

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EM GESTÃO E TECNOLOGIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO SOROCABA

AURA MARIA JALAL OSORIO

MODELO PARA A INTEGRAÇÃO DE DECISÕES DE LOCALIZAÇÃO E
TRANSPORTE NA DISTRIBUIÇÃO DE MEDICAMENTOS

Sorocaba

2017

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EM GESTÃO E TECNOLOGIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO SOROCABA

AURA MARIA JALAL OSORIO

MODELO PARA A INTEGRAÇÃO DE DECISÕES DE LOCALIZAÇÃO E
TRANSPORTE NA DISTRIBUIÇÃO DE MEDICAMENTOS

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, para obtenção do título de mestre em Engenharia de Produção.

Orientação: Prof. Dr. Eli Angela Vitor Toso

Financiamento: CAPES.

Sorocaba

2017

Jalal Osorio, Aura María

Modelo para a integração de decisões de localização e transporte na distribuição de medicamentos. / Aura María Jalal Osorio. -- 2017.
166 f. : 30 cm.

Dissertação (mestrado)-Universidade Federal de São Carlos, campus Sorocaba, Sorocaba

Orientador: Eli Angela Vitor Toso.

Banca examinadora: Reinaldo Morabito Neto, Mariá C. Vasconcelos Nascimento Rosset, Deisemara Ferreira.

Bibliografia

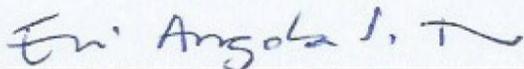
1. Distribuição de Medicamentos. 2. Planejamento de Redes Logísticas.
3. Modelos de Otimização. I. Orientador. II. Universidade Federal de São Carlos. III. Título.

AURA MARIA JALAL OSORIO

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção do Centro de Ciências em Gestão e Tecnologia da Universidade Federal de São Carlos para obtenção do título de mestre em Engenharia de Produção, Área de Concentração: Gestão de Operações.

Sorocaba, 27 de outubro de 2017.

Orientador (a):



Prof. (a). Dr. (a). Eli Angela Vitor Toso
UFSCar/DEP-So

Examinadores (as):

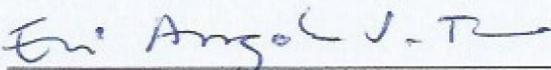


Prof. (a). Dr. (a). Reinaldo Morabito Neto
UFSCar/DEP



Prof. (a). Dr. (a). Deisemara Ferreira
UFSCar/DFQM

Certifico que a sessão de defesa foi realizada com a participação à distância do membro Profa. Dra. Mariá Cristina Vasconcelos Nascimento Rosset (UNIFESP/ICT) e, depois das arguições e deliberações realizadas, o participante à distância está de acordo com o conteúdo do parecer da comissão examinadora redigido no relatório de defesa de Dissertação de Aura Maria Jalal Osorio.



Prof. (a). Dr. (a). Eli Angela Vitor Toso
Presidente da Comissão Examinadora
UFSCar/DEP-So

A Deus!

*“Porque dele, e por meio dele, e para ele são todas as coisas.
A ele, pois, a glória eternamente”.*

AGRADECIMENTOS

*A Deus porque O Senhor é a minha força e o meu escudo; em ti meu coração confia,
e de ti recebo ajuda.*

*À minha querida orientadora Eli por conduzir meus passos nesta pesquisa. Obrigada pelo carinho, apoio
e por me inspirar confiança nos momentos que eu não acreditei.*

*À empresa que disponibilizou os dados para a realização da pesquisa e a todos os funcionários envolvidos
por sua afável colaboração.*

*Aos meus pais Jalil e Rocio pelo amor e apoio incondicional, que transcenderam as fronteiras para me
fortalecer.*

*Ao Alfredo pelo amor, força e paciência. Obrigada por me acompanhar nos momentos difíceis e sorrir
comigo nos alegres.*

*À minha avó Maria, a meus tios Nancy e Grillo, a meu irmão Jalil e demais familiares.
Obrigada por torcerem por mim em cada passo da minha vida.*

*Ao Jorge, Héctor, Andrés e Victor pela amizade, risadas, convívios e debates político-econômicos que me
distráiam nos descansos e, muitas vezes, no meio da pesquisa.*

