estado fornecedor da matéria prima,

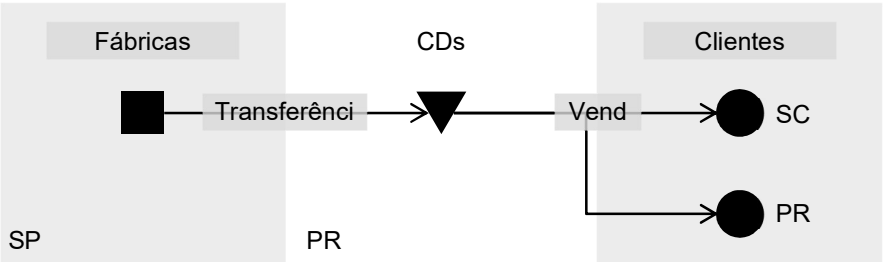
do CD intermediário e do cliente recebedor do produto final, pode ocorrer o pagamento não necessário de impostos ou mau aproveitamento dos créditos gerados. A situação ótima é repassar os valores de ICMS devidos ao governo para o cliente final, porém, quando isso não é possível, o desafio é balancear a compra de insumos e a distribuição dos produtos acabados, de forma que os créditos não se tornem “mortos” e, consequentemente, não tenham que ser reconhecidos como despesas. Por ser um imposto de âmbito estadual, o balanço entre os débitos e créditos deve ser realizado em cada um dos Estados onde houve alguma operação, quer seja compra de matérias primas, transferência e/ou venda de produto acabado.

2.5.2. Incentivos e reduções na tributação

Hamad (2014) cita a característica seletiva do ICMS, dizendo que as alíquotas podem variar conforme os produtos ou serviços. Para alguns produtos ou serviços, determinados órgãos governamentais, tais como o CONFAZ (Conselho Nacional de Política Fazendária) podem estabelecer algumas alíquotas especiais de ICMS, regulamentadas a partir de convênios. Tais alíquotas especiais podem reduzir a base de cálculo do imposto e até mesmo isentar a necessidade de pagamento do mesmo. Essa prática de estabelecer isenções e diferimentos nas alíquotas de impostos também ocorre em outros impostos, tais como o Imposto de Importação, no qual o próprio Ministério da Indústria, Comércio Exterior e Serviços publica a LETEC, uma lista de exceções à tarifa externa comum (imposto de importação).

Para exemplificar o cálculo em uma situação na qual ocorre a redução da base de cálculo de ICMS, Pantalena (2004) expõe a seguinte situação problema, ilustrado na Figura 2.3 a seguir:

Figura 2.3 – Exemplo 2 de cálculo de ICMS



Fonte: Adaptado de Pantalena (2004)

Uma indústria localizada no estado de São Paulo abastece um centro de distribuição localizado no estado do Paraná. A partir desse CD, a empresa atenderá um cliente localizado em Santa Catarina e outro no próprio Estado do Paraná. Sendo:

- redução na base de cálculo de ICMS para o produto em questão:
    - operações interestaduais: 60%;
    - operações dentro do estado: 100%;
- demanda do cliente em SC: 6,67 toneladas de produto;
- demanda do cliente no PR: 3,33 toneladas de produto;
- a alíquota de ICMS de São Paulo para o Paraná: 12% * (100% - 60%) = 4,8%;
- a alíquota de ICMS do Paraná para Santa Catarina: 12% * (100% - 60%) = 4,8%;
- a alíquota de ICMS para consumo local no Paraná: 12% * (100% - 100%) = 0%;
- valor de transferência: R$100,00 por tonelada (valor da Nota Fiscal de transferência);
- preço de venda: R$ 150,00 por tonelada (valor da Nota Fiscal de venda);
- crédito anterior formado na compra de matérias primas: R$ 100,00 * 4,8% = R$ 4,8/ton.

O balanço na conta de ICMS pode ser calculado da seguinte forma:

operação de transferência entre fábrica (SP) e CD (PR):

Crédito	R$ 4,8 / ton * 10 ton (das compras de matéria prima)	R$ 48
Débito	R$ 10 / ton * 10 ton x 12% * 40%	R$ 48
Balanço	R$ 48 – R$ 48	R$ 0

operação de venda a partir do CD (PR):

Crédito Transferência SP-PR	R$ 4,8 / ton * 10 ton (das operações anteriores)	R$ 48
Débito Venda PR-SC	R$ 15 / ton x 6,67 ton x 12% * 40%	R$ 48
Débito Venda PR-PR	R$ 15 / ton x 3,33 ton x 0%	R$ 0
Balanço	R$ 48 – R$ 48	R$ 0

- total a ser pago na operação de transferência de SP para PR: R$ 0 (R$ 48 - R$ 48)
- total a ser pago na operação de venda a partir do CD-PR: R$ 0 (R$ 48 - R$ 48 - R$ 0)
- total a ser pago pela indústria: R$ 0 (R$ 0 + R$ 0)

Esta situação de equilíbrio nos créditos e débitos gerados na transferência é a situação ótima em relação aos custos de ICMS, pois não geram créditos (que são inutilizáveis) e não exigem pagamentos ou repasses dos débitos para os clientes.

Dada a relevância do balanço de ICMS e imposto de importação no custo dos produtos para os clientes, a modelagem matemática será feita de forma que, além da minimização dos custos totais, ocorra também um balanço entre os créditos e débitos gerados para cada Estado, evitando geração de créditos inutilizáveis e minimizando pagamentos desnecessários de impostos.

2.6. Considerações sobre ambiente competitivo na definição do desenho da cadeia

A importância e o impacto das decisões de localização de instalações e desenho da cadeia foram comentados ao longo dessa revisão bibliográfica, porém sem abordar o aspecto competitivo. Farahani et al. (2014) exalta que nos mercados altamente competitivos de hoje, o projeto da cadeia de suprimentos inserida em um ambiente competitivo é um requisito inalienável para obter sucesso. Os autores definem, de maneira simplificada, o termo desenho da cadeia de suprimentos em ambiente competitivo, do inglês *Competitive Supply Chain Network Design (CSCND)*, como sendo a consideração dos impactos de um ambiente competitivo na definição da estrutura física e desenho da cadeia de suprimentos.

No estudo de Rice e Hoppe (2001), os autores argumentam que, no futuro, a competição não será mais simplesmente entre companhias isoladas e sim entre cadeias de suprimentos como um todo, e que o cenário mais provável a ser encontrado será o de empresas competindo e ganhando com base nos recursos e vantagens que elas poderão adquirir em suas cadeias de suprimentos, e não só internamente.

Grande parte da literatura sobre desenho da cadeia de suprimentos trabalha com cadeias isoladas, ignorando a existência e a influência de cadeias competidoras ou de potenciais competidores, apesar de estarem inseridas em um ambiente em que todos almejam capturar ou fidelizar a maior fatia possível do mercado disponível. Mesmo nos raros ambientes em que não existe competição no momento, Farahani et al. (2014) comentam sobre a importância que as cadeias deveriam dar em se preparar para um ambiente competitivo no futuro. Embora diversos dos modelos já existentes sobre o assunto assumam que as cadeias possuem a estrutura predeterminada, os autores ainda comentam que poucos trabalhos consideram aspectos competitivos e de desenho da cadeia de maneira integrada.

A intenção do presente tópico é a de apresentar conceitos e ressaltar os efeitos de um ambiente competitivos no desenho da cadeia de suprimentos, classificando as principais características contidas em modelos competitivos e apresentando e

algumas das abordagens utilizadas para solucionar problemas com essas características.

2.6.1. Perspectiva histórica

De acordo com Drezner, Drezner e Salhi (2002), o problema de localização de instalações em ambiente competitivo foi introduzido por Hotelling (1929), que considerava a competição em um segmento (tal como em uma rua principal), na qual os clientes priorizavam o local de compra de acordo com a menor distância a ser percorrida. Os trabalhos de Hakimi (1983), Hakimi (1986), por sua vez, estenderam a aplicação do problema de Hotelling (1929) para uma cadeia de segmentos, porém ainda sob a premissa de que os clientes favorecem instalações mais próximas. As novas formulações que vêm sendo desenvolvidas tenderam a capturar outras complexidades mais realistas, tais como a formulação Huff (1964), na qual a probabilidade de um cliente favorecer uma instalação é proporcional à atratividade da instalação e inversamente proporcional à distância na qual esta instalação se encontra do cliente, ou Drezner (1982), que resolveu o problema de localização de uma instalação em um plano com ambiente competitivo.

Dos trabalhos citados anteriormente, Hotelling (1929) apresenta de maneira simples e didática a influência de competidores no equilíbrio do mercado, comentando as situações apresentadas a seguir.

Sejam dois proprietários de empresas de água mineral “A” e “B”, de qualidades idênticas. A demanda é tida como elástica e o preço determinado pela quantidade total de água ofertada no mercado.

Um primeiro argumento sobre o equilíbrio do mercado desta situação é que, devido às características idênticas do produto, caso um competidor “A” diminua minimamente seu preço, obteria a totalidade do mercado do rival “B”. Uma crítica imediatamente apresentada sobre esse exemplo, é perda instantânea de todos os clientes a partir de uma variação infinitesimal de preço, ao invés de uma mudança gradativa dos clientes do fornecedor mais caro “B” para o fornecedor mais barato “A”, a medida que “B” fosse aumentando o preço até valores impagáveis.

Um segundo argumento sobre a situação foi que, apesar do preço mais baixo de algum dos concorrentes “A”, diversos clientes ainda optariam pelo produto mais caro, dada a comodidade de morarem mais perto de “B”, ou que o frete pago de “B” para determinado armazém do cliente seja mais barato que o frete que seria pago para “A”, ou que o modo de negociação de “B” seja mais agradável a determinados clientes, ou por “B” comercializar outros artigos de interesse de alguns clientes, oferecer qualidade superior no atendimento, ou uma combinação de diversos destes e outros fatores qualitativos e quantitativos.

Já o trabalho de Drezner (1982) apresenta a influência de um ambiente competitivo em decisões de localização de instalações em um plano, com dois problemas similares em um mesmo cenário.

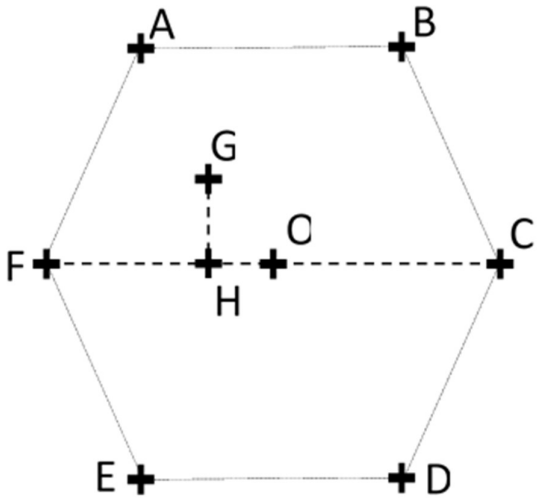
O cenário do problema: duas instalações fornecedoras X e Y competem por seis pontos de demanda unitária (A, B, C, ..., F) posicionados nos vértices de um hexágono regular. O custo de atendimento é representado pela distância entre cada ponto de demanda e as instalações fornecedoras. Toda demanda disponível no mercado é atendida por tais instalações, sendo que a instalação X tem uma vantagem sobre a Y, pois atrai clientes em caso de empate entre as distâncias da instalação até os pontos de demanda.

Problema 1: dada a localização de uma instalação existente X servindo os pontos de demanda, encontrar um local para uma nova instalação de Y que vai atrair o maior número de pontos de demanda, ou seja, encontrar uma melhor localização para Y, dado o local predeterminado de X.

Problema 2: encontrar uma localização de X que assegure o maior potencial de atração de clientes, dado que Y será posicionada após X, ou seja, encontrar a melhor localização para X que maximize o mercado atendido contra a melhor estratégia de localização de Y.

O plano com os pontos de demanda está representado na figura 2.4 a seguir:

Figura 2.4 – Posicionamento da demanda para os problemas 1 e 2



Fonte: Drezner (1982)

Para resolver o problema 1, o autor prova matemática e geometricamente que, quando X está posicionado no centro “O” do hexágono, existe um local “G” que garante a Y o poder de atrair no máximo 3 pontos de demanda.

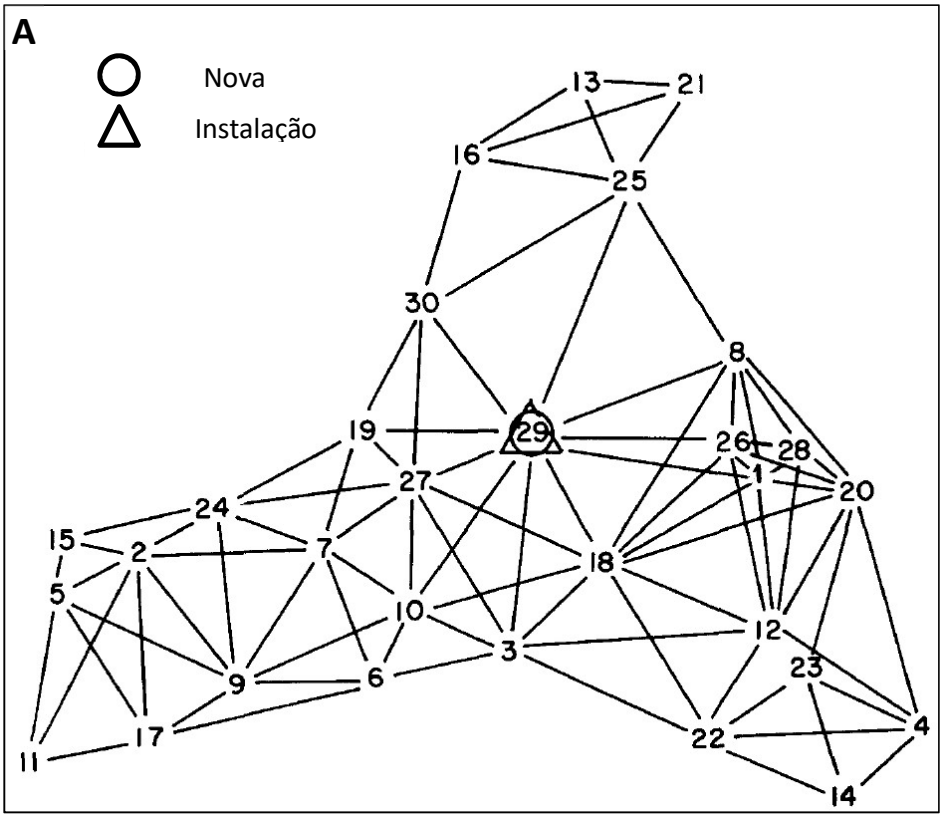
Na solução do problema 2, em que X não esteja necessariamente posicionado no centro “O” do hexágono, por exemplo, quando posicionado em “G”, o autor prova que é possível posicionar Y em “H” de maneira a atrair ao menos 4 pontos de demanda (C, D, E e F). Portanto, para maximizar o mercado atendido por X contra a melhor estratégia de localização de Y, recomenda-se posicionar X no centro do hexágono.

Outro trabalho que apresenta de uma maneira visualmente didática a influência do ambiente competitivo nas decisões de empresas é o trabalho de Revelle (1986), no qual o problema a seguir foi estudado.

Caso uma empresa de varejo desejasse investir em uma ou mais novas instalações, ela buscaria locais para maximizar o número de novos clientes ou maximizar sua captura ou sua influência no mercado. Os cenários descritos no trabalho abrangeram a variação, tanto do número de novas instalações entrando no mercado, quanto do número de instalações pré-existentes no mercado.

A seguir, a Figura 2.5 apresenta um dos cenários estudados, bem como os pontos de demanda e os potenciais locais para posicionamento das instalações.

Figura 2.5 – Cenário A: uma nova instalação entrando em um mercado dominado por somente uma instalação pré-existente



Fonte: adaptada de REVELLE, (1986)

A Tabela 2.3, a seguir, apresenta os cenários, bem como os resultados que, neste caso, é o percentual capturado do mercado pelas instalações pré-existentes e pelas novas instalações.

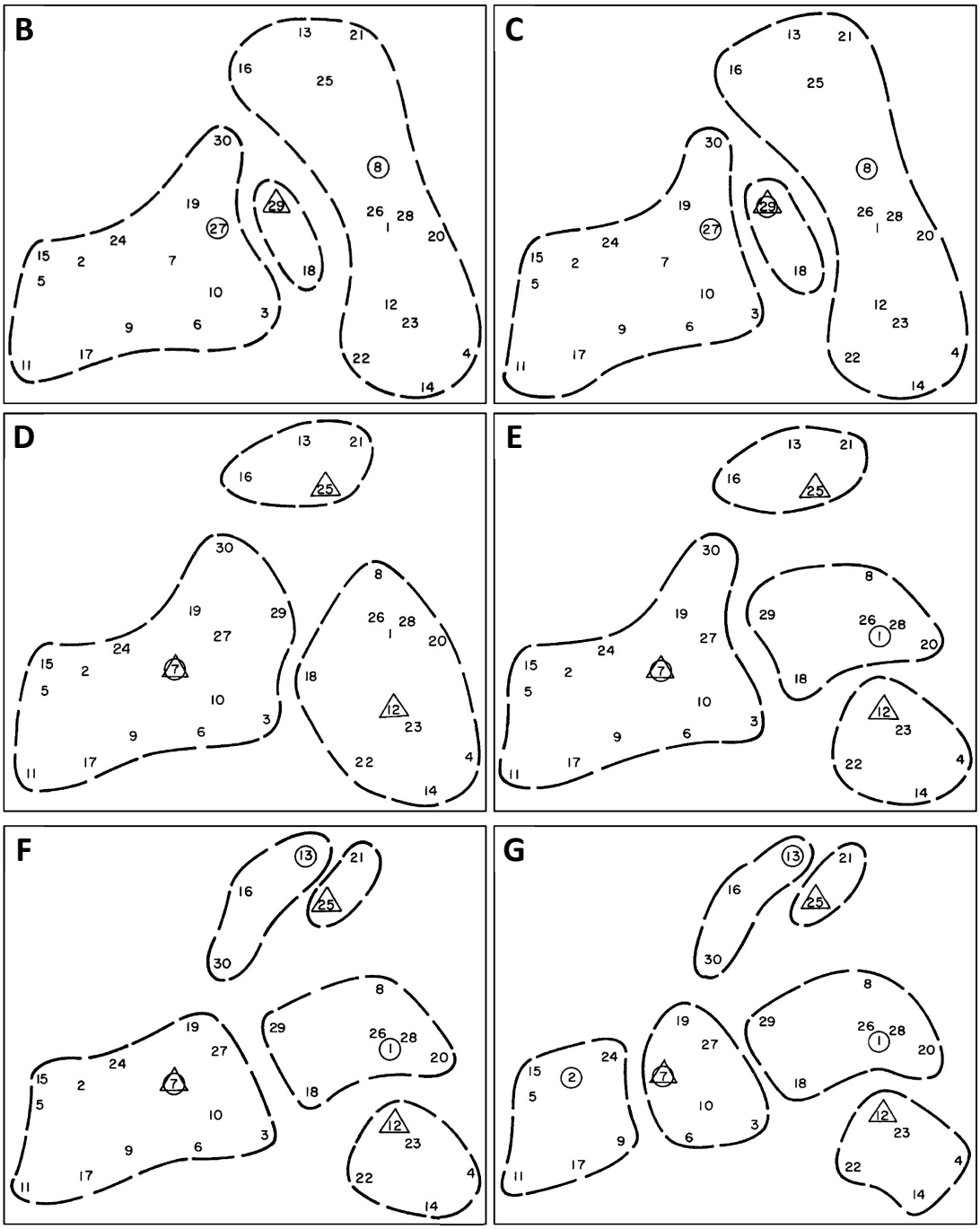
Tabela 2.3 – Resumo dos cenários apresentados no trabalho de Revelle (1986)

Cenário	Instalações pré-existentes		Novas instalações	
	Número de instalações	% Mercado capturado	Número de instalações	% Mercado capturado
A	1	50	1	50
B	1	10,3	2	89,7
C	1	5,2	3	94,8
D	3	72,7	1	27,3
E	3	51,7	2	49,3
F	3	39,9	3	60,1
G	3	29,9	4	70,1

Fonte: Adaptada de Revelle (1986)

A Figura 2.6, que segue, apresenta as áreas de mercado capturadas por cada instalação nos demais cenários B – G do trabalho de Revelle (1986).

Figura 2.6 – Cenários B - G: captura do mercado com a variação do número de novas instalações e do número de instalações pré-existentes (adaptada de REVELLE, 1986)



Fonte: REVELLE, (1986)

2.6.2. Competição no contexto empresarial

De acordo com Farahani et al. (2014) existem diversos tipos de competição. Um dos extremos é o monopólio, no qual somente uma empresa domina a totalidade do mercado e estipulando o preço do produto (com alguma regulação imposta pelo governo em alguns casos). O outro extremo é o estado de competição perfeita ou pura, na qual o mercado possui diversos competidores, cada um dominando uma pequena parcela do mercado total, possuindo pouca ou nenhuma influência sobre o preço. Exemplos típicos de mercado em competição pura são restaurantes e profissionais liberais (consultórios médicos, arquitetos etc.). Em um mercado entre os extremos de monopólio e competição pura, as empresas tendem a focar nas necessidades dos consumidores e identificar quais critérios são utilizados para tomada de decisão da compra de determinado produto para conseguirem obter a maior parcela do mercado possível. Os autores ainda comentam que os estudiosos sobre competição consideram diversas características como tendo impacto significativo no assunto e, dentre as principais, preço é uma das mais comentadas, assim como a distância e o nível de serviço.

Farahani et al. (2014) comentam que a definição de nível de serviço é variada na literatura, podendo ser interpretada quantitativamente como o percentual da demanda que pode ser imediatamente atendida a partir do estoque disponível ou qualitativamente, como um grupo de características sobre o produto que podem ser encontradas na internet, ou obtidas por telefone, amostras grátis para teste do produto, propaganda, disposição dos produtos nas lojas etc.

2.6.3. Classificação das características competitivas

As características que influenciam a competitividade das empresas diferem em diversos aspectos. Farahani et al. (2014) comentam que algumas são difíceis e onerosas de serem alteradas, tais como distância, tamanho, capacidade e qualidade dos serviços/produtos fornecidos. Tais características estão mais relacionadas às decisões estratégicas resultantes de estudos de configuração e desenho da cadeia de suprimentos. Assim sendo, serão referidas como características competitivas estratégicas no restante deste trabalho.

Outras características, tais como preço e nível de serviço, são mais flexíveis e podem ser ajustadas de acordo com o mercado ou com outros competidores (FARAHANI et al., 2014). Essas características estão mais relacionadas a decisões operacionais, portanto passarão a ser referidas como características competitivas operacionais no restante deste trabalho.

Vale ressaltar que a estrutura e desenho da cadeia impactam direta e indiretamente nas características operacionais de preço e nível de serviço pretendidas no futuro.

2.6.4. Tipos de competição

Existem diferentes tipos de competição que afetam as características competitivas dos rivais em um mercado. De acordo com Plastria (2001), são elas:

- competição estática: solução envolve modelos matemáticos;
- competição dinâmica: modelada utilizando os conceitos do equilíbrio de Nash;
- competição com antecipação: modelada utilizando os conceitos do equilíbrio de Stackelberg.

Farahani et al. (2014) descrevem que a competição estática é observada nos casos que as características competitivas das empresas já existentes no mercado não serão alteradas após a entrada de um novo competidor. Neste cenário, são predominantes as variáveis de decisão estratégica.

Na maioria dos estudos englobando competição estática, as decisões estratégicas estão relacionadas à localização de instalações e capacidade das mesmas. Problemas com estas características são chamados de problemas de localização de instalações em ambiente competitivo, do inglês "*Competitive Facility Location (CFL) problems*". Estes problemas são comumente formulados como modelos matemáticos, e ainda, segundo Farahani et al. (2014), existe uma lacuna na literatura envolvendo decisões estratégicas em mercados de competição estática.

De acordo com Rezapour et al. (2011), a competição dinâmica é observada nos casos em que empresas rivais ainda não estão presentes no mercado, porém entrarão logo após o início das operações da primeira entrante. Já Farahani et al. (2014) descrevem

que, apesar de neste cenário prevalecerem características relacionadas a decisões operacionais, tais como preço e nível de serviço, a cadeia otimizada só é obtida quando, tanto fatores estratégicos, quanto operacionais, são levados em consideração. A competição dinâmica é usualmente modelada pelo equilíbrio de Nash, no qual todos os competidores determinam simultaneamente suas características competitivas.

A competição com antecipação assume que um competidor irá estabelecer uma nova instalação somente após o líder se estabelecer no mercado. Nesse caso, as decisões do líder são baseadas em uma previsão do comportamento dos seguidores visando a minimização da perda de mercado após a entrada dos competidores (SASAKI et al., 2014).

Esses problemas são formulados utilizando a teoria de equilíbrio de Stackelberg, com modelos com duas ou mais camadas e, embora a sequência das decisões seja importante para o equilíbrio de Stackelberg, as decisões operacionais são tomadas simultaneamente. Problemas de localização de instalações capacitadas com antecipação são bem comuns no mundo real, porém devido à dificuldade de solução de modelos multicamada, existem poucos estudos na área (FARAHANI et al., 2014).

2.6.5. Tipos de demanda

Mcgarvey e Cavalier (2005) comentam que uma das considerações a serem realizadas em modelo competitivos é o comportamento da demanda, que pode ter duas configurações: demanda inelástica e demanda elástica.