*Aos companheiros e novos amigos Nayara, Olivia, Camille, Zé Maria, Erick, Eduardo, Wesley, Oswaldo,
e às meninas da república, Carol, Liry e Maiza.
Obrigada pela companhia e pelos convívios.*

*Aos brasileiros que abriram as portas das suas casas para me receber, Prof. José e Profa. Rosane, Voluzi,
Sr. Paulinho e sua família, Adriana e Sandro. Muito obrigada pela hospitalidade,
fizeram-me sentir em casa.*

*Ao pessoal da IPB em Sorocaba que me receberam como uma irmã, especialmente ao Rdo. Vagner
Bernardi por seus ensinamentos bíblicos e explicações das gírias brasileiras.*

*Aos meus irmãos da IBRDG em Montería pelo carinho e orações. O tempo e a distância não conseguiram
apagar a lembrança de seus amorosos abraços.*

*Às minhas irmãs da vida Giselle, Mafe e Martha, ao Maño, Diego e demais amigos da Unicor, e ao meu
incondicional Pedro. Obrigada pelas mensagens e ligações de apoio e os bons desejos.*

*Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, especialmente à Érica por sua boa
disposição.*

*Aos membros da banca de avaliação, Prof. Reinaldo, Profa. Mariá e Prof. Deise, que dedicaram seu
tempo para a leitura e avaliação deste trabalho.*

*À CAPES-Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior– pela bolsa de mestrado, sem a
qual não teria sido possível realizar este trabalho.*

Muito obrigada a todos.

RESUMO

JALAL, Aura. Modelo para a Integração de localização e transporte na Distribuição de Medicamentos. 2017. 166f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de produção) – Universidade Federal de São Carlos, Sorocaba, 2017.

Os medicamentos são produtos sensíveis a fatores ambientais, especialmente à temperatura e umidade. A logística farmacêutica deve ser bem planejada e executada a fim de garantir as condições de conservação dos produtos e manter altos níveis de serviço ao cliente. O planejamento logístico inicia com as decisões de localização de instalações como plantas produtivas e centros de distribuição. A localização das plantas são decisões a muito longo prazo, porque requerem alto investimento de capital, tempo e tecnologia, bem como permissões de entidades sanitárias e governamentais. Porém, a localização de centros de distribuição é mais flexível, porque podem ser contratados os serviços de operadores logísticos especializados no setor farmacêutico. Estes possuem estruturas para centros de distribuição que podem ser compartilhadas entre várias empresas, oferecendo diminuição de custos logísticos e flexibilidade no planejamento das redes de distribuição. As decisões de transporte e gerenciamento de estoque, apesar de serem decisões de nível tático e operacional, têm potencial para impactar significativamente o desempenho da rede e, portanto, devem ser consideradas no planejamento desde o início. Neste contexto, este trabalho foca no planejamento da rede de distribuição de medicamentos, propondo um modelo de programação matemática para apoiar as decisões de localização de centros de distribuição (seleção de locais existentes de propriedade do operador logístico) e decisões táticas de transporte, mais especificamente, fluxo de produtos, seleção de modais, tipos de frete e tipos de veículo, e uso de escoltas no transporte de carga. Na modelagem são consideradas características particulares da rede como conservação de produtos de cadeia fria e medidas de segurança para o transporte de carga, assim como características do contexto tributário brasileiro associadas ao Imposto de Circulação de Mercadorias e Serviços (ICMS). O modelo proposto foi analisado com base na simplificação dos dados reais de uma multinacional do setor. Pela dimensão do problema, foi usado o método K-means para a agregação de produtos em famílias e também foi estudada a agregação da demanda no horizonte de planejamento, a fim de conseguir um *trade-off* adequado entre a tratabilidade computacional e a representatividade do problema prático. A integração das decisões de localização e transporte apresenta melhores resultados, em termos de custo logístico e montante de ICMS a pagar, comparada com uma abordagem não integrada do problema. Os resultados mostram que o modelo representa adequadamente as decisões do problema e, portanto, tem potencial para apoiar o processo decisório do planejamento de redes de distribuição de medicamentos.

Palavras-chave: Distribuição de Medicamentos; Planejamento de Redes Logísticas; Modelos de Otimização.