A primeira assume uma demanda fixa em que se conhece todos os pontos de demanda a priori. Já a demanda elástica tenta modelar uma suposição mais realista, na qual a demanda é influenciada por algumas características das instalações oferecendo os produtos. A demanda elástica aumenta a complexidade do problema pela necessidade de se usar uma função de geração de demanda para determinar quantas unidades de demanda vão existir em um determinado ponto, dada a configuração atual da instalação.

2.6.6. Tipos de comportamento do mercado

De acordo com Plastria (2001), outra característica que influencia diretamente os modelos competitivos é o comportamento dos clientes. Existem dois tipos predominantes na literatura: comportamento certo ou determinado e comportamento impreciso ou probabilístico.

Plastria (2001) descreve que, em mercados com comportamento certo ou determinado, a totalidade do mercado é alocada ao melhor competidor, sendo ele localizado mais próximo aos clientes quando comparado aos concorrentes, ou possuindo determinada característica mais atraente aos consumidores. Farahani et al. (2014) comentam que este comportamento está usualmente associado a produtos básicos, sem diferenciação, para os quais características competitivas operacionais são similares entre os competidores. Neste caso, a competição é geralmente do tipo estática ou com antecipação.

Para mercados com comportamento incerto ou probabilístico, Farahani et al. (2014) descrevem que a demanda alocada para cada competidor é uma função que reflete as características competitivas de cada competidor, podendo ser tanto inelástica, no caso de produtos básicos, quanto elástica, no caso de produtos de luxo ou produtos diferenciáveis. Neste caso, a função de demanda pode ser usada tanto para competição estática quanto dinâmica (com ou sem antecipação).

De maneira resumida, os responsáveis pela configuração da cadeia de suprimentos precisam determinar (ou avaliar) qual tipo de competição estarão enfrentando: monopólio, oligopólio, competição pura; se a competição é estática, dinâmica sem reação dos competidores, ou dinâmica com antecipação dos competidores; se a demanda é elástica ou inelástica; se o mercado é determinístico ou probabilístico, além de avaliar quais os critérios de competição mais prezados pelo mercado a ser abordado: preço, nível de serviço, distância, qualidade do produto, confiabilidade do fornecimento, sustentabilidade da cadeia, dentre diversos outros fatores. Essas são avaliações prévias necessárias, pois cada tipo de competição requer uma modelagem específica, de modo a considerar os componentes estratégicos e operacionais que impactam na competitividade da empresa frente ao mercado.

2.7. Conclusões da revisão de literatura e oportunidades para pesquisa

Após a revisão de diversos trabalhos envolvendo localização de instalações e desenho da cadeia de suprimentos, algumas observações podem ser feitas com relação à abrangência dos trabalhos. Owen e Daskin (1998) comentam a necessidade de capturar aspectos mais complexos com relação a tempo e incertezas na cadeia, contidas na maioria dos problemas reais enfrentados pelas empresas, com ênfase em aprimorar técnicas de planejamento por cenários.

Melo, Nickel e Saldanha-da-Gama (2009) comentam a necessidade de uma maior integração estratégica, tática e operacional nas decisões de planejamento da cadeia de suprimentos e que embora existam alguns trabalhos nesta linha, a maioria deles utiliza uma estrutura muito simples na cadeia (e.g. decisão de localização em camada única e somente um produto na malha). De maneira geral, os autores ressaltam a necessidade de capturar simultaneamente aspectos semelhantes aos problemas enfrentados pelas empresas.

Manzini e Bindi (2009) compartilham da opinião de Melo, Nickel e Saldanha-da-Gama (2009) e adicionam a preocupação de integrar modelos e ferramentas de otimização para apoiar a tomada de decisões e minimizar os custos de gestão.

Wang, Lai e Shi (2011) exibiram a preocupação de incluir em seu trabalho mais aspectos que impactam a cadeia de suprimentos a fim de aumentar a aplicabilidade em situações reais, mais especificamente, integrando modos de transporte e incertezas de demanda. De maneira semelhante, Tsao e Lu (2012) comentam a necessidade de considerar limitações de capacidade em centros de distribuição e múltiplos produtos à abordagem de modelar a cadeia de suprimentos levando em consideração descontos em custos de transporte.

Wang, Meng e Yang (2013) e Farahani et al. (2014) sugerem um maior foco em modelos multiperíodos, utilizando-os em problemas em que decisões precisam ser implementadas em etapas e em problemas com restrições de orçamento para construção de novas instalações.

Embora não tenham sido os primeiros autores a sugerirem a inclusão de ambientes competitivos na modelagem de problemas de localização de instalações e desenho

da cadeia de suprimentos, Rezapour e Farahani (2014) e Farahani et al. (2014) ressaltam que conclusões obtidas sem considerar a competição de maneira conjunta a fatores estratégicos e operacionais são “subótimas”, principalmente para empresas que desejam entrar em um novo mercado.

Por fim, Yoshizaki (2002) sugere aprofundamento em alguns temas, tais como análise de sensibilidade da relação “Logística x ICMS”, economias de escala, sazonalidade e planejamento de materiais para manufatura; e Hamad (2014) sugere a expansão dos modelos de localização em incluir custo das vendas perdidas para os cenários em que a demanda possa aumentar acima da capacidade instalada, estoques de segurança em todos os elos da cadeia, cálculo do nível de estoque ótimo utilizando custos de carregamento de estoque e custo de perda de venda por falta de estoque.

Aproveitando as sugestões dos autores citados anteriormente, este trabalho visa construir um modelo matemático que proporcione uma maior integração estratégica, tática e operacional ao abordar diversos aspectos relevantes aos problemas enfrentados pelas empresas tais como localização em diversas camadas da cadeia em um modelo matemático multiperíodos, multiproduto, multimodal, com limitação nas capacidades de produção, movimentação e armazenagem de cada instalação e eventuais expansões modulares nestas capacidades, decisões amparadas por planejamento de cenários ao comparar os custos oferecidos em diversas configurações da cadeia de suprimentos própria contra os custos praticados pelos concorrentes, além de tocar aspectos financeiros tais como limite de investimento para construção de instalações e ampliação das capacidades das mesmas, custos financeiros de manter produtos em estoque e ICMS incorrido nas operações de venda, transferência e transporte de mercadorias.

3. METODOLOGIA E MODELAGEM DO PROBLEMA

Este capítulo define o problema de localização de instalações em um ambiente competitivo com todas as variáveis e restrições que serão consideradas, além de apresentar o modelo matemático de otimização desenvolvido para responder os questionamentos apresentados em 1.1 (Objetivo e escopo da dissertação).

A modelagem será apresentada e aplicada em um problema exemplo, de pequeno porte, para que a influência de cada uma das restrições possa ser avaliada sem dificuldade e posteriormente será aplicada em um problema real, de maior porte.

3.1. Processo estudado

Dado o interesse em abranger diversos dos aspectos práticos presentes na realidade das empresas, o processo estudado busca representar o funcionamento de uma empresa genérica de manufatura, desde a aquisição das matérias primas necessárias para produção de produtos industrializados passando por armazenagem e distribuição dos mesmos, de acordo com a demanda de cada cliente.

Em mais detalhes, o processo abrange o fluxo de materiais, partindo dos fornecedores de matéria prima, passando por fábricas com processos internos capacitados, capazes de processar a matéria prima adquirida de fornecedores nacionais ou internacionais (neste caso, passando por um porto para importação) e transformá-la em produtos industrializados, que, por sua vez, podem ser transferidos para CDs primários ou CDs regionais e/ou distribuídos para os consumidores finais, sendo que esta movimentação física dos materiais pode ocorrer via modos de transporte diversos (rodoviário, ferroviário e marítimo).

Nesse cenário, todas as entidades cujo controle das operações e materiais é própria (portos, fábricas e CDs) possuem capacidade limitada (de produção, movimentação interna e armazenagem) e podem ser expandidas modularmente (incrementos discretos de capacidade). Já as entidades terceiras (fornecedores nacionais, internacionais e concorrentes) são limitadas em relação à capacidade produtiva de cada um dos produtos disponíveis para distribuição.

Cada matéria prima possui determinadas características que podem ser combinadas a fim de atingir os requisitos mínimos de cada produto acabado, tal como no problema da dieta de Stigler (1945), no qual alimentos possuem determinados nutrientes e a soma da quantidade de alimentos consumida deve fornecer a quantidade mínima exigida de cada nutriente, minimizando os custos totais. No modelo matemático proposto, as matérias primas são processadas em centros de trabalho específicos para fabricação dos produtos acabados e estes centros possuem uma limitação no número de horas que estão disponíveis para funcionamento. A fabricação de cada produto acabado exige tempos distintos em cada centro de trabalho, consumindo as horas disponíveis de cada processo utilizado.

Também são consideradas as particularidades fiscais explicadas em mais detalhes por Pantalena (2004), Hamad e Gualda (2014), Yoshizaki (2002), Yoshizaki e Andrade (2012), envolvendo ICMS e impostos de importação por influenciam diretamente o preço/custo de diversos dos produtos comercializados.

A presença de concorrentes também influencia diretamente o problema, pois os produtos comercializados neste caso são produtos básicos (não diferenciáveis ou comoditizados) e, consequentemente, os clientes optam pelo competidor que consegue fornecer o menor custo total para aquisição do produto. Essa concorrência é considerada estática neste cenário, ou seja, os concorrentes já existentes não mudarão suas características competitivas caso um novo competidor resolva também se estabelecer neste mercado.

A demanda é sazonal e inelástica, ou seja, independentemente do custo do produto, a demanda não será alterada. Também são considerados sazonais os custos de transporte associados a cada modo de transporte e a totalidade da demanda pode ser abastecida tanto por concorrentes quanto por instalações próprias.

Investimentos para construção de novas instalações (fábricas ou CDs) e a ampliação das capacidades (de produção, movimentação e armazenagem) de cada uma destas instalações é limitada em um orçamento disponível a cada período e por um orçamento total anual (que não necessariamente é igual à soma do orçamento de todos os períodos).

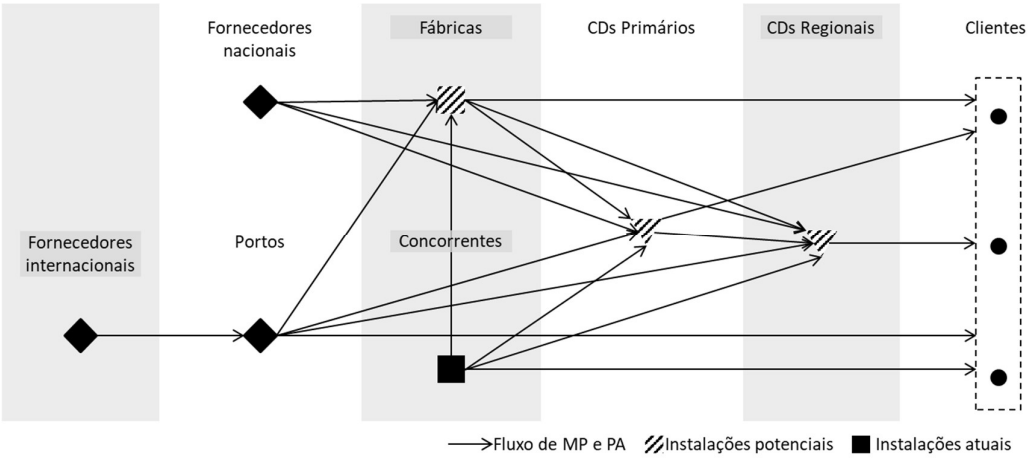
A sazonalidade da demanda e dos custos de transporte, aliada à eventual necessidade de investimentos em capacidades de produção, fomenta a possibilidade de aproveitar a capacidade produtiva ociosa em períodos de baixa demanda e armazenar os produtos para posteriormente distribuí-los nos períodos de maior demanda, ou até mesmo aproveitar custos mais baixos de transporte em determinados períodos para posicionar os produtos mais próximos aos clientes, e só então efetuar a distribuição de acordo com a demanda de cada cliente.

Essa possibilidade de armazenagem por determinado período é penalizada pelo custo de oportunidade do capital investido nos produtos, bem como pelos custos da armazenagem física dos produtos.

De maneira resumida, a preocupação desta empresa genérica é de atender toda demanda prevista, configurando a cadeia de suprimentos de modo a atingir os clientes com preços mais baixos que os concorrentes, minimizando os custos totais, e considerando que os principais custos são: aquisição de matéria prima, investimento em instalações, investimento em capacidade de produção, movimentação e armazenagem, custo financeiro de estoque, custo fixo das instalações e equipamentos, custo variável de produção, custo de transferência e distribuição dos produtos e impostos (importação e ICMS).

Uma ilustração do cenário proposto para este estudo, com todas as entidades físicas relevantes, bem como todos os fluxos (unidirecionais) potenciais, está apresentada na figura 3.1, a seguir.

Figura 3.1 – Mapa de fluxos possíveis entre os tipos de instalações presentes no modelo.



Fonte: Elaboração do autor

3.2. Abrangência do problema

Conforme argumentado na literatura até o momento, problemas de localização de instalações podem ser influenciados por uma quantidade significativa de variáveis, tanto quantitativas quanto qualitativas. Na sequência estão listados diversos dos principais parâmetros estudados na literatura acerca de problemas de localização e uma breve justificativa sobre a inclusão dos mesmos no modelo matemático proposto por este estudo.

- **Decisões de localização em múltiplas camadas:** a produção de matéria prima, de produto acabado e a armazenagem de ambos poderão ser realizadas em estruturas distintas.

- **Estruturas capacitadas:** o dimensionamento modular da capacidade das fábricas e centros de distribuição visa à obtenção de uma estimativa do investimento necessário para abertura das mesmas.

- **Múltiplos produtos:** por terem mercados geograficamente distintos, o estudo abrange a movimentação de uma série de produtos acabados e matérias primas.

- **Múltiplos modais:** a distribuição de produtos acabados será realizada somente via modal rodoviário, porém a obtenção das matérias primas pode ocorrer via modal rodoviário, ferroviário e marítimo.

- **Lista de materiais:** cada produto industrializado exige o processamento de matérias primas que consigam fornecer os requisitos mínimos de qualidade (nutrientes) ao serem misturadas e processadas.

- **Transferência de material entre estruturas:** somente produtos acabados podem ser armazenados no centro de distribuição; portanto, será considerada a transferência rodoviária somente entre fábricas e centro de distribuição. Uma vez que as fábricas também podem atuar como centros de distribuição, pode haver fluxo de transferência de produtos entre fábricas, na hipótese de serem construídas facilidades separadas para fabricação dos produtos acabados.

- **Distribuição:** poderá ocorrer a partir de quatro pontos da cadeia: portos, fábricas, centro de distribuição primário, centro de distribuição secundário.

- **Impostos:** a estrutura fiscal do setor emprega alíquotas diferenciadas entre a distribuição de produtos nacionais e produtos importados, sendo necessária a inclusão do ICMS na movimentação (venda/transferência) de matérias primas e produtos acabados.

- **Múltiplos períodos:** para abranger a sazonalidade do mercado, o horizonte de planejamento do modelo considerará múltiplos períodos distintos, abrangendo todos os meses do ano.

- **Estoque:** parâmetros como a variação da demanda, preços e frete entre períodos influenciam diretamente o nível e a localização dos estoques na malha, sendo necessário incluí-los no modelo matemático proposto.

- **Sazonalidade:** a sazonalidade do mercado não só influencia a demanda, mas também necessidades de capacidades de produção e armazenagem diferenciadas, características que também serão estudadas.

- **Analise de competitividade:** a alta sensibilidade ao preço dos produtos por parte dos consumidores, aliada à presença de concorrentes no mercado, possibilita a análise da área de influência das mesmas, também fazendo parte do estudo.

3.3. Modelagem

3.3.1. Introdução à modelagem

A proposta é a elaboração de um modelo genérico de programação matemática que capture diversos dos aspectos práticos expostos e sugeridos até o momento, porém sem deixar de adaptá-lo para a realidade de empresas brasileiras, tais como o Imposto sobre Circulação de Mercadorias e Serviços (ICMS). Os aspectos que pretendem ser considerados na modelagem matemática proposta incluem:

- múltiplas camadas na cadeia (fornecedores, portos, fábricas, centros de distribuição centrais, centros de distribuição regionais e clientes);
- múltiplos produtos;
- múltiplos períodos;
- estoques (matéria prima e produto industrializado);
- configuração de fábrica (vocação);
- decisões de localização de instalações em múltiplas camadas;
- disponibilidade de capital para investimentos;
- restrições de produção, movimentação e armazenagem de produtos;
- demanda e custos sazonais;
- expansões modulares de capacidade das instalações e processos de produção;
- múltiplos modos de transporte;
- incentivos fiscais e tributários (diferimento da alíquota padrão de ICMS);
- análise de competitividade da cadeia.

3.3.2. Modelo Literal

A seguir é apresentado o modelo literal utilizado neste trabalho e uma breve explicação das restrições abrangidas.

Minimizar os custos totais CT da operação, tal que:

$$
\begin{aligned}
CT = \text{Custo de transporte (transferência e distribuição)} \\
&+ \text{Capital investido (instalações próprias e equipamentos de produção)} \\
&+ \text{Custo váriável de produção e aquisição de produtos de terceiros} \\
&+ \text{Custo variável de movimentação, armazenagem e financeiro de estoque} \\
&+ \text{Custo fixo (instalações próprias e equipamentos de produção)} \\
&+ \text{ICMS sobre as operações devenda e transferência realizadas}
\end{aligned}
$$

Sujeito às restrições:

- atendimento integral da demanda de todos os clientes em todos os períodos;
- limitações na capacidade de produção de todas as instalações com possibilidade de produção;
- expedição de terceiros limitada à capacidade de produção dos mesmos;
- consumo de matéria prima guiado pela necessidade de nutrientes/características dos produtos acabados;
- produção de produto acabado limitada pela quantidade disponível de matéria prima;
- capacidade de produção dos processos atrelada ao produto acabado processado e limitada à disponibilidade de tempo para produção;
- balanço de massa em todas as instalações próprias $(Estoque\ atual = estoque\ anterior + recebimentos + produção - expedições - consumo)$, sendo que as parcelas de produção e consumo só existem em instalações com capacidade própria de produção;
- limitações nas capacidades de movimentação e armazenagem de produtos nas instalações próprias;
- limitações em investimentos em cada período e agregado em todo horizonte de planejamento;
- balanço de ICMS de cada instalação sempre negativo para o horizonte de planejamento (não necessariamente em todos os períodos);

- limitação na quantidade de instalações e processos a serem construídos e/ou ampliados em todo horizonte de planejamento.

3.3.3. Índices e conjuntos

t: Índice de períodos no horizonte de planejamento, $t \subset \mathbb{N}$;

p: Índice de produtos (matérias primas e produtos acabados);

ch: Índice dos atributos (características) de cada produto (P);

k: Índice de fábricas (existentes e/ou potenciais);

pr: Índice de processos utilizados em fábricas (K) para transformação de matérias primas (MP) em produtos acabados (PA).

m: Índice de modos de transporte que podem ser utilizados para movimentação de produtos (P) entre cada origem e destino disponível;

j: Índice de CDs primários (existentes e/ou potenciais);

r: Índice de CDs secundários (existentes e/ou potenciais);

i: Índice de clientes;

c: Índice de concorrentes;

o: Índice de fornecedores nacionais;

q: Índice de fornecedores internacionais;

l: Índice de portos (marítimos ou rodo/ferroviários);

MP: Subconjunto de produtos da categoria matéria prima, $MP \subset P$;

PA: Subconjunto de produtos da categoria produto acabado, $PA \subset P$;

$ORIG$: Subconjunto dos locais com possibilidade de expedir produtos $(Q \cup O \cup L \cup K \cup C \cup J \cup R)$;

$DEST$: Subconjunto dos locais com possibilidade de receber e/ou consumir produtos $(L \cup K \cup J \cup R \cup I)$;

SPR: Subconjunto dos locais considerados próprios que expedem/recebem produtos $(L \cup K \cup J \cup R)$;

TER: Subconjunto dos locais de terceiros que produzem/expedem produtos $(Q \cup O \cup C)$;

SCP: Subconjunto dos locais com capacidade de produção de produtos $(Q \cup O \cup C \cup K)$;

SSP: Subconjunto dos locais que movimentam produtos (expedem/recebem) porém sem capacidade de produção própria $(L \cup J \cup R)$;

3.3.4. Variáveis de decisão

$zS_{spr,t}$: Variável inteira, representando o nível de capacidade da instalação (spr), no período (t);

$yS_{spr,t}$: Variável binária, representando o status (aberto/fechado) da instalação (spr), no período (t);

$zP_{k,pr,t}$: Variável inteira, representando o nível de capacidade do processo (pr) instalado na fábrica (k), durante o período (t);

$xE_{orig,dest,p,m,t}$: Quantidade (toneladas) do produto (p), expedidas do local de origem $(orig)$, para o local de destino $(dest)$, utilizando-se o modo de transporte (m), durante o período (t);

$xP_{scp,p,t}$: Quantidade (toneladas) produzidas do produto (p), na instalação (scp), durante o período (t);

$xU_{k,mp,t}$: Quantidade (toneladas) de matéria prima (mp) consumidas na fábrica (k), durante o período (t);

$xA_{spr,p,t}$: Quantidade (toneladas) do produto (p) armazenadas na instalação (spr) durante o período (t).

3.3.5. Parâmetros e equações

$INVP_t$: Disponibilidade de capital (R$) no período (t) para investimentos em novas instalações, processos e incrementos de capacidade;

$INVT$: Disponibilidade total de capital (R$) para investimentos em novas instalações, processos e incrementos de capacidade para todo horizonte de planejamento;

FAB: Número máximo de fábricas que podem ser abertas em todo horizonte de planejamento;

CDP: Número máximo de CDs primários que podem ser abertos em todo horizonte de planejamento;

CDS: Número máximo de CDs secundários que podem ser abertos em todo horizonte de planejamento;

PRC: Número máximo de processos que podem ser abertos por nível de capacidade das fábricas em todo horizonte de planejamento;

$TURNO$: Número de turnos (regime de trabalho) por dia útil;

$HTURNO$: Número de horas úteis disponíveis por turno de trabalho;

$DPLAN$: Número de dias úteis disponíveis dentro do horizonte de planejamento;

$CFINA$: Custo financeiro anual para carregamento de estoques (produtos);

NPI: Número de parcelas na qual os investimentos em ativos (instalações próprias e processos) serão divididos;

M: Constante positiva numericamente grande que auxilia em restrições de limite de capacidade ou abertura de novas instalações;

$NPER$: Número de períodos no qual o horizonte de planejamento está dividido;

$DEM_{i,p,t}$: Demanda do cliente (i), pelo produto (p), durante o período (t);

$PrT_{orig,p,t}$: Preço de transferência praticado em cada origem $(orig)$, para cada produto (p), em cada período (t);

$PrV_{orig,p,t}$: Preço de venda praticado em cada origem $(orig)$, para cada produto (p), em cada período (t);

$INVS_{spr}$: Investimento necessários (R$) para instalação de cada nível de capacidade da facilidade (spr);

CFS_{spr}: Custo fixo (R$) para manter a operação de cada nível de capacidade da facilidade (spr);

$CapP_{spr}$: Capacidade (tonelada/período) de produção da instalação (spr);

CVP_{spr}: Custo variável por tonelada (R$/tonelada) de produção do produto (p), na instalação (spr);

$CapM_{spr}$: Capacidade (tonelada) de movimentação (produtos) da instalação (spr);

CVM_{spr}: Custo variável por tonelada (R$/tonelada) de movimentação de produtos na instalação (spr);

$CapA_{spr}$: Capacidade (tonelada) de armazenagem da instalação (spr);

CVA_{spr}: Custo variável por tonelada (R$/tonelada) de armazenagem de produtos, na instalação (spr);

$SIni_{spr}$: Status da instalação (spr) durante período inicial $(t = 1)$;

$EIni_{spr}$: Estoque inicial (tonelada) do produto (p) na instalação (spr);

$EFim_{spr}$: Estoque final (tonelada) do produto (p) na instalação (spr);

$CapP_{ter,p,t}$: Capacidade de produção do produto (p), nas instalações de terceiros (ter), em cada período (t);

$DIST_{orig,dest}$: Distância (km) entre cada local de origem $(orig)$ e local de destino $(dest)$;

$ARCO_{orig,dest}$: Possibilidade (binária) de movimentação de produtos entre cada local de origem $(orig)$ e local de destino $(dest)$;

$ICMS_{orig,dest}$: Alíquota (%) de ICMS devido pela movimentação interestadual de produtos, entre cada local de origem $(orig)$ e local de destino $(dest)$;

$RICMS_{orig,dest}$: Redução na base de cálculo da alíquota (%) de ICMS pela movimentação de produtos entre cada local de origem $(orig)$ e local de destino $(dest)$;

$MODO_{orig,dest,m}$: Modos de transporte permitidos / disponíveis entre cada par $(orig, dest)$;

$CUT_{m,t}$: Custo unitário (R$*ton/km) para cada modo de transporte (m), em cada período (t);

$PrcF_{k,pr}$: Possibilidade (binária) de instalação do processo de produção (pr) na fábrica (k);

$INVPrc_{k,pr}$: Capital (R$) investido para instalação do processo (pr) na fábrica (k);

$SINI_{k,pr}$: Status do processo (pr) na fábrica (k) no período inicial $(t = 1)$;

$CFi_{k,pr}$: Custo fixo (R$) para manter a operação do processo (pr) na fábrica (k);

$CVPrc_{k,pr}$: Custo variável (R$/hora) de utilização do processo (pr) na fábrica (k);

$p_Bin_Prc_PPa_{pa,pr}$ $PrcP_{pa,pr}$: Requisito (binário) do processo (pr), para produção do produto acabado (pa);

$HPrcP_{pa,pr}$: Tempo necessário (horas) de utilização do processo (pr), para produção de 1 tonelada do produto acabado (pa);

$QCH_{p,ch}$: Atributos (ch) (peso, volume, % nutrientes, etc) de cada produto (p);

Número de dias úteis por período (t).

$$DPER_t = DPLAN / NPER\,;\ \forall t; \tag{3.1}$$

Custo financeiro de carregamento de estoque (produtos) por período (t);

$$CFEPER_t = (1 + CFINA)^{\left(\frac{1}{NPER}\right)};\ \forall t. \tag{3.2}$$

Horas úteis disponíveis para produção em cada período (t).

$$HDISP_t = TURNO\ * HTURNO\ * DPER_t;\ \forall t. \tag{3.3}$$

Quantidade (toneladas) de produtos movimentados (recebimento e expedição) na instalação (spr), durante o período (t); $\forall spr, t$.

$$xM_{spr,t} = \sum_{orig}\sum_{p}\sum_{m} xE_{orig,spr,p,m,t} + \sum_{dest}\sum_{p}\sum_{m} xE_{spr,dest,p,m,t} \tag{3.4}$$

Custo de distribuição (transporte) do produto (p), utilizando o modo de transporte (m) entre o local de origem (spr) e o local de destino (i), no período (t); $\forall i, p, t$.

$$CTDistr_{i,p,t} = \sum_{spr}\sum_{m} DIST_{spr,i}\ *\ xE_{spr,i,p,m,t}\ *\ CUT_{m,t} \tag{3.5}$$

Custo de transferência (transporte) do produto (p), utilizando o modo de transporte (m) entre o local de origem $(orig)$ e o local de destino (spr), no período (t); $\forall orig, spr, p, m, t$.

$$CTTransf_{orig,spr,p,m,t} = DIST_{orig,spr} * xE_{orig,spr,p,m,t}\ *\ CUT_{m,t} \tag{3.6}$$

Capital (R$) utilizado para instalação da facilidade (spr), no período (t); $\forall spr$.

$$DINVS_{spr,t} = \left(\left(zS_{spr,t} -\ zS_{spr,t-1}\right) * INVS_{spr}\right) \tag{3.7}$$

Capital (R$) utilizado para instalação do processo (pr), na fábrica (k), durante o período (t); $\forall k, pr$.

$$DINVP_{k,pr,t} = \left(\left(zP_{k,pr,t} - zP_{k,pr,t-1}\right) * INVPrc_{k,pr}\right) / NPI;\ \forall k, pr;\ (t > 1). \tag{3.8}$$

Custo variável de produção, na fábrica (k), durante o período (t); $\forall k, t$.

$$CVaP_{k,t} = \sum_{p} xP_{k,p,t} * CVP_k \tag{3.9}$$

Custo variável de produção dos processos instalados na fábrica (k), durante o período (t); $\forall k, t$.

$$CVaPrc_{k,t} = \sum_{pr} \sum_{p} xP_{k,p,t} * CVPrc_{k,pr} \tag{3.10}$$

Custo variável de aquisição de produtos em terceiros (ter), durante o período (t); $\forall ter, t$.

$$CVaP_{ter,t} = \sum_{p} xP_{ter,p,t} * PrV_{ter,p,t} \tag{3.11}$$

Custo variável de movimentação de produtos na instalação (spr), durante o período (t); $\forall spr, t$.

$$CVaM_{spr,t} = xM_{spr,t} * CVM_{spr} \tag{3.12}$$

Custo variável de armazenagem de produtos na instalação (spr), durante o período (t); $\forall spr, t$.

$$CVaA_{spr,t} = \sum_{p} xA_{spr,p,t} * CVA_{spr} \tag{3.13}$$

Custo financeiro de estocagem de produtos na instalação (spr), durante o período (t); $\forall spr, t$.

$$CVaE_{spr,t} = \sum_p xA_{spr,p,t} \ * \ PrT_{spr,p,t} \ * \ CFEPER_t \tag{3.14}$$

Custo fixo (R$) para operação de cada facilidade (spr), durante o período (t); $\forall spr, t$.

$$CFiS_{spr,t} = \mathrm{zS} \ * \ CFS_{spr} \tag{3.15}$$

Custo fixo (R$) para manter a operação de cada processo (pr), em cada fábrica (k), durante o período (t); $\forall k, pr, t$.

$$CFiP_{k,pr,t} = zP_{k,pr,t} \ * \ CFP_{k,pr} \tag{3.16}$$

Capital (R$) investido durante o período (t) para abertura de instalações, aquisição de processos e ampliações de capacidade; $\forall t$.

$$CIPER_t = \sum_{spr} DINVS_{spr,t} + \sum_k \sum_{pr} DINVP_{k,pr,t} \tag{3.17}$$

Capital (R$) total investido para abertura de instalações, aquisição de processos e ampliações de capacidade durante todo horizonte de planejamento.

$$INVT = \sum_t CIPER_t \tag{3.18}$$

Total de ICMS devido (R$) por instalação (spr), em cada período (t); $\forall spr, t$.

$$\begin{aligned} BICMS_{spr,t} = & \left[IEa_{spr,t} + IEb_{spr,t}\right] - \left[ISa_{spr,t} + ISb_{spr,t}\right] \\ & + \left[ITEa_{spr,t} + ITEb_{spr,t}\right] - \left[ITSa_{spr,t} + ITSb_{spr,t}\right] \end{aligned} \tag{3.19}$$

Sendo que:

$$IEa_{spr,t} = \left(\sum_{ter}\sum_{p}\sum_{m} xE_{ter,spr,p,m,t} * PrV_{ter,p,t} * ICMS_{ter,spr} * \left(1 - RICMS_{ter,spr}\right)\right) \quad (3.20)$$

$$IEb_{spr,t} = \left(\sum_{spr1}\sum_{p}\sum_{m} xE_{spr1,spr,p,m,t} * PrT_{spr1,p,t} * ICMS_{spr1,spr} * \left(1 - RICMS_{spr1,spr}\right)\right) \quad (3.21)$$

$$ISa_{spr,t} = \left(\sum_{i}\sum_{p}\sum_{m} xE_{spr,i,p,m,t} * PrV_{spr,p,t} * ICMS_{spr,i} * \left(1 - RICMS_{spr,i}\right)\right) \quad (3.22)$$

$$ISb_{spr,t} = \left(\sum_{spr1}\sum_{p}\sum_{m} xE_{spr,spr1,p,m,t} * PrT_{spr,p,t} * ICMS_{spr,spr1} * \left(1 - RICMS_{spr,spr1}\right)\right) \quad (3.23)$$

$$ITEa_{spr,t} = \left(\sum_{ter}\sum_{p}\sum_{m} DIST_{ter,spr} * xE_{ter,spr,p,m,t} * CUn_Transporte_{m,t} * p_Aliquota_ICMS_{ter,spr}\right) \quad (3.24)$$

$$ITEb_{spr,t} = \left(\sum_{spr1}\sum_{p}\sum_{m} DIST_{spr1,spr} * xE_{spr1,spr,p,m,t} * CUT_{m,t} * ICMS_{spr1,spr}\right) \quad (3.25)$$

$$ITSa_{spr,t} = \left(\sum_{i}\sum_{p}\sum_{m} DIST_{spr,i} * xE_{spr,i,p,m,t} * CUT_{m,t} * ICMS_{spr,i}\right) \quad (3.26)$$

$$ITSb_{spr,t} = \left(\sum_{spr1}\sum_{p}\sum_{m} DIST_{spr,spr1} * xE_{spr,spr1,p,m,t} * CUT_{m,t} * ICMS_{spr,spr1}\right) \quad (3.27)$$

Equação de custo total da cadeia (R$).

$$
\begin{aligned}
CTO = \Bigg(& \sum_{spr}\sum_{i}\sum_{p}\sum_{m}\sum_{t} CTDistr_{spr,i,p,m,t} \\
& + \sum_{orig}\sum_{spr}\sum_{p}\sum_{m}\sum_{t} CTTransf_{orig,spr,p,m,t} \\
& + \sum_{spr}\sum_{t} DINVS_{spr,t} + \sum_{k}\sum_{pr}\sum_{t} DINVP_{k,pr,t} \\
& + \sum_{k}\sum_{t} CVaP_{k,t} + \sum_{k}\sum_{pr}\sum_{t} CVaPrc_{k,pr,t} \\
& + \sum_{ter}\sum_{t} CVaP_{ter,t} + \sum_{spr}\sum_{t} CVaM_{spr,t} + \sum_{spr}\sum_{t} CVaA_{spr,t} \\
& + \sum_{spr}\sum_{t} CVaE_{spr,t} + \sum_{spr}\sum_{t} CFiS_{spr,t} \\
& + \sum_{k}\sum_{pr}\sum_{t} CFiP_{k,pr,t} + \sum_{spr}\sum_{t} ISa_{spr,t} \\
& + \sum_{spr}\sum_{t} ITSa_{spr,t} \Bigg)
\end{aligned}
\tag{3.28}
$$

A equação 3.1 distribui igualmente o número de dias úteis do período de planejamento total entre cada período. Caso o número de dias úteis seja diferente entre períodos, este parâmetro pode simplesmente ser modificado para uma tabela com dados específicos para cada período.

Já a equação 3.2 atribui a cada período o custo financeiro oportunidade para penalização do carregamento de estoque entre períodos.

A equação 3.3 especifica o número de horas disponíveis para operação das instalações em cada período pela multiplicação do número de turnos trabalhados por dia útil, número de horas por turno e número de dias úteis por período.

A equação 3.4 representa a consolidação de todo volume (toneladas) de produtos movimentado em instalações próprias durante cada período e é composto de duas parcelas: recebimento e expedição de todos os produtos, utilizando todos os modos de transporte, durante cada período.

A equação 3.53.5 representa o custo transporte relativo à distribuição final dos produtos. Esta distribuição engloba somente o envio de carga quando o destino for um cliente. Esta parcela é calculada a partir da multiplicação da quantidade expedida

do produto pela distância do par origem-destino e o custo unitário do modo de transporte utilizado.

A equação 3.6 representa o custo de transporte relativo à transferência dos produtos entre fornecedores e instalações próprias, até a instalação que efetuará a expedição do produto para o cliente. É obtida de maneira análoga à 3.5, com a diferença que os locais de destino não englobam clientes.

A equação 3.7 representam capital investido para instalação de uma unidade própria (fábrica, centro de distribuição primário ou secundário). É composto por duas parcelas. (1) representa a mudança de status da instalação. Caso o status atual, que é representado por um número inteiro, maior ou igual a zero, seja maior que o status do período anterior, significa que houve uma mudança na capacidade da instalação. Cada incremento na mudança de status das instalações é multiplicado por (2), que representa o capital necessário para investimento de cada site. Esta maneira de modelar custos de instalação permite incrementos modulares de capacidade, refletindo de maneira mais fiel o comportamento discreto de expansões de capacidade das empresas.

De maneira análoga a 3.7, a equação 3.8 refere-se aos processos de produção que podem ser instalados em cada fábrica.

A equação 3.9 corresponde ao custo variável de produção, calculada a partir da quantidade de produção de cada produto multiplicada pelo custo variável de produção de cada fábrica. Apesar da semelhança com o custo a equação 3.10 explicada a seguir, 3.9 deve ser interpretada como todos os custos variáveis que dão suporte à produção, exceto o custo variável de produção de cada processo propriamente dito.

A equação 3.10 corresponde ao custo variável de produção específico de cada processo, instalado em cada fábrica. De maneira análoga a 3.9 é calculado a partir da multiplicação da quantidade produzida pelo custo variável de produção de cada processo em cada fábrica.

A equação 3.11 representa o custo de aquisição de produtos nas instalações de terceiros (concorrentes, fornecedores nacionais e fornecedores internacionais). É

calculado pela multiplicação da quantidade de produção pelo preço de venda do produto em cada terceiro.

As equações 3.12 e 3.13 representam, respectivamente, os custos variáveis de movimentação e armazenagem de produtos (por tonelada) em cada instalação. 3.12 é calculado a partir da multiplicação da quantidade movimentada pelo custo variável de movimentação e 3.13 é calculada a partir da multiplicação da quantidade (toneladas) total de produtos armazenados em determinada instalação pelo custo variável de armazenagem da instalação.

O custo variável de estocagem de produtos, representado por 3.14 é uma maneira de penalizar financeiramente a imobilização de capital em forma de estoque de produtos. O cálculo é realizado multiplicando-se a quantidade de produtos armazenada pelo respectivo preço de transferência (neste caso, utilizado como sendo o preço de custo do material) e, por fim, pelo custo financeiro de estocagem propriamente dito.

As equações 3.15 e 3.16 representam, respectivamente, os custos fixos de operação de cada instalação e de cada processo, e são calculados a partir do status da fábrica ou processo, multiplicado pelo respectivo custo fixo de operação.

A equação 3.17 representa a consolidação do capital investido para abertura e/ou ampliação de capacidade de instalações próprias e processos de produção.

A equação 3.18, por sua vez, é a consolidação de 3.17, compondo o total investido para abertura de instalações, aquisição de processos e ampliações de capacidade durante todo horizonte de planejamento.

A equação 3.19 representa o balanço de ICMS da operação e é composto por oito parcelas, referentes a cada uma das quatro operações de venda e transferência presentes nas equações 3.20, 3.21, 3.22 e 3.23 e as respectivas parcelas de transporte, presentes nas equações 3.24, 3.25, 3.26 e 3.27. As quatro primeiras parcelas são compostas pela multiplicação de quatro itens: quantidade de expedição, preço de venda ou transferência, alíquota de ICMS e diferimento de ICMS. As parcelas relativas ao ICMS de transporte são compostas pela multiplicação da distância entre locais, quantidade transportada, custo unitário de transporte, alíquota de ICMS referente às respectivas origens-destinos. A principal diferença entre as parcelas é a

origem do produto, se é adquirido por meio de compra com terceiros (IEa) ou recebido via transferência de outra instalação própria (IEb) e a saída do produto, se é transferido a outra instalação própria (ISb) ou se é vendido a um terceiro/cliente (ISa). A Tabela 3.1, a seguir, apresenta cada uma das parcelas de acordo com a origem, destino e tipo de operação.

Tabela 3.1 - Características básicas dos modelos apresentados

Referência	Parcela	Origem	Destino	Operação
3.20	$IEa_{spr,t}$	Terceiros	Própria	Venda
3.21	$IEb_{spr,t}$	Própria	Própria	Transferência
3.22	$ISa_{spr,t}$	Própria	Própria	Transferência
3.23	$ISb_{spr,t}$	Própria	Clientes	Venda
3.24	$ITEa_{spr,t}$	Terceiros	Própria	Venda
3.25	$ITEb_{spr,t}$	Própria	Própria	Transferência
3.26	$ITSa_{spr,t}$	Própria	Própria	Transferência
3.27	$ITSb_{spr,t}$	Própria	Clientes	Venda

Fonte: Elaboração do autor

Por fim, a equação 3.28 representa o custo total para atendimento integral da demanda de todos os clientes, a partir de instalações próprias.

3.3.6. Modelo matemático

Tem-se então:

Minimizar os custos totais próprios para atendimento integral da demanda de todos os clientes durante todo horizonte de planejamento.

$$Minimizar\ FO = \sum_{t} CTO_t \tag{3.29}$$

Sujeito a:

Atendimento integral da demanda do cliente (i), pelo produto (p), no período (t).

$$\sum_{spr}\sum_{m}\left(xE_{spr,i,p,m,t} * ARCO_{spr,i} * MODO_{spr,i,m}\right) \geq DEM_{i,p,t};\ \forall i,p,t. \tag{3.30}$$

Limita a quantidade (toneladas) de produção do produto (p), na instalação de fornecedores (ter), durante o período (t) de acordo com a capacidade de produção deste terceiro (ter), para cada produto (p) durante cada período (t).

$$xP_{ter,p,t} \leq CapP_{ter,p,t};\ \forall ter, p, t \tag{3.31}$$

Limita a expedição de produtos originados nas instalações de terceiros (ter), para todos os locais de destino, do produto (p), utilizando o modo de transporte (m), durante o período (t) de acordo com a produção do produto (p), por esta instalação terceira (ter), durante o mesmo período (t).

$$\sum_{dest}\sum_{m}\left(xE_{ter,dest,p,m,t} * ARCO_{ter,dest} * MODO_{ter,dest,m}\right) \leq xP_{ter,p,t};\ \forall ter, p, t. \tag{3.32}$$

Assegura que os atributos (ch) associados ao produto acabado (pa), produzido na fábrica (k) durante o período (t), correspondem aos atributos (ch) fornecidos pelas matérias primas (mp) utilizadas na composição do produto acabado (pa), durante o período (t).

$$xP_{k,pa,t} * QCH_{pa,ch} \geq \sum_{mp}\left(xU_{k,mp,t} * QCH_{mp,ch}\right);\ \forall k, pa, t, ch. \tag{3.33}$$

Balanço de massa, assegurando que a combinação de matérias primas (mp) utilizadas foram integralmente convertidas em produto acabado (pa), na instalação (k).

$$xP_{k,pa,t} = \sum_{mp} xU_{k,mp,t};\ \forall k, pa, t. \tag{3.34}$$

Assegura que a utilização (horas) do processo (pr), instalado na fábrica (k), necessário para produção de determinados produtos durante o período (t) seja limitada pela disponibilidade (horas) deste mesmo processo.

$$\sum_{pa} xP_{k,pa,t} * HPrcP_{pa,pr} \leq zP_{k,pr,t} * PrcP_{k,pr} * HDISP_t;\ \forall k, pr, t. \tag{3.35}$$

Limita a quantidade (toneladas) de produção na fábrica (k), durante o período (t) de acordo com a capacidade de produção desta fábrica, caso ela esteja disponível (aberta).

$$\sum_{p} xP_{k,p,t} \leq CapP_k * zS_{k,t};\ \forall k, t. \tag{3.36}$$

Balanço de massa na fábrica (t), para a matéria prima (mp), durante o período (t).

$$\begin{aligned} xA_{k,mp,t} = xA_{k,mp,t-1} & \\ & + \sum_{orig} \sum_{m} \left(xE_{orig,k,mp,m,t} * ARCO_{orig,k} * MODO_{orig,k,m}\right) \\ & - \sum_{dest} \sum_{m} \left(xE_{k,dest,mp,m,t} * ARCO_{k,dest} * MODO_{k,dest,m}\right) \\ & - xU_{k,mp,t}; \forall k, mp. \end{aligned} \tag{3.37}$$

Balanço de massa na fábrica (k), para o produto acabado (pa), durante o período (t).

$$\begin{aligned} xA_{k,pa,t} = xA_{k,pa,t-1} + xP_{k,pa,t} & \\ & + \sum_{orig} \sum_{m} \left(xE_{orig,k,pa,m,t} * ARCO_{orig,k} * MODO_{orig,k,m}\right) \\ & - \sum_{dest} \sum_{m} \left(xE_{k,dest,pa,m,t} * ARCO_{k,dest} \right. \\ & \left. * MODO_{k,dest,m}\right); \forall k, pa. \end{aligned} \tag{3.38}$$

Balanço de massa na instalação sem capacidade de produção (ssp), para o produto (p), durante o período (t).

$$xA_{ssp,cap,p,t} = xA_{ssp,p,t-1} + \sum_{orig}\sum_{m}\left(xE_{orig,ssp,p,m,t} * ARCO_{orig,ssp} * MODO_{orig,ssp,m}\right) - \sum_{dest}\sum_{m}\left(xE_{ssp,dest,p,m,t} * ARCO_{ssp,dest} * MODO_{ssp,dest,m}\right); \forall ssp, p. \quad (3.39)$$

Limita a quantidade (toneladas) de produtos movimentados na instalação (spr), durante o período (t), de acordo com a capacidade de movimentação desta instalação, caso ela esteja disponível (aberta).

$$xM_{spr,t} \leq CapM_{spr} * zS_{spr,t}; \forall spr, t. \quad (3.40)$$

Limita a quantidade (toneladas) de produtos armazenados na instalação (spr), durante o período (t), de acordo com a capacidade de armazenagem desta instalação, caso ela esteja disponível (aberta).

$$\sum_{p} xA_{spr,p,t} \leq CapA_{spr} * zS_{spr,t}; \forall spr, t. \quad (3.41)$$

Limite de capital (R$) que pode ser investido para abertura de instalações, aquisição de processos e ampliação de capacidade em cada período (t).

$$CIPER_t \leq INVP_t;\ \forall t. \quad (3.42)$$

Limite de capital (R$) que pode ser investido para abertura de instalações, aquisição de processos e ampliação de capacidade durante todo horizonte de planejamento.

$$\sum_{t} CIPER_t \leq INVT \quad (3.43)$$

Limitação do balanço de ICMS assegurando saldo credor nas instalações (spr), durante todo horizonte de planejamento.

$$\sum_{t} BICMS_{spr,t} \leq 0;\ \forall spr. \tag{3.44}$$

Perpetuidade da instalação (spr), durante os períodos (t) do horizonte de planejamento. Uma vez aberta, a instalação permanece aberta durante todo restante do horizonte de planejamento. Uma vez expandido o nível de capacidade da instalação, ele também permanece expandido durante todo restante do horizonte de planejamento.

$$zS_{spr,t} \geq zS_{spr,t-1}; \forall spr. \tag{3.45}$$

Perpetuidade do processo (pr), na fábrica (k), durante os períodos (t) do horizonte de planejamento. Uma vez instalado, o processo permanece aberto durante todo restante do horizonte de planejamento. Uma vez expandido o nível de capacidade do processo, ele também permanece expandido durante todo restante do horizonte de planejamento.

$$zP_{k,pr,t} \geq zP_{k,pr,t-1}; \forall k, pr. \tag{3.46}$$

Limita a um número máximo a quantidade de fábricas que podem ser abertas durante cada período (t).

$$\sum_{k} yS_{k,t} \leq FAB; \forall t. \tag{3.47}$$

Limita a um número máximo a quantidade de CDs primários que podem ser abertos em cada período (t).

$$\sum_{j} yS_{j,t} \leq CDP; \forall t. \tag{3.48}$$

Limita a um número máximo a quantidade de CDs secundários que podem ser abertos em cada período (t).

$$\sum_{r} yS_{r,t} \leq CDS; \forall t. \tag{3.49}$$

Restrições auxiliares que vinculam a abertura de qualquer capacidade da instalação própria (spr), com a variável binária referente ao status desta instalação, $\forall spr, t$.

$$zS_{spr,t} * CapP_{spr} \leq yS_{spr,t} * M \tag{3.50}$$

$$zS_{spr,t} * Cap\mathrm{M}_{spr} \leq yS_{spr,t} * M \tag{3.51}$$

$$zS_{spr,t} * CapA_{spr} \leq yS_{spr,t} * M \tag{3.52}$$

Limita a um número máximo a quantidade de processos (pr) que podem ser abertos em cada nível de capacidade da fábrica (k), durante o período (t); $\forall k, pr, t$.

$$zP_{k,pr,t} \leq PRC \ * zS_{k,t} \tag{3.53}$$

$$zP_{k,pr,t}, zS_{spr,t} \in \{\mathbb{Z}\}; \ \forall spr, k, pr, t. \tag{3.54}$$

$$yS_{spr,t} \in \{0,1\}; \ \forall spr, t. \tag{3.55}$$

A seguir são apresentadas explicações mais detalhadas sobre as restrições.

A restrição 3.29 representa a função objetivo do modelo matemático proposto. O objetivo é a minimização do custo total da cadeia durante todo horizonte de planejamento. O custo total da cadeia em cada período é obtido a partir da equação 3.28, explicada anteriormente.

A restrição 3.30 representa a obrigatoriedade do atendimento integral da demanda de todos os clientes, sendo que este atendimento deve ser realizado somente a partir de instalações próprias, somente utilizando-se os modos de transporte aceitos pelo

cliente, porém sem limitação do número de origens de produto, ou seja, um cliente pode ser atendido por mais de uma instalação própria.

As restrições 3.31 e 3.32 limitam, respectivamente, a quantidade de produção de acordo com a capacidade de produção e a capacidade de expedição de acordo com a capacidade de produção para as instalações de terceiros (fornecedores e concorrentes).

A restrição 3.33 é semelhante à restrição do problema da dieta de (STIGLER, 1945). Ela assegura que a mistura de matérias primas utilizadas forneça o mínimo de características que o produto acabado exige (nutrientes, no caso do problema da dieta).

A restrição 3.34 complementa a restrição 3.33, assegurando que a quantidade (toneladas) de produto acabado produzida seja igual à somatória de todas as quantidades (toneladas) de matéria prima utilizada na formulação. Caso ocorresse a geração de algum resíduo que não fosse aproveitado no produto final, seria esta restrição que garantiria que o balanço de massa fosse obedecido (subtraindo-se o montante de resíduo do volume de produto acabado produzido ou multiplicando-se a eficiência da conversão das matérias primas em produtos acabados).

As restrições 3.35 e 3.36 são restrições que limitam a quantidade de produção em cada fábrica. A primeira, de acordo com a necessidade e disponibilidade de tempo (horas) para utilização de cada processo de produção e a segunda, de acordo com a capacidade da instalação como um todo.

As restrições 3.37, 3.38 e 3.39 representam, respectivamente, os balanços de massa de matéria prima e produto acabado (nas fábricas) e de todos os produtos nas instalações que não possuem capacidade produtiva. De maneira genérica, um balanço de massa é formulado da seguinte maneira: Estoque Atual = Estoque Anterior + Produção + Recebimentos – Consumo - Expedições. O que diferencia as restrições é a presença/ausência de algumas parcelas, como consumo de matéria prima em 3.37 e produção de produto acabado em 3.38, que não são necessárias em 3.39.