ABSTRACT

Medicines are sensitive products to environmental factors, especially temperature and humidity. Pharmaceutical logistics must be well planned and executed, in order to ensure the preservation of products and provide the highest customer service levels. Logistic planning begins with the facilities location decision, such as production plants and distribution centers. The plants location is very long-term decision because it requires high investment of capital, time and technology, as well as licenses of sanitary and governmental entities. However, the distribution centers location is more flexible because services for pharmaceutical sector of specialized logistics operators can be hired. These logistic operators have distribution center structures that can be shared among several companies, offering lower logistics costs and flexibility in planning distribution networks. Transport and inventory management decisions, although they are tactical and operational level decisions, they have potential to significantly impact the network performance, therefore should be considered in planning from the beginning. In this context, this work focuses on the planning of the medicines distribution network, proposing a mathematical programming model to support the distribution centers location decision (selection existing sites of the logistic operator) and tactical decisions of transport, more specifically, product flow; modal, freight types and vehicle types selection; and use of escorts in cargo transportation. In the model are considered particular network characteristics, such as conservation of cold chain products and security dealings for the cargo transportation, as well as characteristics of the Brazilian tax context associated with the Tax of Circulation of Goods and Services (ICMS). The proposed model was analyzed based on the real data simplification of a multinational company of pharmaceutical sector. Due to the dimension of the problem, the K-means method was used for product aggregation in families and also the aggregation of demand in the planning horizon was studied, in order to achieve a suitable trade-off between the computational treatability and the practical problem representativeness. The integration of location and transportation decisions presents better results, in terms of logistic cost and ICMS amount payable, compared to a non-integrated approach of the decisions. The results show that the model adequately represents the decisions of the problem and therefore it has the potential to support the decision making process of pharmaceutical distribution network planning.

Key words: Medicines distribution; Logistics network planning; Optimization models.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Processo de modelagem.....	22
Figura 2. Base de cálculo de ICMS.	44
Figura 3. Exemplo de cálculo de ICMS.....	45
Figura 4. Representação de alíquotas de ICMS e fluxo gerado pelas alternativas de localização do exemplo.....	46
Figura 5. Cadeia de suprimento farmacêutica.....	55
Figura 6. Esquema das operações logísticas da empresa no Brasil.....	59
Figura 7. Eixos da rede de distribuição.....	65
Figura 8. Características dos medicamentos.....	67
Figura 9. Alternativas de transporte disponíveis.....	68
Figura 10. Horizonte de planejamento das decisões estratégicas e táticas.....	68
Figura 11. Decisões integradas no modelo matemático.....	69
Figura 12. Limites monetários no transporte de carga em frete dedicado.....	76
Figura 13. Limites monetários no transporte de carga em frete fracionado.....	80
Figura 14. Distribuição da demanda no país agrupada em cidades.....	88
Figura 15. Exemplo de agrupamento usando o método <i>K-means</i>	92
Figura 16. Variância intraclasse para produtos não refrigerados.....	93
Figura 17. Variância intraclasse para produtos refrigerados.....	94
Figura 18. Perfis das classes resultantes da agregação de produtos refrigerados.....	95
Figura 19. Rede de distribuição proposta.....	101
Figura 20. Quantidades transportadas por cada tipo de modal nas instâncias testadas.....	103
Figura 21. Custos de transporte de cada tipo de modal nas instâncias testadas.....	103
Figura 22. Quantidades transportadas por cada tipo de frete nas instâncias testadas.....	104
Figura 23. Custos de transporte de cada tipo de frete nas instâncias testadas.....	105
Figura 24. ICMS pago nas diferentes instâncias testadas.....	107
Figura 25. Valor da função objetivo das instâncias testadas.....	108
Figura 26. Resultado de utilizar o plano de transporte da solução da instância T24_F2 para distribuir na instância T24_F30.....	108
Figura 27. Diagrama polar dos custos logísticos na rede.....	112
Figura 28. Comparação da rede atual e a rede proposta.....	118
Figura 29. Comparação das parcelas de custo da rede atual e a proposta com a instância T24_F30.....	118
Figura 30. Comparação das redes das abordagens hierárquica e integrada.....	121
Figura 31. Comparação das abordagens hierárquica e integrada com a instância T24_F30....	122
Figura 32. Superestrutura da rede para testes adicionais.....	124
Figura 33. Resultados da abordagem hierárquica para os testes adicionais.....	125
Figura 34. Porcentagens de demanda transportada por modal de transporte e tipo de frete ..	129