As restrições 3.40 e 3.41 funcionam de maneira semelhante, limitando, respectivamente, a movimentação e armazenagem de produtos em cada instalação própria de acordo com a capacidade da instalação, caso esteja aberta.

As restrições 3.42 e 3.43 são referentes as limitações de capital para investimento em construção/ampliação da capacidade de instalações próprias e aquisição/ampliação da capacidade de processos de produção. 3.42 limita o gasto em cada período do horizonte de planejamento e 3.43 limita o gasto total acumulado para todo horizonte de planejamento. Esta separação das restrições em cada período e ao longo de todo horizonte de planejamento se faz necessária para auxiliar no planejamento financeiro das empresas, na qual o orçamento do horizonte completo de planejamento pode ser limitado em cada período.

A restrição 3.44 assegura que o balanço de ICMS em cada instalação própria não ficará devedor ao término do horizonte de planejamento.

As restrições 3.45 e 3.46 são restrições que asseguram a perpetuidade das instalações e processos de produção, bem como a ampliação das respectivas capacidades. Uma vez aberto uma instalação e/ou processo de produção, permanecerão abertos durante todo horizonte de planejamento, tal como ocorre com as ampliações de capacidade. 3.45 é específica para instalações próprias e 3.46 para processos de produção em cada fábrica.

As restrições 3.47, 3.48 e 3.49 são referentes à limitação da quantidade de cada tipo de instalação própria que pode ser aberta ao longo do horizonte de planejamento (respectivamente: número máximo de fábricas, CDs primários e CDs secundários). A variável inteira referente ao status e nível de capacidade de cada instalação, $(v_Status_Sites_Int_{spr,t})$, está vinculada à uma variável binária, $(v_Status_Sites_Bin_{k,t})$, que assume valor 1 sempre que a variável inteira possui valor maior que zero. Desta forma, é possível limitar a quantidade de instalações abertas por tipo de instalação ao limitar a somatória das variáveis binárias para cada tipo de instalação. Este vínculo é efetuado pelas restrições auxiliares 3.50, 3.51 e 3.52.

A restrição 3.53 é análoga às restrições 3.47, 3.48 e 3.49, porém é utilizada para limitar a quantidade de processos de produção em cada fábrica sendo que esta quantidade está ligada diretamente ao nível de capacidade da mesma.

As restrições 3.54 e 3.55 representam a natureza das variáveis, inteiras e binárias, respectivamente.

3.3.7. Origens das equações do modelo

O presente item buscou apresentar diversas técnicas de modelagens utilizadas na literatura para capturar aspectos práticos que impactam no funcionamento da cadeia de suprimentos.

Toregas et al. (1971) foi o pioneiro na modelagem matemática de problemas relacionados à cobertura de instalações (*Set Covering Problems* – SCP). Foi desenvolvido ao tentar otimizar a localização centros de serviços de emergência, tais como estações do corpo de bombeiros. Esse problema possui uma característica muito específica, na qual a distância e/ou tempo máximos entre a estação de serviço e o usuário são parâmetros cruciais. Estes parâmetros binários (local respeita/não respeita os requisitos de distância/tempo máximo para atendimento ao usuário) foi modelado da seguinte maneira:

i: nós de demanda;

j: instalações;

N_i: conjunto de localizações potenciais em que o tempo de resposta (S) é maior que o tempo necessário entre instalações e os nós de demanda (d_{ij}). Em notação matemática: $N_i = \{j | d_{ij} \leq S\}$.

No modelo matemático proposto, essa lógica de modelagem foi utilizada para determinar se um processo de produção pode ser instalado em determinada fábrica ou não e se determinado fluxo origem-destino pode ser percorrido ou não.

Melkote e Daskin (2001a) citam uma série de modelos tidos como clássicos na literatura sobre localização de instalações. O modelo de Kuehn e Hamburger (1963) é um deles por ser o primeiro a resolver problemas de localização fábricas e armazéns

com englobando custos e capacidades de maneira conjunta. A motivação do trabalho argumentada pelos autores foi a de que armazéns regionais podem executar uma variedade de funções na distribuição. Algumas delas incluem: a redução dos custos de transporte quando comparados ao embarque direto aos clientes, permitindo embarques consolidados e com maior ocupação entre fábrica e armazém; a redução dos custos de entrega através da combinação em remessas individuais de produtos fabricados em várias fábricas e a melhoria das relações com os clientes, diminuindo tempo de entrega em relação ao embarque direto da fábrica e permitindo assim que os clientes reduzam seus estoques. Para abordar estas características, Kuehn e Hamburger (1963) modelaram o problema da seguinte maneira:

X_{hijk}: quantidade do produto h enviado da fábrica i através do armazém j para o cliente k;

A_{hij}: custo unitário de transportar o produto h da fábrica i para o armazém j;

B_{hjk}: custo unitário de transportar o produto h do armazém j para o cliente k;

$C_{hj}\left(\sum_{ik} X_{hijk}\right)$: custo total da operação do armazém ao processor o produto h no armazém j. Sem perda de generalização, é possível expressar esta função como a soma de F_j e S_{hj} definidas como:

F_j: custo fixo por unidade de tempo de operação do armazém j;

S_{hj}: custo variável de operar o armazém j por unidade h processado;

Q_{hk}: quantidade do produto h demandado pelo cliente k;

W_j: capacidade do armazém j;

Y_{hi}: capacidade da fábrica i de produzir o produto h;

$$Z_j = \begin{cases} 1 & \sum_{ik} X_{hijk} > 0 \\ 0 & Caso\ contrário\ \left(\sum Z_j = número\ de\ armazéns\ utilizados\right) \end{cases}$$

Função Objetivo - Minimizar os custos totais do sistema:

$$Min\ \sum_{hijk}\left(A_{hi} + B_{hjk}\right)X_{hijk} + \sum_j F_j Z_j + \sum_{hj} S_{hk}\left(\sum_{ik} X_{hijk}\right)$$

Sujeito a:

$\sum_{ij} X_{hijk} = Q_{hk}$: Atendimento da demanda do cliente k, pelo produto h.

$\sum_{jk} X_{hijk} \leq Q_{hk}$: Capacidade máxima da fábrica i de produzir o produto h.

$\sum_{hi} \ X_{hijk} \leq \ W_j$: Capacidade do armazém j.

No modelo matemático proposto, esta mesma lógica foi utilizada para assegurar o atendimento integral da demanda dos clientes e para restrições não só de produção, mas também de movimentação e armazenagem de produtos todas as instalações próprias. Uma adaptação foi realizada ao substituir a variável binária Z_j por uma variável inteira e multiplicando-a pelos parâmetros de capacidade das fábricas e armazéns. Desta maneira, foi possível incluir expansões modulares de capacidade associadas a aumentos modulares de custo de operação destas instalações.

Melkote e Daskin (2001b) apresentam um modelo determinístico de localização de instalações capacitadas e desenho da cadeia, com decisão de localização em somente uma camada, um produto e um período. Apesar de ser um modelo semelhante ao de Kuehn e Hamburger (1963), os autores incluíram uma restrição de balanço de massa nas instalações, crucial em problemas com mais de uma alternativa para fluxo de produtos. Esta restrição foi apresentada da seguinte maneira:

$\sum_{j \in N} Y_{ij} + d_i = \sum_{j \in N} Y_{ij} + W_i \quad \forall \, i \in N,$

onde:

Y_{ij}: fluxo no link (i, j);

d_i: demanda no nó i;

W_i: demanda total atendida por uma instalação no nó i.

Dias, Captivo e Clímaco (2007), autores que abordaram o problema de localização dinâmica ou multi-períodos, comentam que este tipo de modelagem é uma generalização do modelo de Kuehn e Hamburger (1963), que considera a localização de instalações ao longo de um horizonte de planejamento e em cada período deste

horizonte, existe a garantia de atendimento de todos os clientes por alguma instalação operante.

Um dos primeiros autores a abordar o assunto, Erlenkotter (1981), argumenta a existência de duas características essenciais que determinam a necessidade do uso de modelos de localização dinâmica: a primeira é a necessidade de mudanças em demanda e/ou custo ao longo do tempo e a segunda é a existência de custos significativos para realocar ou redimensionar as instalações utilizadas. Na ausência da primeira característica, a aplicação já seria suficiente e na ausência da segunda característica, uma série de modelos simples de localização desconectados atenderia o problema. Assumindo que ambas as características estejam presentes, o autor propõe a seguinte formulação em um horizonte discreto de tempo.

x_{ijt}: quantidade produzida e enviada da fonte i par o local de demanda j no período t;

D_{jt}: demanda j que precisa ser atendida no período t.

$\sum_i x_{ijt} \geq D_{jt} \; \forall \, j, t$: atendimento integral da demanda j em todos os períodos t.

Apesar de ser uma modificação simples do modelo de Kuehn e Hamburger (1963), a adição de um novo índice exclusivamente para o período possibilita a extrapolação de índices para outras finalidades, tais como possibilidades de modos de transporte entre a fábrica e um mercado consumidor e até mesmo a introdução de múltiplos produtos, conforme estudado por Geoffrion e Graves (1974) em seu modelo de localização de instalações capacitadas e multiproduto.

Barros, Dekker e Scholten (1998) desenvolveram um modelo de localização multicamadas no campo da logística reversa para resolver um problema de reciclarem de resíduos de construção civil, com decisões de localização de depósitos regionais e instalações de tratamento de areia para receber e tratar recebida de diversas fontes e posteriormente enviá-la para os locais de consumo de areia. Os autores, além de utilizarem balanço de massa em cada uma das instalações, também adicionaram 2 variáveis binárias, simbolizando o status (aberta/fechada) das instalações potenciais multiplicando os respectivos parâmetros de capacidade.

u_{ij}: quantidade de areia peneirada enviada da estação de classificação i até armazém j;

v_{jk}: quantidade de areia poluída enviada do armazém j para estação de tratamento k;

H_j: capacidade máxima de armazenagem no armazém regional j;

R_k: capacidade máxima de processamento da estação de tratamento k;

f_j: custo fixo de abertura do armazém regional j;

g_k: custo fixo de abertura da estação de tratamento k;

y_j, z_k: variáveis binárias. 1 se instalação é aberta, 0 caso contrário.

$\sum_i u_{ij} \leq H_j y_j \ \forall j$: Limite de capacidade de armazenagem nas instalações.

$\sum_j v_{jk} \leq R_k z_k \ \forall k$: Limite de capacidade de processamento nas instalações.

Com esta modelagem, caso a variável binária assuma valor 1 (instalação aberta), além de limitar a capacidade de processamento da unidade, o custo fixo de abertura da instalação também passaria a influenciar os custos totais do sistema.

Dentre as diversas contribuições do modelo proposto por Jayaraman, Guide e Srivastava (1999), os autores introduzem uma restrição para controlar o número de instalações que serão abertas.

$\sum_j Z_j \leq P$, tal que:

P: número máximo de instalações que podem ser abertas.

z_j: status (aberta/fechada) da instalação j.

Com está técnica de modelagem é possível não só controlar a abertura de novas unidades, mas também extrapolar para o controle do número de expansões modulares (caso de variáveis inteiras) de capacidade das instalações e/ou processos de produção.

Cordeau, Pasin e Solomon (2006) desenvolveram um modelo capaz de resolver o problema de configuração da cadeia de uma empresa de manufatura utilizando uma formulação flexível que integra decisões de capacidade e localização de plantas e armazéns multiprodutos com seleção de fornecedores, modais de transporte e requisitos de matéria prima para fabricação de produtos acabados. Dentre as contribuições dos autores, as restrições propostas que merecem atenção são:

X_{od}^{km} = Quantidade do produto k fornecido por o para d usando o modo de transporte m;

M_{od} = Conjunto de modos de transporte entre o e d;

g_{od}^{m} = Capacidade do modo m entre o e d;

Z_{od}^{m} = 1 se o modo m é selecionado entre o e d, 0, caso contrário.

b^{rf} = Quantidade de matéria prima r no produto f;

$\sum_k g^{km} X_{od}^{km} - g_{od}^{m} Z_{od}^{m} \leq 0 \; \forall \; o, d, m$: Restrições de capacidade nos modos de transporte

$\sum_s \sum_m X_{sp}^{rm} - \sum_f \sum_w \sum_m b^{rf} \, X_{pc}^{fm} = 0 \; \forall \; r, p$: total de matéria-prima r enviado para a planta p é igual ao total de requerimentos da planta que serão expedidos para o cliente c.

Melachrinoudis e Min (2000) estudam decisões de realocação e *phase-out* de empresas para adaptá-las de modo dinâmico às mudanças que ocorrem no ambiente de negócios na qual estão inseridas. O modelo proposto é oriundo de um estudo de caso realizado em uma empresa que precisou realocar suas fábricas e armazéns (considerando *phase-out*) e foi desenhado para auxiliar a gerência da empresa em questão a formular estratégias mais efetivas de realocação tem em vista limites de orçamento para operação e manutenção das instalações. Para essa restrição específica, os autores propuseram a seguinte modelagem:

$\sum_i (c_i^t + w_i^t) x_i^t + \sum_{ij} S_{ij}^t y_{ij}^t + \sum_{i=1}^{I-1} r_i^t \pi_i^t \leq B^t \quad \forall \; t$: Limita custos de operação ao orçamento planejado, tal que:

c_{ti}: custo variável unitário de produção da instalação i, no período t, descontado no início do horizonte de tempo;

w_{ti}: custo variável unitário de armazenagem na instalação i, no período t, descontado no início do horizonte de tempo;

x_{ti}: quantidade produzida pela instalação i, no período t;

s_{tij}: custo unitário de transporte da instalação i para o cliente j no período t descontado no início do horizonte de tempo;

y_{tij}: número de produtos expedidos da instalação i para o cliente j, no período t;

r_{ti}: custo unitário de realocação de capacidade de produção de uma instalação existente para uma instalação i, no período t, descontado no início do horizonte de tempo;

π_{Iti}: capacidade de produção transferida da instalação existente para instalação i, no período t.

3.3.8. Análise de competitividade

Para a realização da análise de competitividade, é necessária a realização de uma estimativa do custo total oferecido pelos concorrentes para o atendimento da demanda dos clientes. A partir desta estimativa, uma comparação com os custos próprios é realizada para cada cenário de otimização avaliado pelo modelo matemático e posteriormente os custos próprios (de cada cenário) são comparados com os oferecidos pelos concorrentes para análise e seleção do cenário que oferece o maior potencial de captura da demanda prevista.

Foi realizada uma simplificação na determinação do custo de atendimento de cada cliente para manter a linearidade do modelo matemático. A simplificação incluiu o cálculo de um custo total unitário (por tonelada de produto produzido) da operação da malha logística desenhada. Este custo unitário abrange os custos variáveis de produção, movimentação, armazenagem e estocagem, aquisição de produtos de terceiros e impostos em todas as operações até o posicionamento do produto acabado

na instalação que realiza a distribuição para o cliente final. As equações utilizadas para estes cálculos estão apresentadas e comentadas a seguir.

Custo total (R$) para o concorrente atender à demanda do cliente (i), do produto (p), durante o período $(t), \forall i, p, t$.

$$CONC_{i,p,t} = \sum_{c} DIST_{c,i} * DEM_{i,p,t} + \sum_{c} DEM_{i,p,t} * PrV_{c,p,t} * \left(1 + ICMS_{c,i}\right) \tag{3.56}$$

Custo unitário total próprio (R$/tonelada) para operação da malha logística desenhada, $\forall i, p, t$.

$$CUT = \frac{CTO}{\sum_i \sum_p \sum_t DEM_{i,p,t}} \tag{3.57}$$

Custo total (R$) de atendimento da demanda do cliente (i) pela empresa, do produto (p), no período $(t), \forall i, p, t$.

$$CPT_{i,p,t} = CTDistr_{i,p,t} + CUT \tag{3.58}$$

3.56 é o parâmetro que calcula e armazena o custo total incorrido pela empresa competidora pelo atendimento integral da demanda de cada cliente durante todos os períodos. É composto pela soma de duas parcelas, custo de transporte e valor de venda do produto (acrescido da alíquota de ICMS correspondente à cada transação).

3.57 representa o custo unitário (por tonelada) da malha logística que suporta o atendimento integral da demanda de cada cliente durante todos os períodos. O custo unitário é um artifício utilizado para diluir os custos da cadeia em cada igualmente em cada tonelada de produto entregue ao cliente final. Essa foi uma simplificação utilizada no modelo, que apesar das críticas na literatura em transformar custos fixos em variáveis, a não elasticidade da demanda, aliada à obrigatoriedade do atendimento

integral da mesma garante que os custos fixos não sejam cobrados acima ou abaixo do montante real.

3.58 representa o custo de atendimento ao cliente a partir das instalações próprias.

3.4. Aplicação no problema exemplo

3.4.1. Apresentação

A fim de demonstrar a capacidade de solução do modelo matemático proposto em problemas que abrangem todas as características abordadas no tópico anterior, inclusive a avaliação de competitividade dos cenários avaliados, o seguinte problema de dimensões reduzidas é proposto.

Estrutura física:

- 1 fornecedor internacional;
- 1 porto;
- 1 fornecedor nacional;
- 1 concorrente;
- 3 clientes;
- 2 fábricas potenciais;
- 2 CDs primários potenciais;
- 1 CD regional potencial;

Processos de produção:

- 3 processos potenciais em cada uma das 2 fábricas;

Produtos:

- 2 matérias primas e 1 produto industrializado, todos com características (nutrientes) definidas;

Transporte e distribuição:

- 2 modais distintos para todas as possibilidades origem-destino;

Períodos:

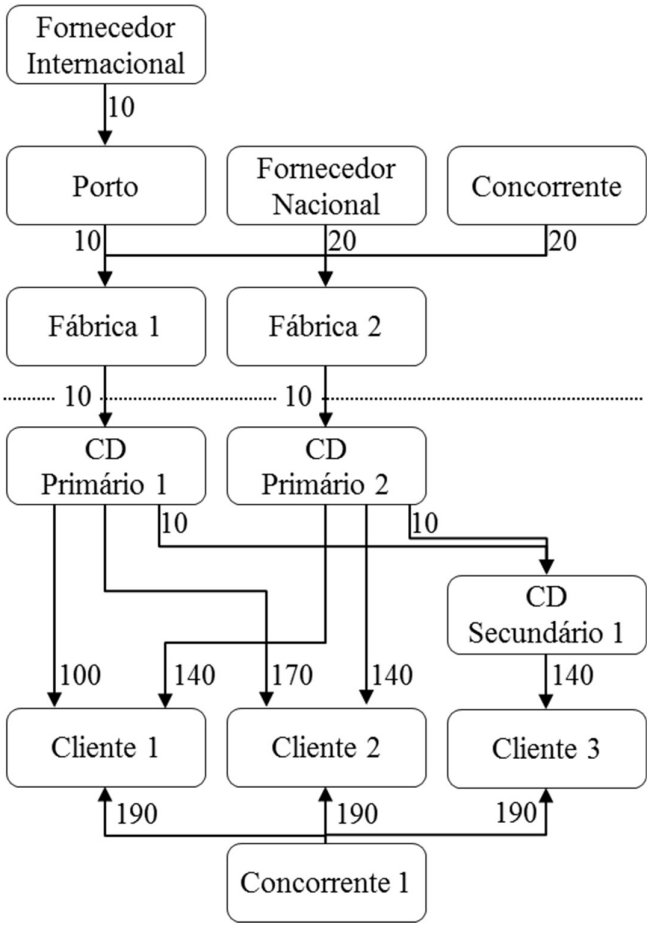
- 4 períodos;

Custos:

- aquisição de matéria prima;
- investimento em instalações;
- investimento em capacidade de produção, movimentação e armazenagem;
- custo financeiro de estoque;
- custo fixo das instalações e equipamentos;
- custo variável de produção;
- transferência e distribuição dos produtos;
- impostos (ICMS).

Por ser um modelo extenso e complexo, com diversos parâmetros de entrada, variáveis e restrições, discernir o real impacto e magnitude da influência que cada parcela do modelo exerce no resultado torna-se um trabalho difícil. Para preservar o caráter didático deste trabalho, esses parâmetros foram configurados de tal maneira que os custos de transporte fossem os custos mais relevantes da cadeia, facilitando a comparação com os custos oferecidos pela empresa concorrente para o atendimento integral da demanda dos clientes (sem prejudicar a atuação das demais restrições do modelo, tais como de capacidade e abertura e expansão da capacidade de processos e instalações, limitações de investimento, balanços de massa, etc.). Sendo assim, os principais parâmetros de entrada foram resumidos na Figura 3.2 que segue.

Figura 3.2 – Custos de transporte entre as instalações presentes no problema exemplo.



Fonte: Elaboração própria

3.4.2. Implementação e execução computacional

O modelo matemático proposto foi construído na plataforma AIMMS, utilizando-se do CPLEX 12.6 como motor de solução, rodando em um computador com processador Intel Core i7-6500U 2.50GHz com 8GB de memória RAM e sistema operacional Windows 10 Home.

3.4.3. Apresentação dos resultados

Foram selecionados três cenários de otimização para realizar a apresentação dos resultados. O primeiro cenário, chamado de “cenário livre”, como o próprio nome sugere, não possuía restrições específica com relação a localização das instalações. Já o segundo cenário, chamado de “Fábrica 2 fixa”, especificava a obrigatoriedade da construção da fábrica 2 e mantinha livre a escolha da construção ou não de centros

de distribuição e o terceiro cenário é aquele em que o concorrente atende 100% da demanda prevista.

O resultado do cenário livre de minimização de custos prioriza o atendimento aos clientes com produtos produzidos na fábrica 1 e distribuição realizada pelo CD primário 1 e CD secundário 1. Já a o Cenário 2 adota a configuração que prioriza o atendimento aos clientes com produtos produzidos na fábrica 2 e distribuição realizada pelo CD primário 2 e CD secundário 1. A comparação dos custos totais de cada cenário está resumida na Tabela 3.2 a seguir.

Tabela 3.2 - Custo total (por tonelada) para atendimento de cada cliente de acordo com o cenário avaliado

Clientes	Abordagem para solução do problema		Concorrente
	Cenário Livre	Cenário 2	
1	130	170	190
2	200	170	190
3	180	180	190
Custo total (R$)	510	520	570

Fonte: Elaboração própria

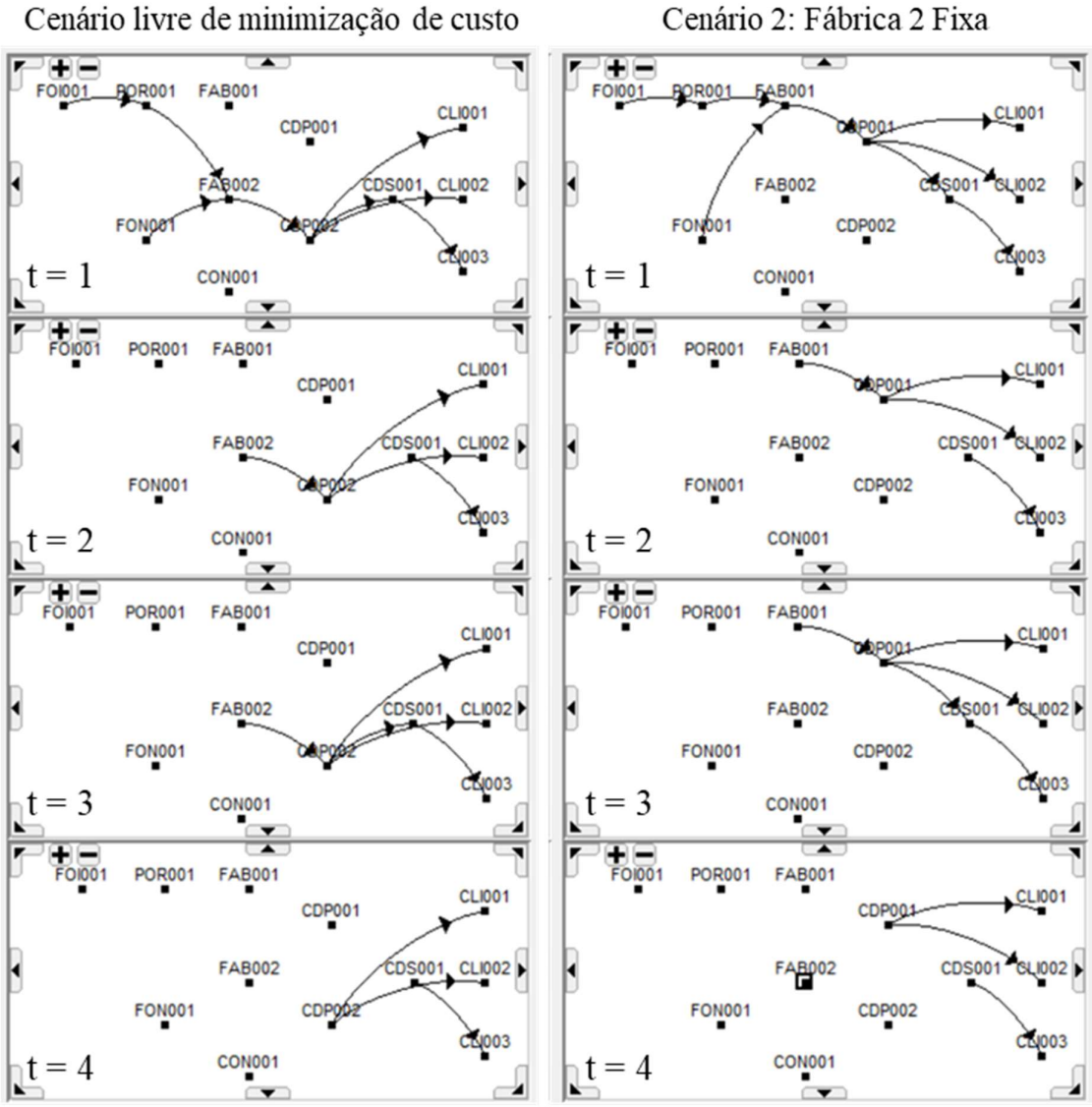
Como é possível notar pela escala de cores, apesar do cenário livre proporcionar o menor custo total para a cadeia, o custo atingido para atendimento do cliente 2 ficou acima do praticado pelo concorrente, o que, de acordo com as características competitivas do mercado deste problema exemplo, significaria que a venda seria perdida para o concorrente.