Figura 35. Conservação de fluxo da planta para o CD de São Paulo no período 2 no teste com instância ilustrativa.....	150
Figura 36. Utilização das alternativas de transporte disponíveis na instância ilustrativa.	152
Figura 37. Fluxos dos CDs para as diferentes macrorregiões administrativas do Brasil com a instância ilustrativa.....	166

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Síntese de trabalhos que estudam o problema de localização integrando decisões táticas em um contexto monopériodo.....	36
Tabela 2. Sínteses de trabalhos que estudam o problema de localização integrando decisões táticas em um contexto multiperíodo.....	41
Tabela 3. ICMS pago em cada pelas alternativas de localização do exemplo.....	47
Tabela 4. Base para cálculo do custo de transporte para as diferentes alternativas utilizadas..	62
Tabela 5. Decisões envolvidas no planejamento da rede de distribuição de medicamentos da empresa estudada.....	64
Tabela 6. Número de restrições, variáveis contínuas, inteiras e binárias do MILDT.....	82
Tabela 7. Experimentos computacionais e número de variáveis das instâncias para MILDT...	98
Tabela 8. Resultados de implementação da ACSI com as instâncias T24.....	99
Tabela 9. Parcelas da função objetivo das instâncias testadas.....	102
Tabela 10. Parcelas de custo da solução com a instância T24_F30.....	110
Tabela 11. ICMS a pagar por cada CD com a instância T24_F30.....	110
Tabela 12. Viagens realizadas por tipo de veículo (modal rodoviário) com a instância T24_F30.....	113
Tabela 13. Plano de transporte para cada trecho com a instância T24_F30.....	114
Tabela 14. Quantidade armazenada por CD e condição de temperatura com a instância T24_F30.....	116
Tabela 15. Quantidades estocadas e transportadas da rede atual e a proposta com a instância T24_F30.....	119
Tabela 16. Estoque em consignação gerado pela rede atual.....	120
Tabela 17. Novos locais candidatos a instalação de CDs.....	123
Tabela 18. Porcentagens de demanda transportada por modal de transporte e tipo de frete por macrorregiões administrativas.....	127
Tabela 19. Agregação de produtos em 2 famílias.....	143
Tabela 20. Agregação de produtos em 15 famílias.....	143
Tabela 21. Agregação de produtos em 20 famílias.....	144
Tabela 22. Agregação de produtos em 30 famílias.....	145
Tabela 23. Agregação de produtos em 42 famílias.....	146
Tabela 24. Características da instância ilustrativa.....	147
Tabela 25. Demanda em unidades para instância ilustrativa.....	147
Tabela 26. Custo de instalação dos CDs e custos de transporte entre planta e CDs.....	148
Tabela 27. Custo de transporte e capacidade das alternativas de transporte.....	148
Tabela 28. Dados do produto para instância ilustrativa.....	149
Tabela 29. Custo de escolta por destino para instância ilustrativa.....	149
Tabela 30. Parcelas de custos da rede proposta com a instância ilustrativa.....	152

Tabela 31. Testes de variação de parâmetros com a instância ilustrativa.....	154
Tabela 32. Parcelas de custo dos testes de variação de demanda e outros resultados da instância ilustrativa.....	155
Tabela 33. Parcelas de custo do teste de variação de custo de transporte da instância ilustrativa.....	156
Tabela 34. Resultados dos testes de variação de custos de transporte dedicado da instância ilustrativa.....	157
Tabela 35. Resultados dos testes de variação de custos de transporte fracionado da instância ilustrativa.....	158
Tabela 36. Resultados dos testes de variação de custos de modais de transporte da instância ilustrativa.....	159
Tabela 37. Parcelas de custo do teste de variação de penalidade de não atendimento da demanda da instância ilustrativa.....	160
Tabela 38. Resultados dos testes de variação de custos de instalação de CDs da instância ilustrativa.....	161
Tabela 39. Parcelas de custo dos testes de variação de custos de estoque em CDs da instância ilustrativa.....	162
Tabela 40. Alíquotas de ICMS da planta para os CDs para a instância ilustrativa.....	162
Tabela 41. Parcelas de custo do teste do MILDT com ICMS com a instância ilustrativa.....	163
Tabela 42. Fluxo de produtos nos testes com e sem ICMS na instância ilustrativa.....	164