O mesmo não se pode dizer dos preços praticados no Cenário 2. Apesar do custo total superior ao da abordagem de minimização de custo pura, o cenário competitivo proporciona custos consistentemente menores que os ofertados pelo concorrente, ou seja, seria factível atender a 100% do mercado disponível no problema, não entrando no mérito de alterar a metodologia de custeio empregada, na qual uma operação não subsidia outra.

A **Figura 3.3** – Comparação dos resultados de cenários de otimização com a abordagem de minimização clássica de custos X avaliação competitiva dos resultados para os clientes.Figura 3.3, que segue, apresenta os fluxos dos produtos (matérias

primas e produtos acabados), em cada período, comparando a abordagem competitiva e a abordagem de minimização de custos.

Figura 3.3 – Comparação dos resultados de cenários de otimização com a abordagem de minimização clássica de custos X avaliação competitiva dos resultados para os clientes.



Fonte: Elaboração do autor

3.4.4. Discussão dos resultados e considerações finais

A discussão sobre qual cenário deveria ser adotado pela empresa gera uma discussão que, dependendo da quantidade de variáveis envolvidas, leva a uma argumentação sem profundidade por parte dos tomadores de decisão. Uma das variáveis que o presente trabalho tentou avaliar, foi o impacto de empresas competidoras durante a

otimização do desenho da cadeia. Porém, somente esta afirmação não oferece argumentos suficientes para explicar as vantagens de se adotar uma ou outra abordagem. Antes da avaliação sobre o cenário ideal a ser adotado, faz-se necessário retomar brevemente alguns conceitos sobre competição no contexto empresarial.

Para abordar de maneira completa a característica competitiva do modelo, Plastria (2001) e Farahani et al. (2014) sugerem avaliar previamente algumas informações sobre a cadeira de suprimentos na qual a empresa está inserida:

- se o mercado é um monopólio, oligopólio ou competição pura;
- se a competição é estática, dinâmica sem reação dos competidores ou dinâmica com antecipação dos competidores;
- se a demanda é elástica ou inelástica;
- se o mercado é determinístico ou probabilístico;
- quais os critérios de competição mais prezados pelo mercado: preço, nível de serviço, distância, qualidade do produto, dentre diversos outros fatores.

Tendo isto em mente, caso os produtos dessa empresa possuam características superiores às do concorrente, e estas sejam características apreciadas pelos clientes (critério ganhador de pedido), a abordagem de minimização de custos (cenário 2) seria a decisão aconselhável.

Caso os produtos sejam padronizados no mercado e o critério preço do produto (custo de aquisição) seja a característica mais apreciada pelos clientes, o resultado do cenário indicado pela abordagem competitiva seria a melhor opção (Cenário 1), dado que é possível proporcionar ao cliente custos consistentemente menores que os oferecidos pelo concorrente, ao passo que no Cenário 2, o custo de atendimento do cliente 2 é superior ao proporcionado pelo concorrente, fazendo com que o concorrente capture esta fatia do mercado.

A qualidade da decisão sobre o melhor cenário depende diretamente da qualidade e quantidade de informações disponíveis, com o *trade-off* da complexidade crescente de avaliar um volume elevado de informações de maneira conjunta.

Proporcionar esta clareza na tomada de decisões, nas quais diversos fatores estão envolvidos, é uma das maiores vantagens que modelos de otimização podem oferecer aos tomadores de decisão e modelos abrangentes, que avaliam estes fatores de maneira conjunta, oferecem vantagens competitivas importantes às empresas que os utilizam consistentemente.

3.5. Procedimento experimental e aplicação em caso real

3.5.1. Apresentação

Para a aplicação em um caso real, foi escolhido o setor de fertilizantes, regulamentado de acordo com o decreto nº 4.954, de 14 de janeiro de 2004, presente na lei nº 6.894, de 16 de dezembro de 1980, disposta no APÊNDICE A – Legislação vigente acerca de fertilizantes.

Nos termos da lei, são considerados fertilizantes toda substância mineral ou orgânica, natural ou sintética, fornecedora de um ou mais nutrientes de plantas. Os fertilizantes são subdivididos em 14 classes, iniciando com fertilizante mineral: produto de natureza fundamentalmente mineral, natural ou sintético, obtido por processo físico, químico ou físico-químico, fornecedor de um ou mais nutrientes de plantas, até fertilizante organomineral: produto resultante da mistura física ou combinação de fertilizantes minerais e orgânicos. Uma das características que atuam como critério para a subdivisão proposta na lei é relacionada aos nutrientes presentes em cada tipo de fertilizante. Nutrientes são definidos na mesma lei como sendo elementos essenciais ou benéficos para o crescimento e produção dos vegetais, subdividindo-os em macronutrientes primários, macronutrientes secundários e micronutrientes.

Dentre todas as classificações, decidiu-se trabalhar apenas com a classe dos fertilizantes com micronutrientes, ou seja, produtos que contém micronutrientes, isoladamente ou em misturas destes com outros nutrientes.

3.5.2. Panorama do Setor de fertilizantes

A fim de contextualizar adequadamente o problema, este tópico apresenta um panorama sobre o setor de fertilizantes, primeiramente falando sobre os fertilizantes propriamente ditos, em seguida sobre o setor no contexto mundial, posteriormente sobre o setor no contexto brasileiro, com dados históricos tanto do abastecimento quanto.

3.5.2.1. Sobre fertilizantes

Os fertilizantes têm como principal função repor ao solo os elementos retirados em cada colheita, com a finalidade de manter ou mesmo ampliar o seu potencial produtivo (BNDES, 2006).

Os elementos imprescindíveis utilizados pelos vegetais são chamados de nutrientes essenciais sendo que dentre os nutrientes mais importantes encontrados na natureza e necessários ao desenvolvimento de plantas destacam-se os macro nutrientes primários, como N (nitrogênio), P (fósforo) e K (potássio), que quando misturados, passam a ser também conhecidos como fórmulas NPK, os macro nutrientes secundários, como Cálcio (Ca), Magnésio (Mg) e Enxofre (S) e por fim os micronutrientes, tais como Boro (B), Cloro (Cl), Cobre (Cu), Ferro (Fe), Manganês (Mn), Molibdênio (Mo), Zinco (Zn), Cobalto (Co) e Silício (Si) (FERTILIZANTES HERINGER, 2017).

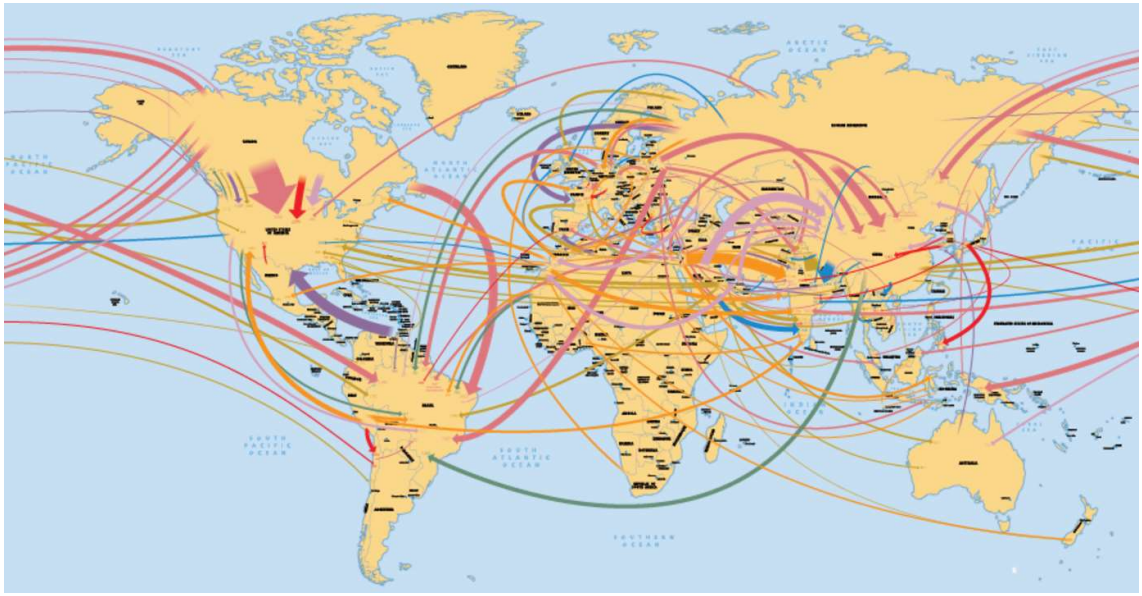
Embora a produção agrícola também seja influenciada por fatores como o aperfeiçoamento de sementes, condições meteorológicas, subsídios e instabilidade política, a participação dos fertilizantes é fundamental para o aumento do rendimento físico da agricultura (BNDES, 2006).

3.5.2.2. Fertilizantes no contexto mundial

De acordo com as Organização das Nações Unidas (ONU), a população mundial esperada para 2050 é de mais de 9 bilhões de pessoas. Para suprir a demanda por alimentos para este crescimento populacional, dada a disponibilidade cada vez menor de terras cultiváveis, será necessária uma intensificação na produção visando mínimo ou nenhum impacto negativo impactos ecológicos. Para atingir o patamar esperado na produção de alimentos, a agricultura conta com biotecnologia, melhoramentos genéticos e fertilizantes sendo que atualmente, os fertilizantes comerciais são responsáveis por 40 a 60% da produção mundial de alimentos (ROBERTS, 2009).

Apesar da presença mundial de jazidas / ocorrências naturais de matérias primas para produção de fertilizantes, elas não necessariamente estão localizadas no país em que são consumidas, fato que favorece um movimento intenso de importações e exportações de fertilizantes, como podemos notar na Figura 3.4, que segue.

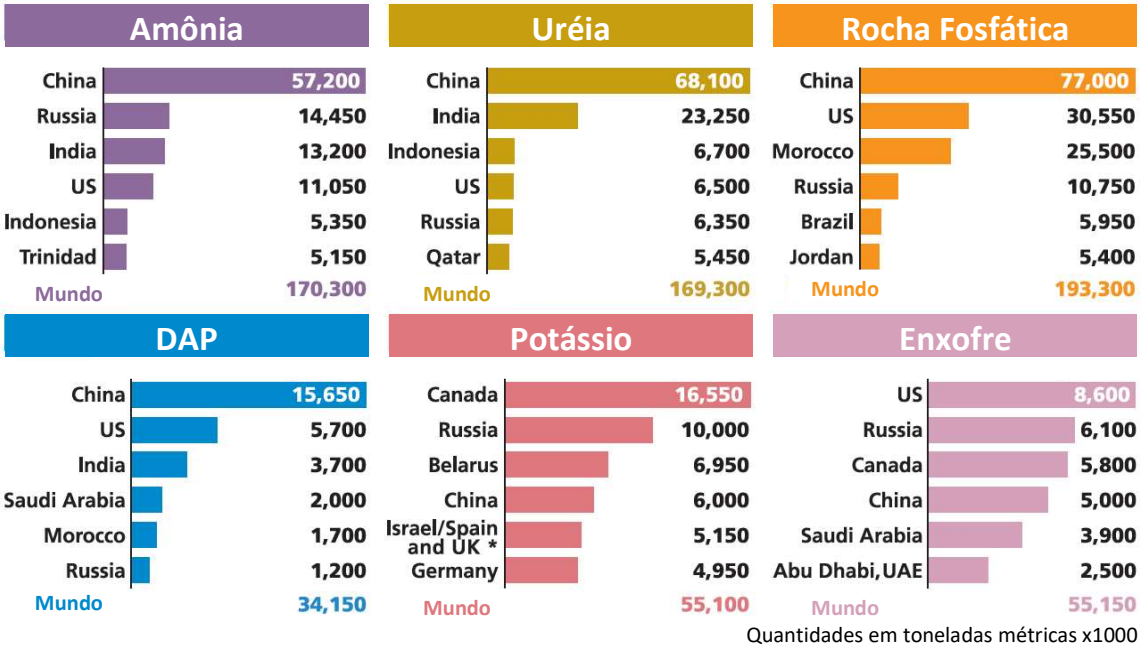
Figura 3.4 – Fluxo mundial das principais matérias primas e fertilizantes em 2013.



Fonte: ICIS, (2014)

Os principais produtores de mundiais das principais matérias primas para fertilizantes são apresentados no Gráfico 3.1, a seguir:

Gráfico 3.1 - Maiores países produtores de matérias primas e fertilizantes em 2013



Fonte: ICIS, (2014)

De acordo com ANDA, em 2013 o Brasil era o 4º maior consumidor de fertilizantes, representando 7,4% do consumo total global, atrás somente de China, Índia e Estados Unidos, conforme a Tabela 3.3 a seguir.

Tabela 3.3 – Consumo mundial de fertilizantes em 2013 (em milhões de toneladas)

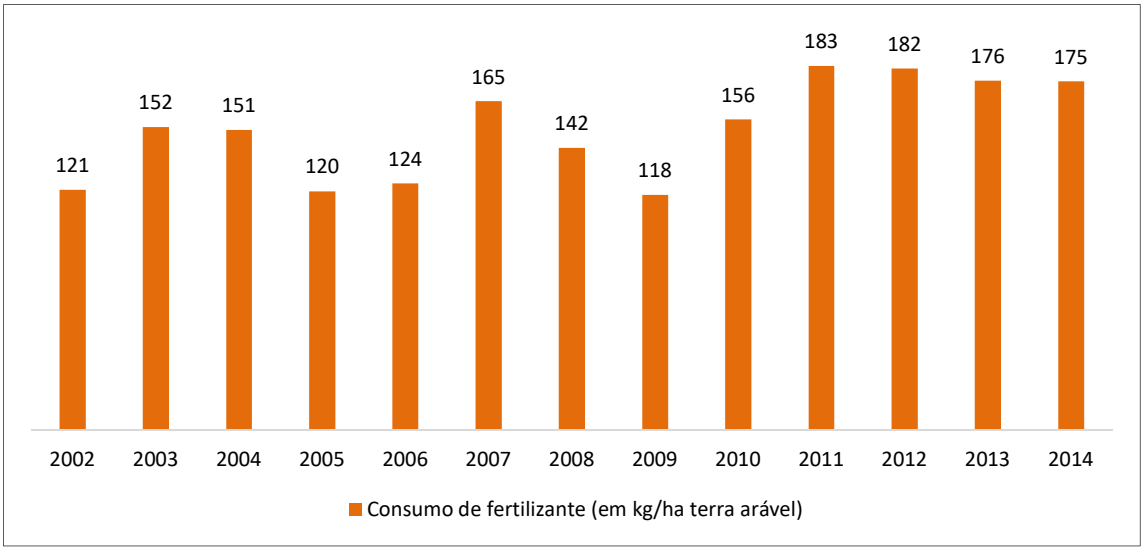
País	N	P2O5	K2O	NPK	%
China	35,0	11,2	6,5	52,7	29,2%
Índia	16,7	5,7	2,1	24,5	13,5%
Estados Unidos	11,7	4,1	4,4	20,2	11,2%
Brasil	**3,7**	**4,6**	**5,1**	**13,4**	**7,4%**
Indonésia	2,8	0,85	1,6	5,2	2,9%
Paquistão	3,2	0,88	0,02	4,1	2,3%
Demais	36,7	13,1	10,7	60,6	33,5%
Total	**109,9**	**40,5**	**30,4**	**180,7**	**100%**

Fonte: ANDA (2015)

3.5.2.3. Fertilizantes no contexto brasileiro

Acompanhando a necessidade mundial de aumento de produção de alimentos, o setor brasileiro de fertilizantes aumentou em quase de 45% a aplicação em kg/hectare de 2002 a 2014, tal como apresentado no Gráfico 3.2, a seguir (WORLD BANK, 2017).

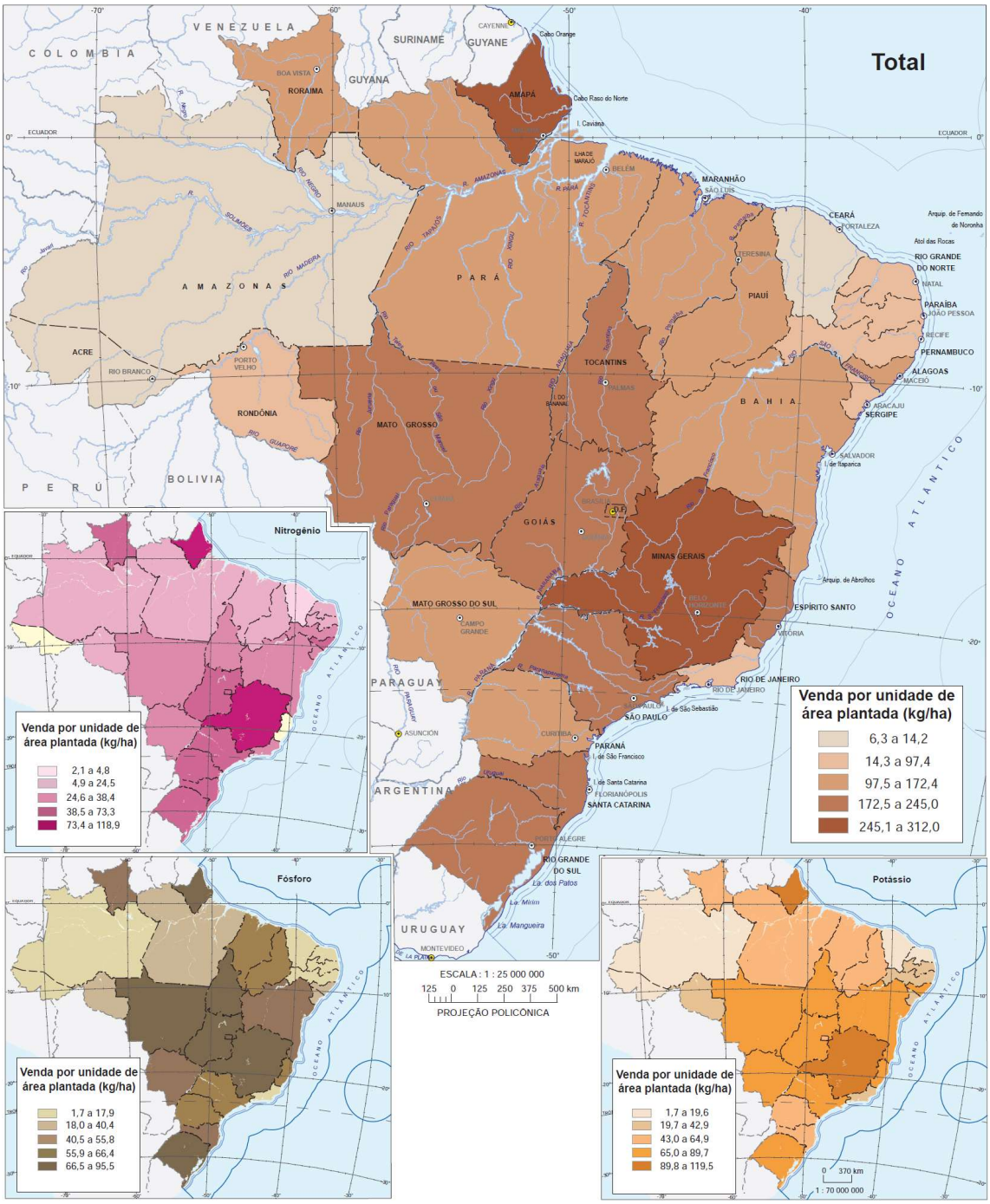
Gráfico 3.2 – Histórico de aplicação de fertilizantes em kg/hectare



Fonte: WORLD BANK, (2017)

A figura 3.5 a seguir apresenta o consumo por hectare dos fertilizantes NPK para cada Estado brasileiro.

Figura 3.5 - Quantidade de fertilizantes entregue ao consumidor final por unidade de área plantada, total e por tipo de nutriente – 2012

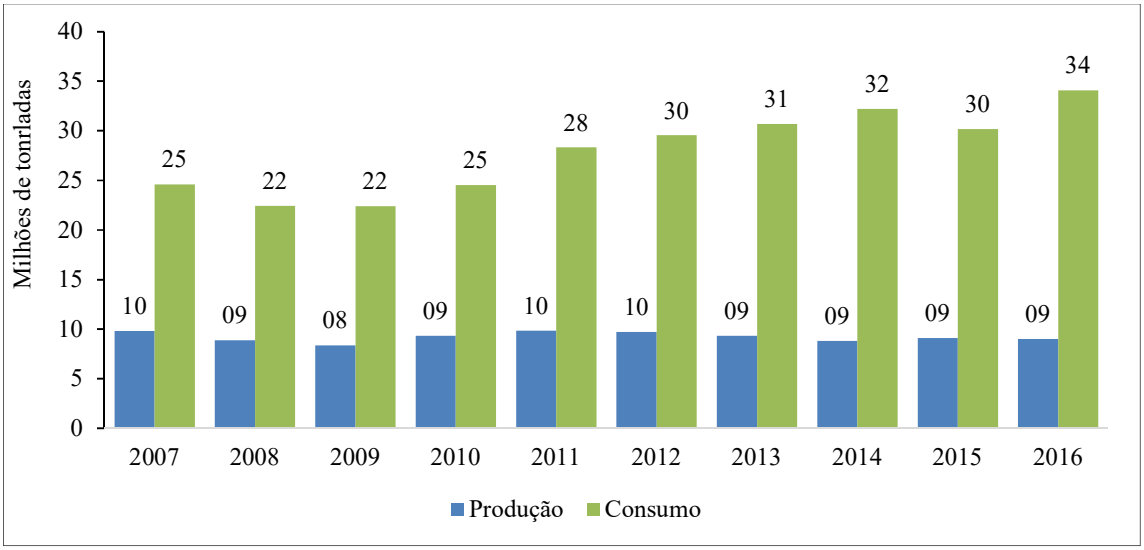


Fonte: IBGE, (2015)

Apesar do consumo crescente, de acordo com a ANDA, a produção de fertilizantes no Brasil não acompanhou o crescimento da demanda. A capacidade de produção

brasileira em 2007 atendia aproximadamente 40% do consumo no mesmo período e em 2016, apenas 26%, como apresentado no Gráfico 3.3, a seguir.

Gráfico 3.3 – Evolução do consumo e produção de fertilizantes no Brasil



Fonte: ANDA, (2015)

Para suprir este déficit na produção, o Brasil se tornou um grande importador do setor, obtendo fertilizantes e matérias primas de diversos países exportadores.

3.5.3. Definição do problema

Buscando suprir parte da lacuna na produção de fertilizantes do mercado brasileiro, uma empresa pretende iniciar suas operações no Brasil, atuando no mercado de fertilizantes Boratados e Fosfatados. Além disso, deseja encontrar a configuração da cadeia logística que propicie maior competitividade para o abastecimento do mercado nacional.

Atualmente, o mercado brasileiro é abastecido via importação direta do fertilizante industrializado ou por poucos fabricantes nacionais, cujas plantas também atuam como centro de distribuição. Dentre estes fabricantes nacionais, somente um se destaca como concorrente direto, localizado no Estado de São Paulo. Parte das matérias primas utilizadas para a fabricação dos fertilizantes podem ser obtidas dentro do Brasil e as que não possuem produção doméstica podem ser adquiridas via importações de diversos países.

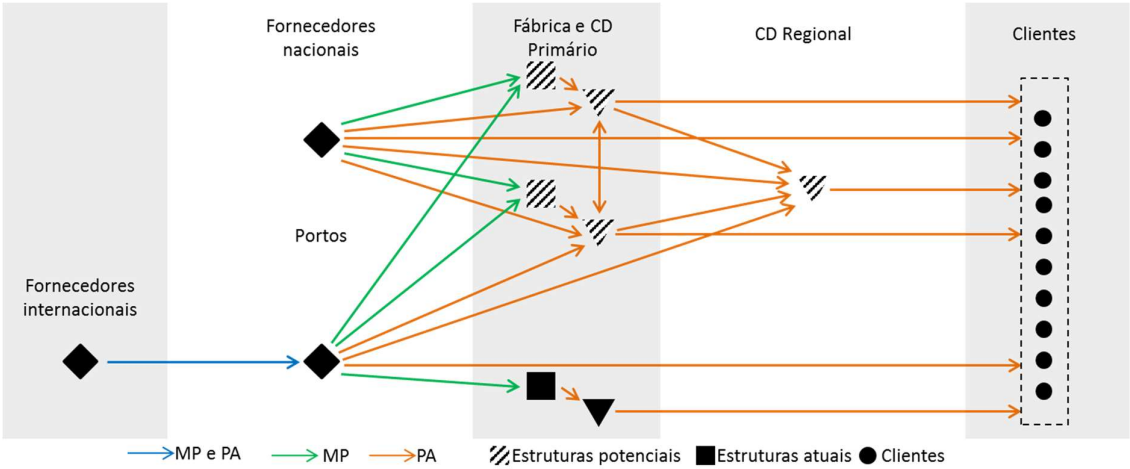
Dado que os fertilizantes possuem padrões predeterminados para as características físicas e concentração de nutrientes, é estabelecido que a empresa que conseguir ofertar o produto pelo menor preço será a empresa que atenderá a demanda do cliente em dado período.

Devido a característica sazonal dos fertilizantes, por serem insumos agrícolas influenciados diretamente pelo período de chuvas, plantio e colheita da lavoura, a necessidade de se adotar um sistema eficiente de planejamento da armazenagem e distribuição é potencializada para que se possa atender o mercado de maneira regular ao longo do ano minimizando todos os custos envolvidos na distribuição e eventuais atrasos na entrega.

Centros de distribuição, localizados ou não adjacentes às fábricas, são utilizados para diversos fins como, por exemplo, para a armazenagem, tanto da matéria prima, quanto do fertilizante acabado, a fim de minimizar o tempo de atendimento ao cliente ou aproveitar preços reduzidos dos insumos. Preços esses que são influenciados pela sazonalidade da demanda e até mesmo para reduzir a necessidade de capacidade máxima de produção das fábricas para atendimento da demanda potencial total ao longo do ano.

A figura a seguir representa de maneira simplificada os fluxos possíveis entre todas estruturas que podem estar presentes na rede de fabricação e distribuição dos fertilizantes.

Figura 3.6 - Malha de produção e distribuição de fertilizantes e matérias primas



Fonte: Elaboração do autor

3.5.4. Determinação dos parâmetros

A seguir são detalhados os parâmetros utilizados na modelagem e as respectivas formas de cálculo.

3.5.4.1. Produtos

Dos diversos fertilizantes consumidos no mercado agrícola brasileiro, este trabalho abrangerá duas categorias de fertilizantes, comercializadas sob os seguintes códigos da Nomenclatura Comum do Mercosul (NCM):

- 25280000 - boratos naturais e seus concentrados, calcinados ou não, e
- 31054000 - fosfato monoamônico, mesmo misturado com fosfato diamônico.

A escolha de trabalhar somente com essas duas categorias de fertilizantes deve-se ao fato do alto volume utilizado anualmente por ambas, aliada à inexistente produção dos boratos e à insuficiente produção do fosfato monoamônico no mercado doméstico.

Embora a empresa pretenda comercializar as duas categorias de fertilizantes, as aplicações de cada uma delas na agricultura são distintas. Na família dos Boratados, serão comercializadas somente a Ulexita Calcinada (aproximadamente 15% de teor de boro) e a Ulexita Simples (7% a 10% de teor de boro), ambas encontradas na forma granular e em pó. Ambos produtos são considerados micronutrientes, utilizados em maior quantidade nas culturas de soja, milho e girassol.

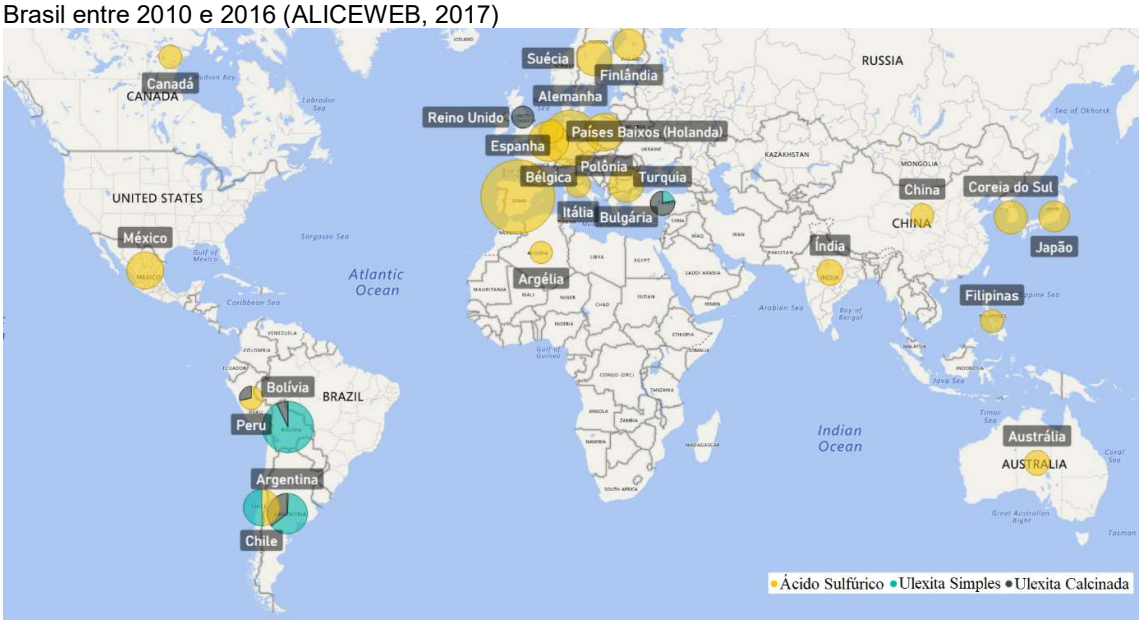
Já na família dos fosfatados, a empresa pretende trabalhar somente com o produto comercializado sob os nomes de MAP Técnico, que é um fertilizante solúvel, utilizado em maior quantidade nas culturas que utilizam fertirrigação para aplicação de fósforo, principalmente em cultura de frutas.

Uma vez que os processos de produção de ambas as famílias de fertilizantes são distintos, não utilizam matérias primas em comum para a fabricação e a semelhança de localização de mercado consumidor é baixa. O presente estudo também pretende avaliar a viabilidade da construção de fábricas distintas, especializadas para cada família de produto.

3.5.4.2. Fertilizantes Boratados

O abastecimento de boratados do mercado nacional é realizado exclusivamente via importações, uma vez que o Brasil não possui reservas naturais da matéria prima que contém o nutriente Boro. A Figura 3.7, a seguir, apresenta os principais fornecedores mundiais de matéria prima e de produto acabado para a família dos boratados, entre 2010 e 2016.

Figura 3.7 – Principais países exportadores de ácido sulfúrico e ulexita (simples e calcinada) para o Brasil entre 2010 e 2016 (ALICEWEB, 2017)

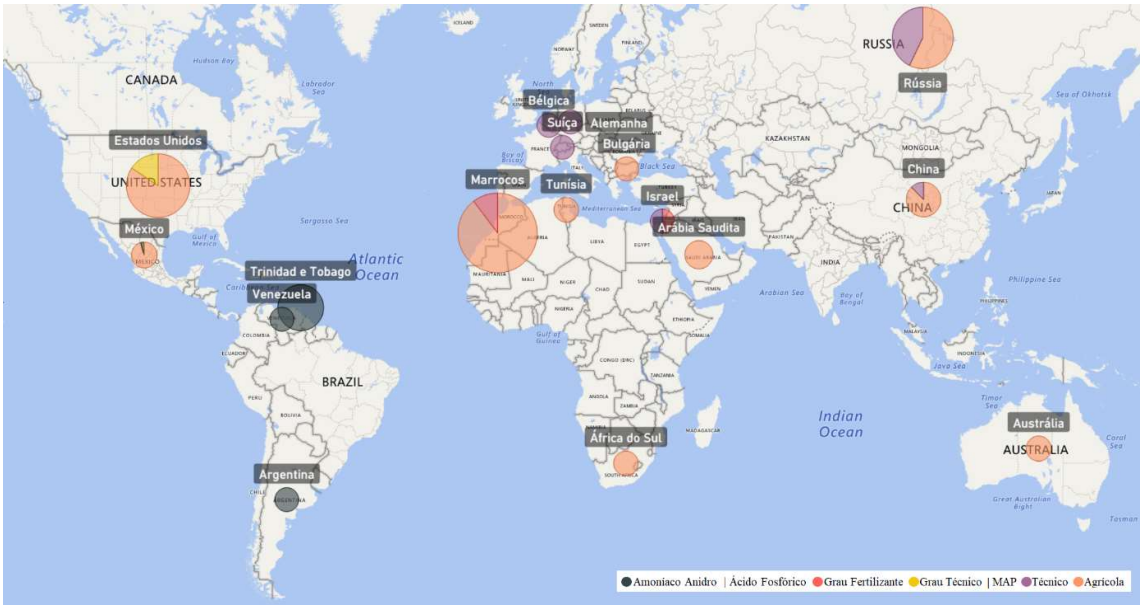


Fonte: Elaboração do autor

3.5.4.3. Fertilizantes Fosfatados

O MAP Técnico, que utiliza como matéria prima um ácido fosfórico de maior pureza (grau técnico) não possui produção nacional, sendo abastecido exclusivamente via importações. As principais matérias primas para a fabricação do MAP técnico são ácido fosfórico e amônia anidra. A Figura 3.8, a seguir, apresenta os principais fornecedores mundiais de matéria prima e de produto acabado para a família dos fosfatados, entre 2010 e 2016.

Figura 3.8 – Principais países exportadores de MAP e ácido fosfórico (grau técnico e agrícola) e amônia anidra para o Brasil entre 2010 e 2016 (ALICEWEB, 2017)

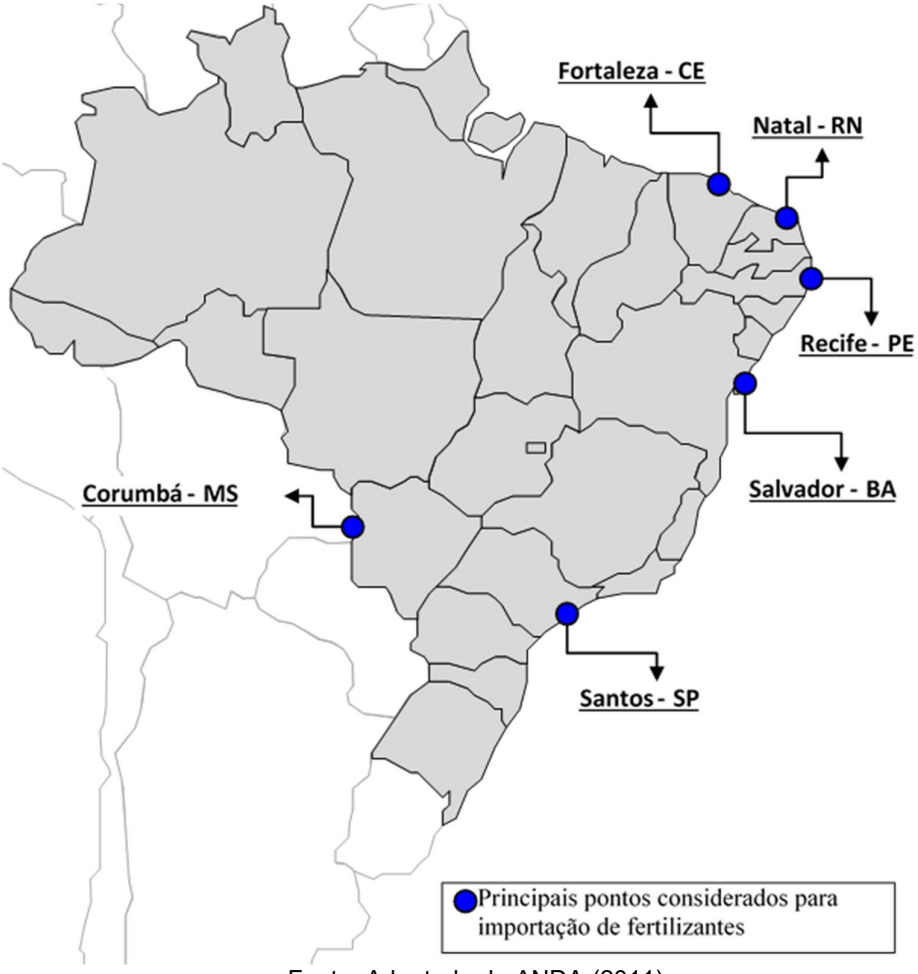


Fonte: Elaboração do autor

3.5.4.4. Possibilidades de importação

A importação de matéria prima e produto acabado podem ser realizados em diversas localidades do Brasil (portos secos e portos marítimos). A figura 3.9, que segue, apresenta os principais pontos de entrada das importações de fertilizantes no Brasil.

Figura 3.9 - Principais portos para importação de fertilizantes.



Fonte: Adaptado de ANDA (2011)

Para este trabalho, somente os produtos oriundos da Bolívia conseguem ser importados via rodoviária (por Corumbá (MS). A importação do restante dos países exige transporte marítimo.

3.5.4.5. Clientes

Os clientes (pontos de demanda) foram agregados nas mesorregiões propostas pelo IBGE. Essa simplificação foi utilizada para reduzir o número de pontos de demanda, sem perda significativa no poder analítico do estudo. Cada uma destas mesorregiões é representada pela cidade de maior população como ponto de demanda, sendo que as regiões de interesse de atuação são centro-oeste, sudeste e nordeste. Uma tabela com as respectivas cidades representantes de cada mesorregião é apresentada no

ANEXO A – MESORREGIÕES USADAS COMO PONTOS DE DEMANDA. A Figura 3.10, que segue, apresenta todos os pontos de demanda considerados no estudo.

Figura 3.10 - Pontos de demanda de fertilizantes

Fonte: Elaboração do autor

3.5.4.6. Demanda

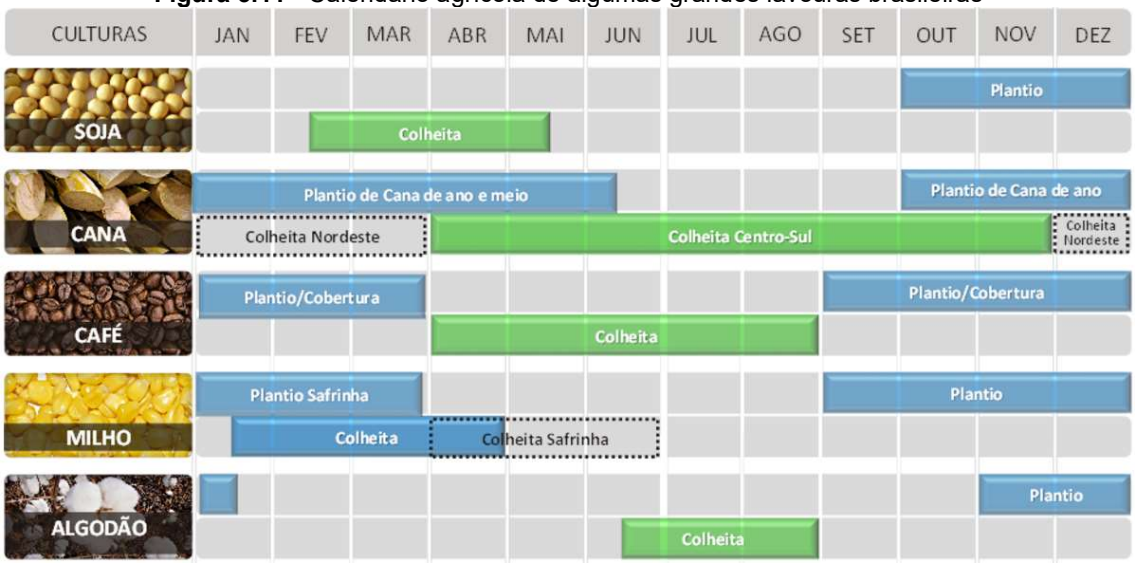
Neste tópico serão tratados dois principais pontos relacionados à demanda: sazonalidade e quantidade total consumida por produto e por ponto de demanda.

Sazonalidade

O mercado de fertilizantes possui uma sazonalidade marcante por se tratar de um insumo agrícola, que segue períodos definidos de aplicação estabelecidos pela lavoura cultivada, localização geográfica e período de maior ou menor ocorrência de chuvas. A figura a seguir apresenta os períodos de plantio e colheita das principais

lavouras do Brasil, sendo que o período de aplicação dos fertilizantes é concentrado, principalmente entre dois meses anteriores ao plantio até um mês após o plantio.

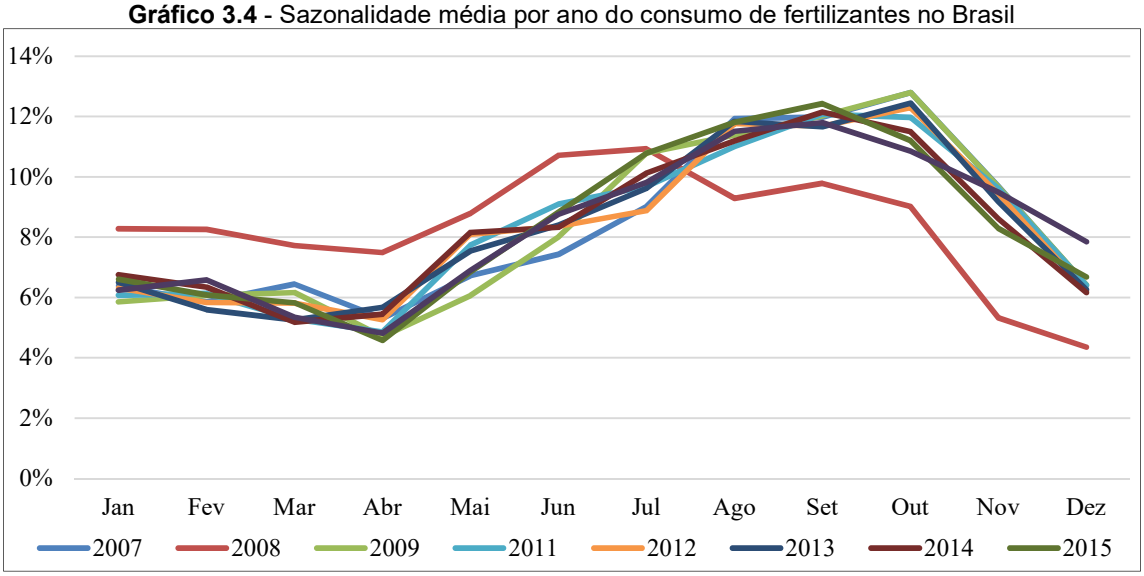
Figura 3.11 - Calendário agrícola de algumas grandes lavouras brasileiras



Fonte: FERTILIZANTES HERINGER, (2017)

Ao incluir na análise as demais culturas consumidoras de fertilizantes, a curva de sazonalidade percentual da demanda em cada mês do ano apresenta a seguinte forma.

Gráfico 3.4 - Sazonalidade média por ano do consumo de fertilizantes no Brasil



Fonte: Adaptado de (ANDA, 2015).

Quantidade total consumida

O volume máximo previsto para ser utilizado como base para este estudo é de 150 mil toneladas de boratados e 50 mil toneladas de fosfatados em 2018, ano base para o estudo. Para estimar o volume comercializado desses fertilizantes em cada ponto de demanda, o volume total foi repartido proporcionalmente à área plantada das principais culturas consumidoras dos fertilizantes em cada mesorregião, de acordo com os dados do levantamento sistemático da produção agrícola, realizado pelo IBGE.

3.5.4.7. Potencial localização das estruturas

Os potenciais municípios para construção de fábricas ou centros de distribuição foram escolhidos por serem grandes centros regionais, assegurando uma disponibilidade mínima de infraestrutura e mão de obra e por serem próximos às regiões com maior demanda potencial de cada uma das categorias de fertilizantes.

Tabela 3.4 - Potenciais localizações para construção de fábricas ou centros de distribuição

Município	UF	Região
Corumbá	MS	CO
Campo Grande	MS	CO
Cuiabá	MT	CO
Rondonópolis	MT	CO
Natal	RN	NE
Recife	PE	NE
Fortaleza	CE	NE
Salvador	BA	NE

Fonte: Informações fornecidas pela empresa

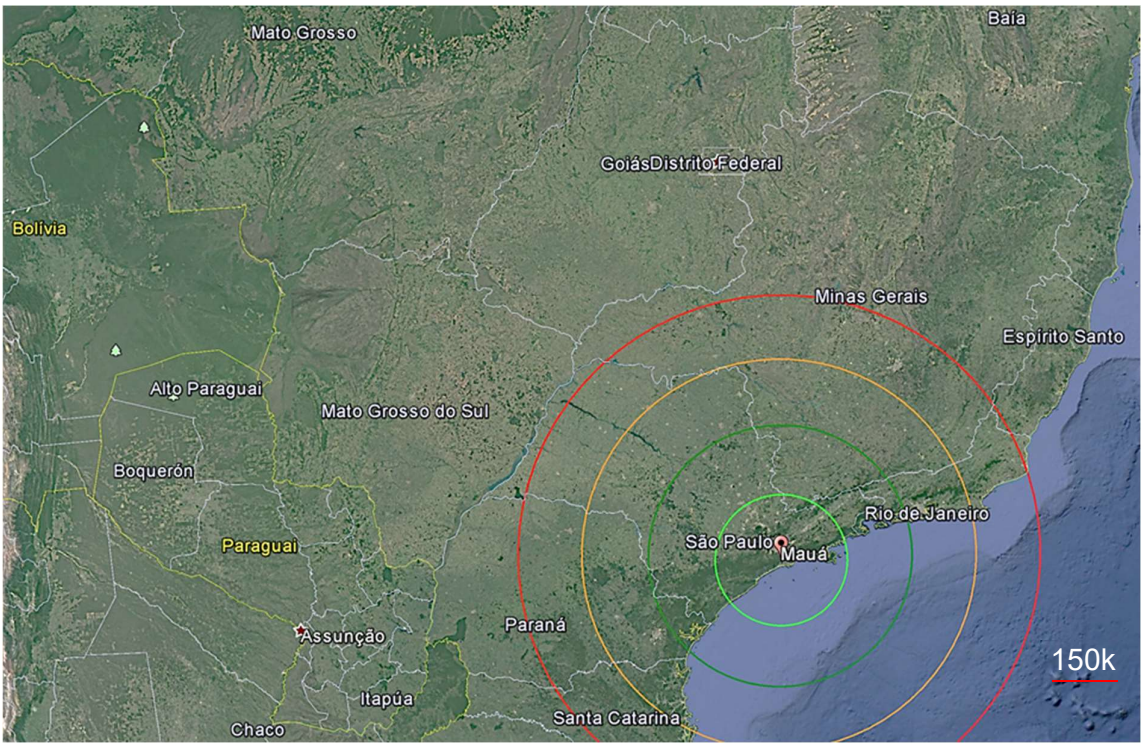
Independentemente da viabilidade da construção de qualquer uma das fábricas, também faz parte do escopo do estudo a localização de um único centro de distribuição que poderá movimentar todos os produtos das famílias citadas.

3.5.4.8. Concorrente

A principal empresa concorrente que será estudada no modelo de otimização está localizada na cidade de Mauá, SP, atendendo principalmente a região Sudeste.

A Figura 3.12, a seguir, apresenta a cidade na qual está localizada a fábrica de MAP da empresa concorrente presente neste estudo.

Figura 3.12 – Localização da empresa concorrente



Fonte: Elaboração do autor

3.5.4.9. Características dos produtos (nutrientes)

A produção de cada fertilizante deve obedecer a quantidades específicas de matéria prima, para que as quantidades desejadas de nutrientes obedeçam às especificações dos produtos acabados. Para tal, a Tabela 3.5, que segue, apresenta as quantidades específicas de cada matéria prima que são necessárias para produção de 1 tonelada de produto acabado.

Tabela 3.5 – Quantidades necessárias de matéria prima para 1 tonelada de produto acabado

Matérias primas / Produtos Acabados	Ácido Fosfórico grau Técnico	Ulexita Calcinada Pó	Ulexita Simples Pó	Amônia 82%	Ac. Sulfúrico
Ulexita Calcinada Granulada		900			100
Ulexita Simples Granulada			900		100
MAP Técnico	880			120	

Fonte: Elaboração do autor

3.5.4.10. Processos de produção

Para que cada fertilizante seja produzido, as matérias primas devem passar por determinados processos para que todas as reações físicas e químicas possam acontecer. A Tabela 3.6, que segue, apresenta os processos de produção que devem ser instalados em cada fábrica para que a produção dos fertilizantes possa ocorrer.

Tabela 3.6 – Processos necessários para produção de cada produto acabado

Produtos / Processos	Ulexita Calcinada Pó	Ulexita Calcinada Granulada	Ulexita Simples Pó	Ulexita Simples Granulada	Map Técnico
Misturador	1	1	1	1	
Reator					1
Cristalizador					1
Centrífuga					1
Calcinador	1	1			
Granulador		1		1	
Secador					1
Embalador	1	1	1	1	1

Fonte: Elaboração do autor

3.5.5. Processamento do modelo

O mesmo modelo matemático utilizado para resolução do problema exemplo foi aplicado para a resolução do caso prático. Foi construído na plataforma AIMMS, utilizando-se do CPLEX 12.6 como motor de solução, rodando em um computador

com processador Intel Core i7-6500U 2.50GHz, com 8GB de memória RAM e sistema operacional Windows 10 Home.

Para a plotagem dos mapas, foi utilizado o programa Power BI Desktop.

O modelo matemático completo, após o input dos dados reais ficou com cerca de 234 mil variáveis, sendo 416 variáveis inteiras, 118 mil restrições, demorando cerca de 2 minutos para convergência da solução.

4. RESULTADOS OBTIDOS

4.1. Introdução

O presente capítulo apresenta os resultados obtidos a partir da aplicação do modelo matemático desenvolvido aos dados reais de uma empresa do setor de fertilizantes.

Tanto Hamad (2014) quanto Yoshizaki (2002) comentaram em seus trabalhos sobre a dificuldade de se trabalhar com a enorme quantidade de variáveis envolvidas e com situações que devem ser consideradas em problemas de localização de fábricas ou CDs e que, mesmo com ajuda de ferramentas de otimização, a organização dos dados e interpretação dos resultados não é trivial.

Os cenários otimizados serão explicados de acordo com seguinte sequência apresentada na Tabela 4.1, a seguir:

Tabela 4.1 – Lista de cenários avaliados para resolução do caso real

Produto	Cenário	Descrição
Boro	B1	Atendimento da demanda de produtos boratados granulados via importação (cenário base).
	B2	Cenário livre para otimização da construção de uma fábrica para atendimento da demanda de produtos boratados (minimização do custo total da cadeia).
	B3	Cenário de comparação, fixando a construção de uma fábrica em Cuiabá, MT, para atendimento da demanda de produtos boratados granulados.
	B4	Cenário de comparação, fixando a construção de uma fábrica em Corumbá, MS, para atendimento da demanda de produtos boratados granulados.
	B5	Cenário de comparação, fixando a construção de uma fábrica em Campo Grande, MS para atendimento da demanda de produtos boratados granulado.

MAP	M1	Atendimento da demanda de Map Técnico via importação (cenário base).
	M2	Cenário livre para otimização da construção de uma fábrica para atendimento da demanda de Map Técnico (minimização do custo total da cadeia).
	M3	Cenário de comparação, fixando a construção de uma fábrica em Recife, PE, para atendimento da demanda de Map Técnico.
	M4	Cenário de comparação, fixando a construção de uma fábrica em Fortaleza, CE, para atendimento da demanda de Map Técnico.
	M5	Cenário de comparação, fixando a construção de uma fábrica em Natal, RN, para atendimento da demanda de Map Técnico.
	M6	Cenário apresentando a operação do concorrente para atendimento da demanda de Map Técnico a partir da fábrica de Mauá (SP).
	M7	Cenário apresentando a operação do concorrente para atendimento da demanda de Map Técnico a partir da fábrica de Mauá (SP), desconsiderando a influência do ICMS nas operações de venda e transporte.
Competição para Map Técnico	C1	Avaliação da solução obtida no cenário M1, quando comparada ao cenário M6.
	C2	Avaliação da solução obtida no cenário M1, quando comparada ao cenário M7.
	C3	Avaliação da solução obtida no cenário M2, quando comparada ao cenário M6.
	C4	Avaliação da solução obtida no cenário M2, quando comparada ao cenário M7.
	C5	Avaliação da melhor localização de fábrica contra cenário M6.
	C6	Avaliação da melhor localização de fábrica contra cenário M7.

Fonte: Elaboração do autor

4.2. Apresentação e detalhamento dos cenários

4.2.1. Demanda a ser atendida e estruturas presentes no problema

A demanda a ser atendida ao longo do horizonte de planejamento está detalhada na Tabela 4.2, sendo que geograficamente está disposta tal como apresentada na Figura 4.1 e Figura 4.2, ambas apresentadas a seguir.

Tabela 4.2 – Demanda (toneladas) por produto

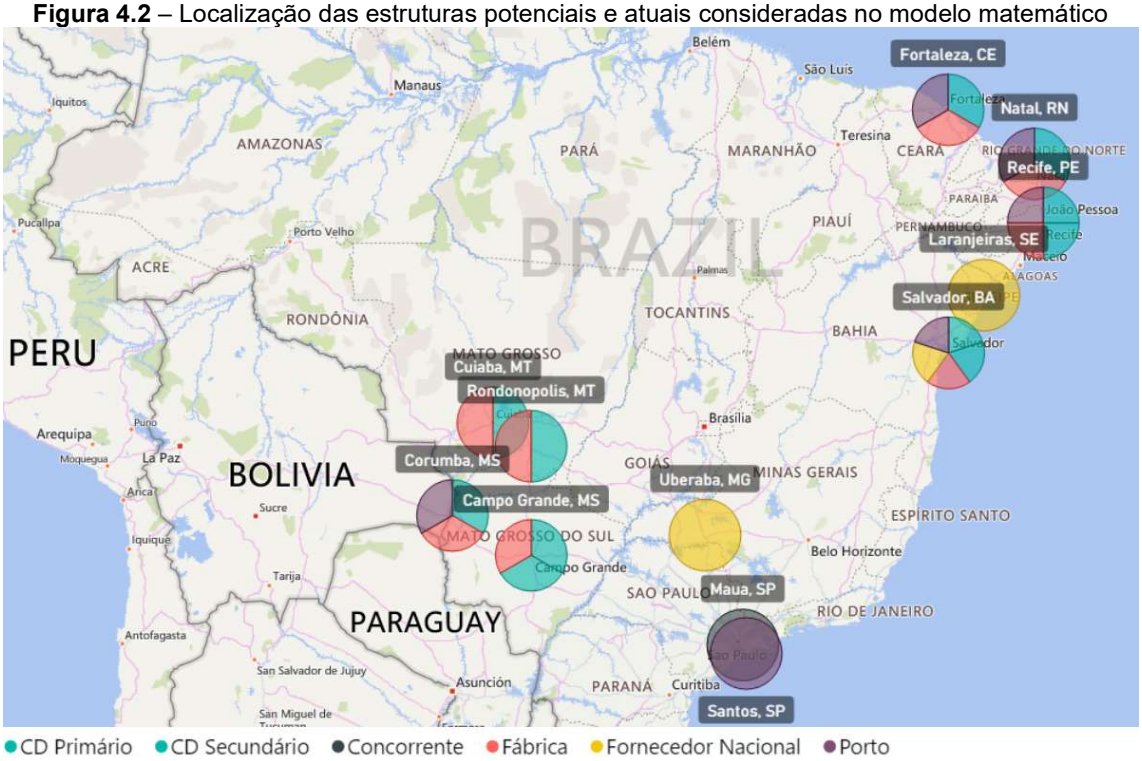
Produto	Quantidade
Ulexita Simples Pó	75.000
Ulexita Calcinada Pó	30.000
Ulexita Calcinada Granulada	10.000
Ulexita Simples Granulada	25.000
MAP Técnico	50.000
Total	190.000

Fonte: Elaboração do autor

Figura 4.1 – Localização da demanda por produto

Fonte: Elaboração do autor

Figura 4.2 – Localização das estruturas potenciais e atuais consideradas no modelo matemático



Fonte: Elaboração do autor

4.2.2. Cenários Base: B1 e M1

O cenário base apresenta a situação atual do atendimento da demanda dos produtos boratados e fosfatados, que é o atendimento integral via importações. A importação do MAP Técnico ocorreu exclusivamente da Rússia, que apresentou os melhores preços durante todo horizonte de planejamento do modelo. O mesmo ocorreu com os produtos boratados granulados, que foram importados somente da Bolívia.

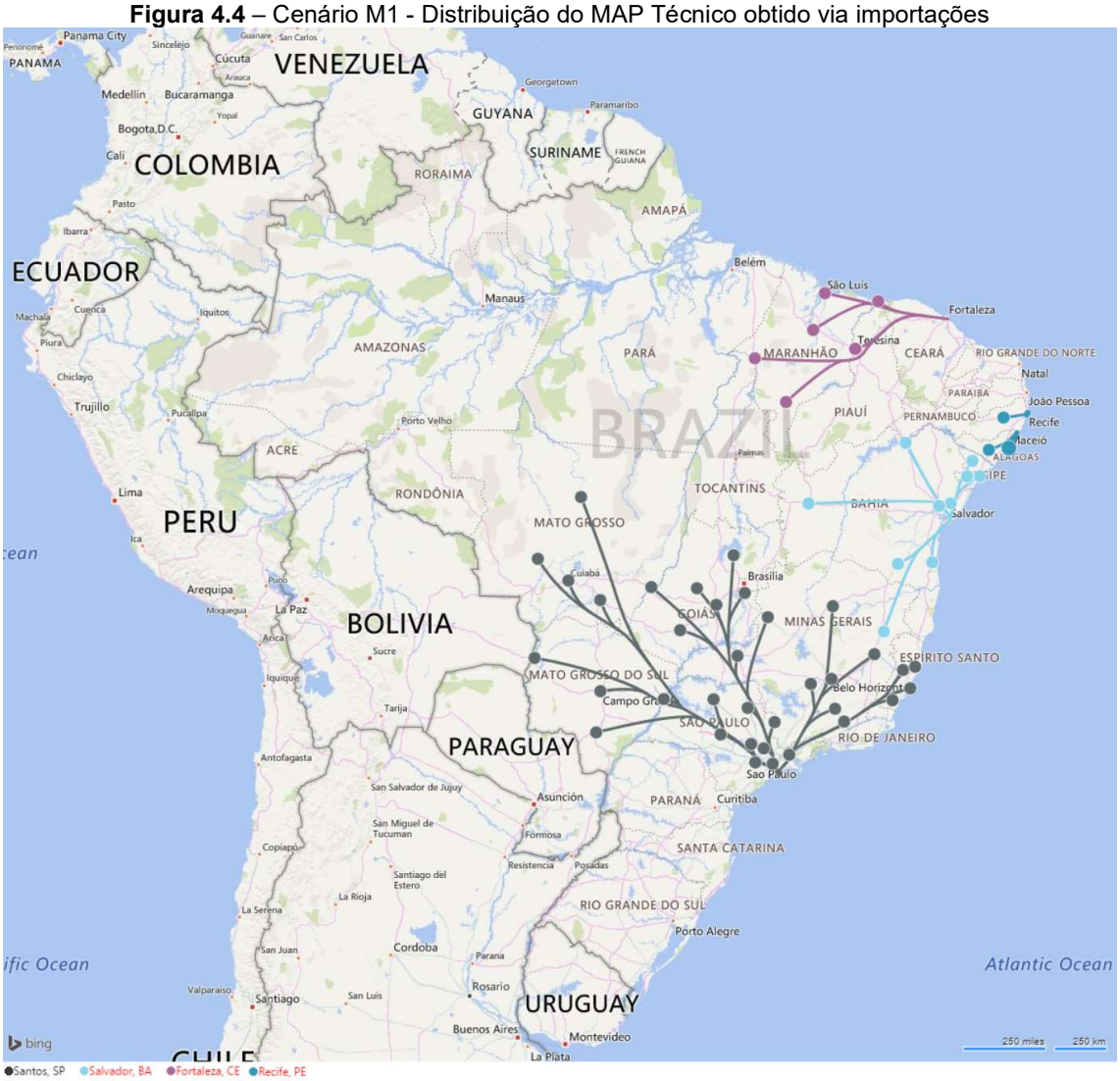
O primeiro cenário a ser detalhado é o cenário B1, que representa a distribuição do Boro Granulado após importação do mesmo. Uma vez que toda a importação ocorreu através do porto seco de Corumbá (MS), a distribuição dos produtos em território brasileiro teve sua origem neste mesmo porto, tal como detalhado na Figura 4.3.

Figura 4.3 – Cenário B1 - Distribuição do Boro Granulado obtido via importações

Fonte: Elaboração do autor

O próximo cenário a ser detalhado é o cenário M1, que representa a distribuição do Map Técnico após importação do mesmo através dos portos presentes no modelo. A distribuição da demanda entre os portos foi ditada majoritariamente pelo custo de transporte até o cliente final, dados que os demais custos (importação, movimentação no porto e ICMS) são equivalentes em todos os portos.

Figura 4.4 – Cenário M1 - Distribuição do MAP Técnico obtido via importações



Fonte: Elaboração do autor

4.2.3. Otimização da distribuição de produtos boratados – Cenário B2

O cenário B2 representa o cenário livre para otimização da construção de uma fábrica para atendimento da demanda de produtos boratados, minimizando os custos totais da cadeia. As possíveis localizações para fábrica de produtos boratados eram Corumbá (MS), Campo Grande (MS), Cuiabá (MT) e Rondonópolis (MT). Após a otimização, a fábrica que foi escolhida, que apresentou a melhor configuração da cadeia (mínimo custo), foi na cidade de Rondonópolis (MT). A localização da cidade é privilegiada por estar próxima de grandes pontos de demanda e se beneficiar de isenção de ICMS na distribuição dos produtos dentro do Estado do Mato Grosso

(Estado com maior demanda de produtos boratados). A Figura 4.5 apresenta os fluxos de distribuição de produtos boratados a partir da fábrica de Rondonópolis (MT).

Figura 4.5 – Cenário B2 – Otimização da distribuição de produtos boratados a partir da fábrica de menor custo

Fonte: Elaboração do autor

4.2.4. Otimização da distribuição de MAP Técnico – Cenário M2

O cenário M2 representa o cenário livre para otimização da construção de uma fábrica para atendimento da demanda de MAP Técnico, minimizando os custos totais da cadeia. As possíveis localizações para fábrica de produtos boratados eram Natal (RN), Recife (PE), Fortaleza (CE) e Salvador (BA). Após a otimização, a fábrica que foi escolhida, que apresentou a melhor configuração da cadeia (mínimo custo), foi na cidade de Salvador (BA). Dado que a cidade de Salvador é a cidade localizada mais

ao sul quando comparada às demais cidades passíveis de receber uma fábrica, está localização é privilegiada minimizar os custos de transporte para atender a demanda tanto da região nordeste, quanto da sudeste (regiões com maior demanda). A Figura 4.6 apresenta os fluxos de distribuição de MAP Técnico a partir da fábrica de Salvador (BA).

Figura 4.6 – Cenário M2 – Otimização da distribuição de MAP Técnico a partir da fábrica de menor custo

Fonte: Elaboração do autor

4.2.5. Operação de distribuição de MAP Técnico da empresa concorrente – Cenário M6

A empresa concorrente considerada neste problema possui uma única fábrica na cidade de Mauá (SP). A Figura 4.7 apresenta os fluxos de distribuição de MAP Técnico a partir desta fábrica.

Figura 4.7 – Cenário M6 – Operação de distribuição de MAP Técnico da empresa concorrente

Fonte: Elaboração do autor

4.2.6. Distribuição de MAP Técnico importado X Operação da empresa concorrente – Cenário C1

Ao serem comparados os custos de atendimento para cada cliente (preço de venda + custos de transporte + movimentação + ICMS), a operação de importação e distribuição de MAP Técnico provou-se mais vantajosa para 100% dos clientes. Isto significa que, caso o critério de seleção do fornecedor seja única e exclusivamente o custo total de aquisição do produto, a operação de importação e distribuição de MAP Técnico seria capaz de capturar 100% do mercado. A Tabela 4.3 apresenta a diferença percentual do preço praticado pela operação própria quando comparada ao custo total de atendimento a partir da operação concorrente. Apesar de ser contra intuitivo que o Estado de origem da empresa concorrente (SP) seja o Estado com a maior desvantagem no custo total, o principal custo que leva a este resultado foi o ICMS da venda. Como os produtos importados são isentos de ICMS, caso a venda seja realizada direto para o Estado de consumo do produto, a produção doméstica fica prejudicada. Yoshizaki (2002) comenta que, de todos os tributos, o ICMS é um dos que têm maior relevância nas operações logísticas nacionais.

Tabela 4.3 – Diferença % do custo de atendimento (próprio x concorrente) ao cliente e número de clientes atendidos por estado (Cenário C1)

UF	Δ Preço	# Clientes
SP	-10,2%	8
CE	-8,0%	1
PE	-6,2%	3
PI	-6,1%	2
AL	-5,9%	2
BA	-4,4%	7
MA	-4,4%	5
MG	-5,5%	10
SE	-5,3%	3
MS	-1,3%	4
ES	-1,2%	4
GO	-1,2%	5
MT	-1,1%	5

Fonte: Elaboração do autor

4.2.7. Distribuição de MAP Técnico importado X Operação da empresa concorrente (sem ICMS) – Cenário C2

Dado que o ICMS é uma das principais parcelas no custo total de atendimento ao cliente, faz-se necessário avaliar um cenário em que esta influência é anulada, para que somente os custos logísticos influenciem na decisão de qual empresa proporcionará o menor custo para atender cliente. A Figura 4.8 apresenta o resultado da competição entre a distribuição de MAP Técnico obtido via importações contra a operação da empresa concorrente, sem a influência do ICMS.

Figura 4.8 – Cenário C2 - Distribuição de MAP Técnico importado X Operação da empresa concorrente (sem influência do ICMS)

Fonte: Elaboração do autor

Excluindo-se a influência do ICMS no transporte e venda dos produtos, o atendimento via importações perdeu drasticamente a área de influência para a operação da

empresa concorrente. Nota-se pela Tabela 4.4 a seguir, que somente os clientes mais distantes da fábrica concorrente conseguiram um custo competitivo suficiente para atendimento da demanda.

Tabela 4.4 – Diferença % do custo de atendimento (próprio x concorrente) ao cliente e número de clientes atendidos por estado (Cenário C2)

UF	Δ Preço	# Clientes
CE	-2,9%	1
PE	-0,9%	3
PI	-0,8%	2
AL	-0,5%	2
SE	0,1%	3
MA	0,9%	5
BA	1,0%	7
MS	4,7%	4
MG	4,8%	10
GO	4,8%	5
ES	4,8%	4
MT	4,8%	5
SP	4,8%	8

Fonte: Elaboração do autor

4.2.8. Operação da empresa concorrente X fábrica própria de menor custo – Cenário C3

Após serem comparados os cenários de importação do produto acabado contra a operação da empresa concorrente, com e sem a influência do ICMS, o próximo cenário a ser comparado é a fábrica de menor custo de MAP Técnico X operação da empresa concorrente. Os fluxos resultantes desta competição estão apresentados na Figura 4.9.

Figura 4.9 – Cenário C3 - Operação da empresa concorrente X fábrica própria de menor custo

Fonte: Elaboração do autor

Apesar da maior proximidade com os clientes da região nordeste, os custos da fábrica própria se provaram pouco competitivos quando comparados à operação da empresa concorrente. Os principais custos que influenciaram este resultado foram os custos de transporte de importação e os custos de movimentação nos portos.

Nota-se pela Tabela 4.5 que somente os clientes no Estado da Bahia ficaram com preços competitivos, principalmente pela isenção do ICMS, dado que a matéria prima foi importada, industrializada e comercializada no Estado em que o produto seria utilizado.

Tabela 4.5 – Diferença % do custo de atendimento (próprio x concorrente) ao cliente e número de clientes atendidos por estado (Cenário C3)

UF	Δ Preço	# Clientes
BA	-3,8%	7
SP	1,4%	8
SE	2,6%	3
AL	2,6%	2
CE	2,8%	1
PE	2,8%	3
PI	3,7%	2
MG	4,3%	10
MA	4,7%	5
ES	7,8%	4
GO	8,9%	5
MT	9,9%	5
MS	11,3%	4

Fonte: Elaboração do autor

4.2.9. Operação da empresa concorrente X fábrica própria de menor custo (sem ICMS) – Cenário C4

Excluindo-se a influência do ICMS no transporte e venda dos produtos, o atendimento da demanda de MAP Técnico a partir da fábrica de menor custo perdeu drasticamente a área de influência para a operação da empresa concorrente. Nota-se pela Tabela 4.6**Tabela 4.4**, que até mesmo a Bahia, Estado da fábrica em questão, não se provou suficientemente competitivo para o atendimento da demanda.

Tabela 4.6 – Diferença % do custo de atendimento (próprio x concorrente) ao cliente e número de clientes atendidos por estado (Cenário C4)

UF	Δ Preço	# Clientes
SE	1,3%	3
AL	1,3%	2
CE	1,6%	1
PE	1,6%	3
BA	2,3%	7
PI	2,4%	2
MA	3,5%	5
ES	6,7%	4
GO	8,0%	5
MG	8,2%	10
MT	8,9%	5

MS	10,5%	4
SP	11,2%	8

Fonte: Elaboração do autor

4.2.10. Operação da empresa concorrente X melhor localização de fábrica própria contra operação concorrente – Cenário C5

Dentre as quatro localidades possíveis de se instalar uma fábrica de MAP Técnico, a cidade que apresentou a melhor configuração contra a empresa concorrente foi a fábrica de Salvador (BA), sendo que as demais localidades não se provaram competitivas para nenhum cliente.

4.2.11. Operação da empresa concorrente X melhor localização de fábrica própria contra operação concorrente (sem ICMS) – Cenário C6

Por fim, o último cenário a ser detalhado é o cenário no qual a influência do ICMS é desconsiderada para posterior comparação da melhor localização contra a operação concorrente. Apesar da fábrica localizada em Salvador proporcionar o menor custo total para a cadeia, a melhor localização para uma fábrica, desconsiderando-se o ICMS, é Fortaleza (CE), conforme apresentado na Figura 4.10. Apesar de ser pequena a área de influência, a fábrica em Fortaleza provou-se competitiva, principalmente para os clientes de maior distância da fábrica concorrente. Para os demais clientes, os custos de transporte de importação e movimentação de produtos no porto oneraram demasiadamente os custos, inviabilizando o atendimento quando comparado ao custo ofertado pela operação concorrente, tal como apresentado na tabela 4.7 apresentada a seguir.

Figura 4.10 – Cenário C6 - Operação da empresa concorrente X fábrica própria de menor custo

Fonte: Elaboração do autor

Tabela 4.7 – Diferença % do custo de atendimento (próprio x concorrente) ao cliente e número de clientes atendidos por estado (Cenário C6)

UF	Δ Preço	# Clientes
CE	-1,7%	1
PI	0,4%	2
PE	1,8%	3
MA	2,1%	5
AL	2,6%	2
SE	3,3%	3
BA	4,7%	7
ES	9,6%	4
GO	9,9%	5
MT	10,3%	5
MG	10,9%	10
MS	12,6%	4
SP	14,0%	8

Fonte: Elaboração do autor

5. CONCLUSÕES

Neste capítulo são apresentadas as conclusões desta dissertação e um resumo dos resultados mais significativos obtidos pela aplicação deste modelo matemático na realidade do setor de fertilizantes.

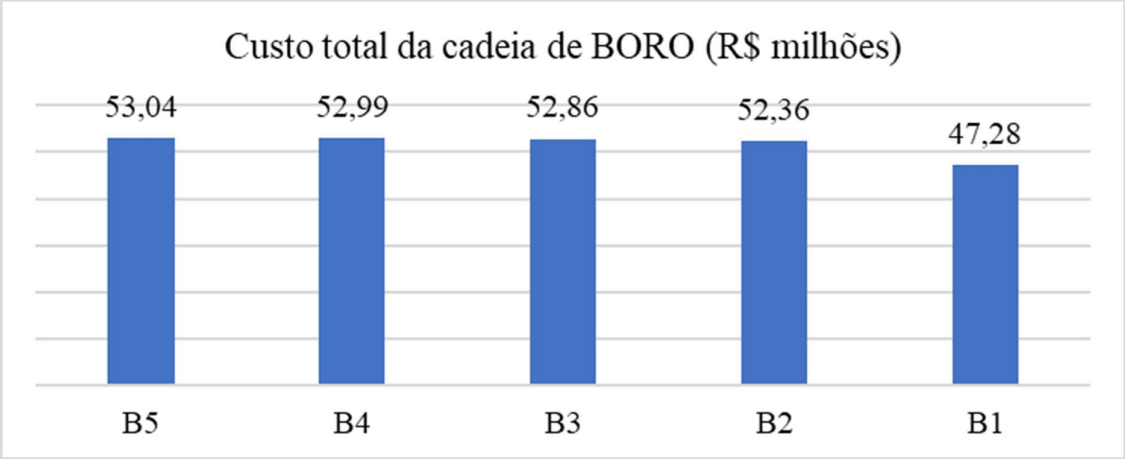
5.1. Aplicabilidade do modelo

A proposta de englobar diversos dos aspectos práticos questionados pelas empresas ao realizarem estudos de localização de instalações e desenho da cadeia foi alcançada. Apesar da representação fiel da realidade encontrada pelas empresas ainda estar longe de ser atingida, o modelo matemático proposto representa mais um passo nesta direção.

5.2. Comparação dos cenários testados

Ao serem comparados todos os cenários testados para a operação de distribuição dos produtos boratados, o cenário que se provou mais competitivo e de menor custo foi o cenário B1, que é o atendimento da demanda prevista 100% a partir de importações. O Gráfico 5.1 apresenta um resumo dos custos de todos os cenários rodados para atendimento da demanda de Boro.

Gráfico 5.1 - Resumo de custos dos cenários para atendimento da demanda dos produtos boratados

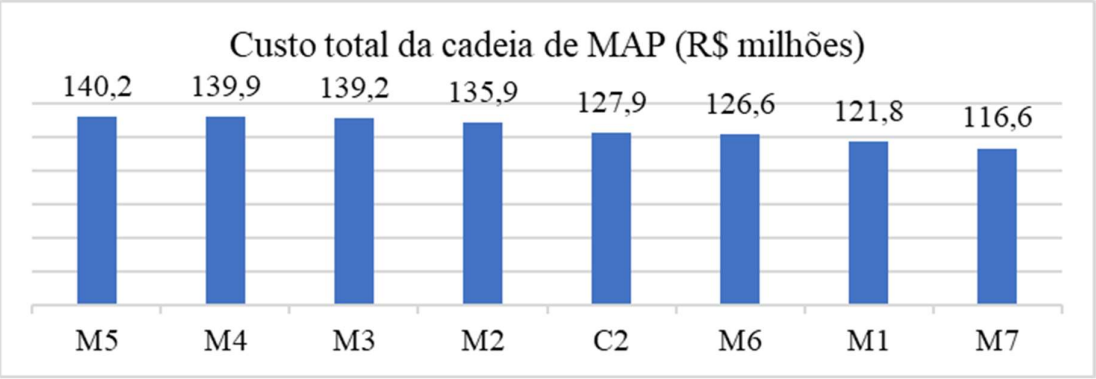


Fonte: Elaboração do autor

Ao serem comparados todos os cenários testados para a operação de distribuição de MAP Técnico, o cenário que se provou mais competitivo e de menor custo foi o cenário

M1, que é o atendimento da demanda prevista 100% a partir de importações. O cenário M7, apesar de apresentar um custo total da cadeira menor que o cenário M1, representa o cenário em que o ICMS não está ativo, atualmente infactível. O Gráfico 5.2 apresenta um resumo dos custos de todos os cenários rodados para atendimento da demanda de MAP Técnico.

Gráfico 5.2 - Resumo de custos dos cenários para atendimento da demanda de MAP Técnico



Fonte: Elaboração do autor

5.3. Recomendações para operação

A conclusão obtida a partir da comparação dos cenários avaliados é a de que, atualmente, não se prova economicamente sustentável a instalação de fábricas para atendimento da demanda de produtos boratados e MAP Técnico. A oferta de ambas as famílias de produto no mercado internacional é abundante e a preços competitivos, perdendo efetividade somente em prazo de entrega.

A oferta abundante a preços competitivos, aliado a uma eventual reforma tributária no mercado nacional, são fatores de risco que direcionam para uma decisão da empresa de permanecer atendendo a demanda nacional via importações. Dessa maneira, nenhum capital será imobilizado e mantém-se livre do risco de uma eventual reforma tributária que, com os custos atuais, favoreceria a operação da empresa concorrente, produtora de MAP Técnico.

5.4. Críticas e comentários sobre a modelagem empregada

Algumas críticas com relação à modelagem empregada neste trabalho são discutidas a seguir.

Apesar do modelo estar preparado para tratar armazenagem de produtos entre períodos e penalizar financeiramente essa prática, a disponibilidade de capacidade de produção, tanto das potenciais fábricas próprias, quando dos fornecedores, acabou por inutilizar essa funcionalidade do modelo, uma vez que a sazonalidade nos custos de transporte não era expressiva ao ponto de exigir um armazenamento prévio de produtos para posterior utilização ou para atender picos de demanda.

A possibilidade de instalação de centros de distribuição para auxiliar no atendimento da demanda proposta também foi prejudicada pela disponibilidade de capacidade de produção dos clientes e fornecedores, apesar de não ser prática comum de empresas de fertilizantes, que costumeiramente trabalham com estoques baixos e giros elevados. Tal prática mitiga a possibilidade de prejuízos durante eventuais flutuações do dólar, moeda em que é negociada grande parte dos fertilizantes.

Os custos de construção e operação das fábricas não tinham grandes diferenciações (além dos custos de aquisição de maquinários), principalmente pela dificuldade de obtenção de informações. A instalação de novas fábricas usualmente envolve negociações com o município contemplado, eventualmente com o Estado, para obtenção de benefícios para operação, tais como terreno, isenção/descontos com energia, água/esgoto. Esta não diferenciação mais precisa dos custos de construção e operação em regiões distintas torna custos como transporte e ICMS ainda mais representativos para o modelo matemático.

Apesar do modelo matemático permitir o atendimento da demanda a partir de fábricas bem distantes do ponto de consumo, em alguns casos, não é uma realidade praticada pelo setor. Outros fatores, como tempo de entrega, possibilidade de frete retorno e até mesmo disponibilidade de transportadores que realizem tais rotas, limitam o raio de atendimento ou o eixo de operação das empresas.

5.5. Propostas de estudos futuros

As principais propostas para continuação deste trabalho são:

estender a ideia do modelo para outros segmentos de negócio. Máquinas ou centros de trabalho com capacidade de produzir mais de um produto são comuns nas empresas e, justamente por compartilharem horas de produção, geram dificuldades no dimensionamento da capacidade.

Poderia ser adaptado para empresas de transporte, onde foi utilizado características nutricionais dos fertilizantes, para otimização do carregamento, misturando produtos de baixo peso e alto volume com produtos de alto peso e baixo volume, aproveitando a capacidade tanto volumétrica da carreta, quanto o limite de peso total carregado.

Transformar o modelo matemático em um modelo de receita, penalizando as vendas perdidas ao concorrente e incluir esta penalização na função objetivo. Esta abordagem simplificaria a avaliação dos cenários e a análise de sensibilidade.

Incluir restrições de tempo de atendimento, para limitar a distância de operação de cada fábrica.

Elaborar análise de sensibilidade para preço do dólar, especificando limites em que a operação de importação se mantém vantajosa contra a operação nacional.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AIKENS, C. H. Facility location models for distribution planning. **European Journal Of Operational Research**, v. 22, p. 263–279, 1985.

ALICEWEB. **Sistema de Análise das Informações de Comércio Exterior**. Disponível em: <http://aliceweb.mdic.gov.br/>. Acesso em: 25 maio. 2017.

ANDA, A. N. PARA D. DE A. **Investimentos no Brasil**. Disponível em: <www.anda.org.br/multimidia/investimentos.pdf>. Acesso em: 20 ago. 2014.

ANDA, A. N. PARA D. DE A. **Anuário Estatístico**. Disponível em: <http://anda.org.br/index.php?mpg=06.01.00&ver=por>. Acesso em: 25 maio. 2017.

BALLOU, R. H. Unresolved issues in supply chain network design. **Information Systems Frontiers**, p. 417–426, 2001.

BALLOU, R. H. **Business Logistics/Supply Chain Management**. 5th. ed. [s.l.] Prentice Hall, 2003.

BALLOU, R. H. **Gerenciamento da Cadeia de Suprimentos/Logística Empresarial**. 5th. ed. Porto Alegre: Bookman, 2006.

BARROS, A. I.; DEKKER, R.; SCHOLTEN, V. A two-level network for recycling sand: A case study. **European Journal of Operational Research**, v. 110, n. 2, p. 199–214, 1998.

BNDES. **Fertilizantes: uma visão global sintética**. Disponível em: <http://www.bndes.gov.br/SiteBNDES/export/sites/default/bndes_pt/Galerias/Arquivos/conhecimento/bnset/set2404.pdf>. Acesso em: 28 fev. 2017.

CHOPRA, S.; MEINDL, P. **Supply Chain Management: Strategy, Planning and Operations**. 3rd. ed. [s.l.] Pearson Prentice Hall, 2008.

CHURCH, R. L.; REVELLE, C. S. The maximal covering location problem. **Regional Science Association Papers**, v. 32, p. 101–118, 1974.

CORDEAU, J.-F.; PASIN, F.; SOLOMON, M. M. An integrated model for logistics network design. **Annals of Operations Research**, v. 144, n. 1, p. 59–82, 2006.

CSCMP. **Supply Chain Management Terms and Glossary**. Disponível em: <www.cscmp.org>. Acesso em: 3 jun. 2015.

CURRENT, J.; DASKIN, M. S.; SCHILLING, D. Discrete Network Location Models. In: DREZNER, Z.; HAMACHER, H. W. (Eds.). . **Facility Location: Applications and Theory**. [s.l.] Springer-Verlag, 2002. p. 83–120.

DASKIN, M. S.; SNYDER, L. V.; BERGER, R. T. Facility Location in Supply Chain Design. In: **Logistics Systems: Design and Optimization**. New York: Springer, 2005. p. 39–65.

DIAS, J.; CAPTIVO, M. E.; CLÍMACO, J. Efficient primal-dual heuristic for a dynamic location problem. **Computers and Operations Research**, v. 34, n. 6 SPEC. ISS., p. 1800–1823, 2007.

DREZNER, T.; DREZNER, Z.; SALHI, S. Solving the multiple competitive facilities location problem. **European Journal of Operational Research**, v. 142, n. 1, p. 138–151, 2002.

DREZNER, Z. Competitive location strategies for two facilities. **Regional Science**

and Urban Economics, v. 12, n. 4, p. 485–493, 1982.

EFROYMSON, M. A.; RAY, T. L. A Branch-Bound Algorithm for Plant Location. **Operations Research**, v. 14, n. 3, p. 361–368, 1966.

ERLENKOTTER, D. A comparative study of approaches to dynamic location problems. **European Journal of Operational Research**, v. 6, n. 2, p. 133–143, 1981.

FARAHANI, R. Z. et al. Covering problems in facility location: A review. **Computers and Industrial Engineering**, v. 62, n. 1, p. 368–407, 2012.

FARAHANI, R. Z. et al. Competitive supply chain network design: An overview of classifications, models, solution techniques and applications. **Omega (United Kingdom)**, v. 45, p. 92–118, 2014.

FERTILIZANTES HERINGER. **Mercado Brasileiro de Fertilizantes - Visão Geral da Indústria de Fertilizantes**. Disponível em: <http://www.heringer.com.br/heringer/web/conteudo_pti.asp?idioma=0&tipo=29504&conta=45&img=2306&son=29504#2>. Acesso em: 25 maio. 2017.

FRANCIS, R. L.; MCGINNIS, L. F.; WHITE, J. A. Locational analysis. **European Journal of Operational Research**, v. 12, n. 3, p. 220–252, 1983.

GEOFFRION, A. M.; GRAVES, G. W. Multicommodity Distribution System Design by Benders Decomposition. **Management Science**, v. 20, n. 5, p. 822–844, 1974.

GEOFFRION, A. M.; POWERS, R. F. Facility Location Analysis Is Just the Beginning (if you do it right). **Interfaces**, v. 10, n. 2, p. 22–30, 1980.

GEOFFRION, A. M.; POWERS, R. F. Twenty Years of Strategic Distribution System Design: An Evolutionary Perspective. **Interfaces**, v. 25, n. 5, p. 105–127, 1995.

HAKIMI, S. L. Optimum Locations of Switching Centers and the absolute centers and medians of a graph. **Operations Research**, v. 12, p. 450–459, 1964.

HAKIMI, S. L. On Locating new facilities in a competitive environment. **European Journal of Operational Research**, v. 12, p. 29–35, 1983.

HAKIMI, S. L. p-Median theorems for competitive locations. **Annals of Operations Research**, v. 6, n. 4, p. 75–98, abr. 1986.

HAMAD, R. **Modelagem de redes logísticas com vários elos: influência dos impostos e do custo de carregamento de estoques**. [s.l.] Escola Politécnica da USP, 2014.

HAMAD, R.; GUALDA, N. D. F. Modelagem de redes logísticas com custos de inventário calculados a partir da cobertura de estoque. **Produção**, v. 21, n. 4, p. 667–675, 2011.

HAMAD, R.; GUALDA, N. D. F. Global sourcing approach to improve cash flow of agribusiness companies in brazil. **Interfaces**, v. 44, n. 3, p. 317–328, 2014.

HOTELLING, H. Stability in competition. **The Economic Journal**, v. 39, n. 153, p. 41–57, 1929.

HUFF, D. L. Defining and Estimating a Trading Area. **Journal of Marketing**, v. 28, n. 3, p. 34, 1964.

IBGE. **Indicadores de Desenvolvimento Sustentável - Brasil 2015**. Rio de Janeiro - RJ: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE, 2015.

ICIS - INDEPENDENT CHEMICAL INFORMATION SERVICES. **Global fertilizer trade flow production consumption and price trend map**. Disponível em: <www.icis.com/resources/fertilizers/trade-flow-map-2014/>. Acesso em: 7 maio. 2017.

JAYARAMAN, V.; GUIDE, V. D. R.; SRIVASTAVA, R. A closed-loop logistics model for remanufacturing. **Journal of the Operational Research Society**, v. 50, n. 5, p. 497–508, 1999.

KUEHN, A. A.; HAMBURGER, M. J. A Heuristic Program for Locating Warehouses. **Management Science**, v. 9, n. 4, p. 643–666, 1963.

MANZINI, R.; BINDI, F. Strategic design and operational management optimization of a multi stage physical distribution system. **Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review**, v. 45, n. 6, p. 915–936, 2009.

MCGARVEY, R. G.; CAVALIER, T. M. Constrained location of competitive facilities in the plane. **Computers and Operations Research**, v. 32, n. 2, p. 359–378, 2005.

MELACHRINOUDIS, E.; MIN, H. The Dynamic relocation and phase-out of a hybrid, two-echelon plant/warehousing facility: A multiple objective approach. **European Journal of Operational Research**, v. 123, n. 1, p. 1–15, 2000.

MELKOTE, S.; DASKIN, M. S. An integrated model of facility location and transportation network design. **Transportation Research Part A: Policy and Practice**, v. 35, n. 6, p. 515–538, 2001a.

MELKOTE, S.; DASKIN, M. S. Capacitated facility location / network design problems. **European Journal of Operational Research**, v. 129, n. 3, p. 481–495, 2001b.

MELO, M. T.; NICKEL, S.; SALDANHA-DA-GAMA, F. Dynamic multi-commodity capacitated facility location: a mathematical modeling framework for strategic supply chain planning. **Computers & Operations Research**, v. 33, n. 1, p. 181–208, 2006.

MELO, M. T.; NICKEL, S.; SALDANHA-DA-GAMA, F. Facility Location and Supply Chain Management – A comprehensive review. **Berichte des Fraunhofer ITWM**, v. 130, n. 130, p. 1–63, 2007.

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

MENTZER, J. T. et al. Defining Supply Chain Management. **Journal of Business Logistics**, v. 22, n. 2, p. 1–25, 2001.

OWEN, S. H.; DASKIN, M. S. Strategic facility location: A review. **European Journal of Operational Research**, v. 111, n. 3, p. 423–447, 1998.

PANTALENA, B. G. **Otimização da malha logística de uma indústria química**. [s.l.] Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2004.

PLASTRIA, F. Static competitive facility location: An overview of optimization approaches. **European Journal of Operational Research**, v. 129, n. 3, p. 461–470, 2001.

REVELLE, C. S. the Maximum Capture or “Sphere of Influence” Location Problem: Hotelling Revisited on a Network. **Journal of Regional Science**, v. 26, n. 2, p. 343–358, 1986.

REVELLE, C. S.; EISELT, H. A. Location analysis: A synthesis and survey. **European Journal of Operational Research**, v. 165, p. 1–19, 2005.

REZAPOUR, S.; FARAHANI, R. Z. Supply chain network design under oligopolistic price and service level competition with foresight. **Computers & Industrial Engineering**, v. 72, p. 129–142, 2014.

REZAPOUR, S.; FARAHANI, R. Z.; DREZNER, T. Strategic design of competing supply chain networks for inelastic demand. **Journal of the Operational Research Society**, v. 62, n. 10, p. 1784–1795, 17 out. 2011.

RICE, J. B.; HOPPE, R. M. Supply Chain vs Supply Chain. The Hype & The Reality. **Supply Chain Management Review**, n. September/october, p. 46–54, 2001.

ROBERTS, T. L. The role of fertilizer in growing the world's food. **Better Crops**, v. 93, n. 2, p. 12–15, 2009.

SASAKI, M. et al. A Stackelberg hub arc location model for a competitive environment. **Computers and Operations Research**, v. 47, p. 27–41, 2014.

SECRETARIA DA FAZENDA. **ICMS**. Disponível em: <http://www.fazenda.sp.gov.br/oquee/oq_icms.shtm>. Acesso em: 20 fev. 2017.

SIMCHI-LEVI, D.; KAMINSKY, P.; SIMCHI-LEVI, E. **Designing and Manging the Supply Chain. Concepts, Strategies, and Case Studies**. 3rd. ed. [s.l.] McGraw-Hill Education, 2007.

SNYDER, L. V. Facility location under uncertainty: a review. **IIE Transactions**, v. 38, n. 7, p. 547–564, 2006.

SPIELBERG, K. Algorithms for the Simple Plant-Location Problem with Some Side Conditions. **Operations Research**, v. 17, n. 1, p. 85–111, 1969.

STIGLER, G. J. The Cost of Subsistence. **Journal of Farm Economics**, v. 27, n. 2, p. 303–314, maio 1945.

TANSEL, B. C.; FRANCIS, R. L.; LOWE, T. J. Location on Networks: A Survey. Part I: The p-Center and p-Median Problems. **Management Science**, v. 29, n. 4, p. 482–497, 1983.

TOREGAS, C. et al. The Location of Emergency Service Facilities. **Operations Research**, v. 19, n. 6, p. 1363–1373, 1971.

TSAO, Y.; LU, J. A supply chain network design considering transportation cost discounts. **Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review**, v. 48, n. 2, p. 401–414, mar. 2012.

WANG, F.; LAI, X.; SHI, N. A multi-objective optimization for green supply chain network design. **Decision Support Systems**, v. 51, n. 2, p. 262–269, 2011.

WANG, S.; MENG, Q.; YANG, H. Global optimization methods for the discrete network design problem. **Transportation Research Part B: Methodological**, v. 50, p. 42–60, 2013.

WORLD BANK. **Fertilizer consumption**. Disponível em: <http://data.worldbank.org/indicator/AG.CON.FERT.ZS>. Acesso em: 7 maio. 2017.

YOSHIZAKI, H. T. Y. **Projeto de redes de distribuição física considerando a Influência do ICMS**. [s.l.] Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2002.

YOSHIZAKI, H. T. Y.; ANDRADE, L. E. W. A. Impactos da reforma tributária: avaliando a influência do novo imposto de circulação de mercadorias e serviços

(ICMS) na reconfiguração da malha logística brasileira. **TRANSPORTES**, v. 20, n. 2, p. 23–32, 2012.

7. APÊNDICE A – Legislação vigente acerca de fertilizantes

DECRETO Nº 4.954, DE 14 DE JANEIRO DE 2004.

ANEXO

REGULAMENTO DA LEI Nº 6.894, DE 16 DE DEZEMBRO DE 1980

DAS DISPOSIÇÕES GERAIS

CAPÍTULO I

DAS DISPOSIÇÕES PRELIMINARES

Art. 1º Este Regulamento estabelece as normas gerais sobre registro, padronização, classificação, inspeção e fiscalização da produção e do comércio de fertilizantes, corretivos, inoculantes, biofertilizantes, remineralizadores e substratos para plantas destinados à agricultura. (Redação dada pelo Decreto nº 8.384, de 2014)

Art. 2º Para os fins deste Regulamento, considera-se:

(...)

III - fertilizante: substância mineral ou orgânica, natural ou sintética, fornecedora de um ou mais nutrientes de plantas, sendo:

a) Fertilizante mineral: produto de natureza fundamentalmente mineral, natural ou sintético, obtido por processo físico, químico ou físico-químico, fornecedor de um ou mais nutrientes de plantas;
b) Fertilizante orgânico: produto de natureza fundamentalmente orgânica, obtido por processo físico, químico, físico-químico ou bioquímico, natural ou controlado, a partir de matérias-primas de origem industrial, urbana ou rural, vegetal ou animal, enriquecido ou não de nutrientes minerais;
c) Fertilizante mononutriente: produto que contém um só dos macronutrientes primários;
d) Fertilizante binário: produto que contém dois macronutrientes primários;
e) Fertilizante ternário: produto que contém os três macronutrientes primários;
f) Fertilizante com outros macronutrientes: produto que contém os macronutrientes secundários, isoladamente ou em misturas destes, ou ainda com outros nutrientes;
g) Fertilizante com micronutrientes: produto que contém micronutrientes, isoladamente ou em misturas destes, ou com outros nutrientes;
h) Fertilizante mineral simples: produto formado, fundamentalmente, por um composto químico, contendo um ou mais nutrientes de plantas;
i) Fertilizante mineral misto - produto resultante da mistura física de dois ou mais fertilizantes minerais; (Redação dada pelo Decreto nº 8.384, de 2014)

j) Fertilizante mineral complexo: produto formado de dois ou mais compostos químicos, resultante da reação química de seus componentes, contendo dois ou mais nutrientes;
l) Fertilizante orgânico simples: produto natural de origem vegetal ou animal, contendo um ou mais nutrientes de plantas;
m) Fertilizante orgânico misto: produto de natureza orgânica, resultante da mistura de dois ou mais fertilizantes orgânicos simples, contendo um ou mais nutrientes de plantas;
n) Fertilizante orgânico composto: produto obtido por processo físico, químico, físico-químico ou bioquímico, natural ou controlado, a partir de matéria-prima de origem industrial, urbana ou rural, animal ou vegetal, isoladas ou misturadas, podendo ser enriquecido de nutrientes minerais, princípio ativo ou agente capaz de melhorar suas características físicas, químicas ou biológicas; e
o) Fertilizante organomineral: produto resultante da mistura física ou combinação de fertilizantes minerais e orgânicos.

(...)

XIV - Nutriente: elemento essencial ou benéfico para o crescimento e produção dos vegetais, assim subdividido:

a) Macronutrientes primários: Nitrogênio (N), Fósforo (P), Potássio (K), expressos nas formas de Nitrogênio (N), Pentóxido de Fósforo (P2O5) e Óxido de Potássio (K2O);
b) Macronutrientes secundários: Cálcio (Ca), Magnésio (Mg) e Enxofre (S), expressos nas formas de Cálcio (Ca) ou Óxido de Cálcio (CaO), Magnésio (Mg) ou Óxido de Magnésio (MgO) e Enxofre (S); e
c) Micronutrientes: Boro (B), Cloro (Cl), Cobre (Cu), Ferro (Fe), Manganês (Mn), Molibdênio (Mo), Zinco (Zn), Cobalto (Co), Silício (Si) e outros elementos que a pesquisa científica vier a definir, expressos nas suas formas elementares.

8. ANEXO A – MESORREGIÕES USADAS COMO PONTOS DE DEMANDA

Região	UF	Mesorregião	Munícipio representante
Sudeste	**ES**	Central Espirito-Santense	Vila Velha
		Litoral Norte Espirito-Santense	Linhares
		Noroeste Espirito-Santense	Colatina
		Sul Espirito-Santense	Cachoeiro De Itapemirim
	MG	Campo Das Vertentes	Barbacena
		Central Mineira	Curvelo
		Jequitinhonha	Diamantina
		Metropolitana De Belo Horizonte	Belo Horizonte
		Noroeste De Minas	Paracatu
		Norte De Minas	Montes Claros
		Oeste De Minas	Divinópolis
		Sul/Sudoeste De Minas	Poços De Caldas
		Triangulo Mineiro/Alto Paranaiba	Uberlândia
		Vale Do Mucuri	Teófilo Otoni
		Vale Do Rio Doce	Governador Valadares
		Zona Da Mata	Juiz De Fora
	RJ	Baixadas	Cabo Frio
		Centro Fluminense	Nova Friburgo
		Metropolitana Do Rio De Janeiro	Rio De Janeiro
		Noroeste Fluminense	Itaperuna
		Norte Fluminense	Campos Dos Goytacazes
		Sul Fluminense	Volta Redonda
	SP	Aracatuba	Araçatuba
		Araraquara	São Carlos
		Assis	Ourinhos
		Bauru	Bauru
		Campinas	Campinas
		Itapetininga	Itapetininga
		Litoral Sul Paulista	Itanhaém
		Macro Metropolitana Paulista	Sorocaba
		Marilia	Marília
		Metropolitana De Sao Paulo	São Paulo
		Piracicaba	Piracicaba
		Presidente Prudente	Presidente Prudente
		Ribeirao Preto	Ribeirão Preto

		Sao Jose Do Rio Preto	São José Do Rio Preto
		Vale Do Paraiba Paulista	São José Dos Campos

Região	UF	Meso	Nome Mun UF
Nordeste	**AL**	Agreste Alagoano	Arapiraca
		Leste Alagoano	Maceió
		Sertao Alagoano	Delmiro Gouveia
	BA	Centro Norte Baiano	Feira De Santana
		Centro Sul Baiano	Vitória Da Conquista
		Extremo Oeste Baiano	Barreiras
		Metropolitana De Salvador	Salvador
		Nordeste Baiano	Alagoinhas
		Sul Baiano	Itabuna
		Vale Sao-Franciscano Da Bahia	Juazeiro
	CE	Centro-Sul Cearense	Iguatu
		Jaguaribe	Russas
		Metropolitana De Fortaleza	Fortaleza
		Noroeste Cearense	Sobral
		Norte Cearense	Itapipoca
		Sertoes Cearenses	Quixadá
		Sul Cearense	Juazeiro Do Norte
	MA	Centro Maranhense	Bacabal
		Leste Maranhense	Timon
		Norte Maranhense	São Luís
		Oeste Maranhense	Imperatriz
		Sul Maranhense	Balsas
	PB	Agreste Paraibano	Campina Grande
		Borborema	Monteiro
		Mata Paraibana	João Pessoa
		Sertao Paraibano	Patos
	PE	Agreste Pernambucano	Caruaru
		Mata Pernambucana	Vitória De Santo Antão
		Metropolitana De Recife	Recife
		Sao Francisco Pernambucano	Petrolina
		Sertao Pernambucano	Serra Talhada
	PI	Centro-Norte Piauiense	Teresina
		Norte Piauiense	Parnaíba
		Sudeste Piauiense	Picos
		Sudoeste Piauiense	Floriano

	RN	Agreste Potiguar	Santa Cruz
		Central Potiguar	Caicó
		Leste Potiguar	Natal
		Oeste Potiguar	Mossoró
	SE	Agreste Sergipano	Lagarto
		Leste Sergipano	Aracaju
		Sertao Sergipano	Nossa Senhora Da Glória

Região	UF	Mesorregião	Nome Mun UF
Centro-Oeste	**DF**	Distrito Federal	Brasília
	GO	Centro Goiano	Goiânia
		Leste Goiano	Luziânia
		Noroeste Goiano	Goiás
		Norte Goiano	Niquelândia
		Sul Goiano	Rio Verde
	MS	Centro Norte De Mato Grosso Do Sul	Campo Grande
		Leste De Mato Grosso Do Sul	Três Lagoas
		Pantanal Sul Mato-Grossense	Corumbá
		Sudoeste De Mato Grosso Do Sul	Dourados
	MT	Centro-Sul Mato-Grossense	Cuiabá
		Nordeste Mato-Grossense	Barra Do Garças
		Norte Mato-Grossense	Sinop
		Sudeste Mato-Grossense	Rondonópolis
		Sudoeste Mato-Grossense	Tangará Da Serra