LISTA DE SIGLAS

ANVISA	Agência Nacional de Vigilância Sanitária.
ACSI	Abordagem de construção de uma solução inicial.
CD(s)	Centro(s) de distribuição.
CNT	Confederação Nacional de Transporte.
CST	Imposto sobre vendas centrais na Índia.
EOQ	Tamanho de lote econômico.
ICMS	Imposto sobre circulação de mercadorias.
MILD	Modelo integrado de localização e distribuição.
MILD-T	Modelo integrado de localização e distribuição com tributação.
NTC	Associação Nacional de Transporte de Cargas e Logística.
ACC	Capital do estado de Acre.
ACI	Interior do estado de Acre.
ALC	Capital do estado de Alagoas.
ALI	Interior do estado de Alagoas.
AMC	Capital do estado de Amazonas.
AMI	Interior do estado de Amazonas.
APC	Capital do estado de Amapá.
API	Interior do estado de Amapá.
BAC	Capital do estado de Bahia.
BAI	Interior do estado de Bahia.
CEC	Capital do estado de Ceará.
CEI	Interior do estado de Ceará.
DFC	Capital do estado de Distrito Federal.
DFI	Interior do estado de Distrito Federal.
ESC	Capital do estado de Espírito Santo.
ESI	Interior do estado de Espírito Santo.
GOC	Capital do estado de Goiás.
GOI	Interior do estado de Goiás.
MAC	Capital do estado de Maranhão.
MAI	Interior do estado de Maranhão.
MGC	Capital do estado de Minas Gerais.
MGI	Interior do estado de Minas Gerais.
MSC	Capital do estado de Mato Grosso do Sul.
MSI	Interior do estado de Mato Grosso do Sul.
MTC	Capital do estado de Mato Grosso.
MTI	Interior do estado de Mato Grosso.

PAC	Capital do estado de Pará.
PAI	Interior do estado de Pará.
PBC	Capital do estado de Paraíba.
PBI	Interior do estado de Paraíba.
PEC	Capital do estado de Pernambuco.
PEI	Interior do estado de Pernambuco.
PIC	Capital do estado de Piauí.
PII	Interior do estado de Piauí.
PRC	Capital do estado de Paraná.
PRI	Interior do estado de Paraná.
RJC	Capital do estado de Rio de Janeiro.
RJI	Interior do estado de Rio de Janeiro.
RNC	Capital do estado de Rio Grande do Norte.
RNI	Interior do estado de Rio Grande do Norte.
ROC	Capital do estado de Rondônia.
ROI	Interior do estado de Rondônia.
RRC	Capital do estado de Roraima.
RRI	Interior do estado de Roraima.
RSC	Capital do estado de Rio Grande do Sul.
RSI	Interior do estado de Rio Grande do Sul.
SCC	Capital do estado de Santa Catarina.
SCI	Interior do estado de Santa Catarina.
SEC	Capital do estado de Sergipe.
SEI	Interior do estado de Sergipe.
SPC	Capital do estado de São Paulo.
SPI	Interior do estado de São Paulo.
TOC	Capital do estado de Tocantins.
TOI	Interior do estado de Tocantins.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	17
1.1.	Objetivo.....	20
1.2.	Metodologia.....	20
1.3.	Organização do Trabalho.....	22
2	PLANEJAMENTO DE REDES DE DISTRIBUIÇÃO.....	23
2.1	Contextualização teórica.....	23
2.2	Modelos para planejamento de redes logísticas.....	26
2.2.1	Integração de decisões estratégicas e táticas em horizonte de planejamento monoperíodo.....	27
2.2.1.1	Integração de decisões de localização e gerenciamento de estoques.....	27
2.2.1.2	Integração de decisões de localização e transporte.....	31
2.2.1.3	Integração de decisões de localização e medidas de nível de serviço.	32
2.2.2.	Integração de decisões estratégicas e táticas em horizonte de planejamento multiperíodo.....	36
2.2.2.1	Integração de decisões de localização e gerenciamento de estoque em horizonte multiperíodo.....	38
2.2.2.2	Integração de decisões de localização e nível de serviço em horizonte multiperíodo.....	39
2.2.2.3	Integração de decisões de localização e transporte em horizonte multiperíodo.....	40
2.3	Modelos que consideram aspectos tributários no planejamento.....	41
2.3.1	Aspectos tributários que impactam o planejamento logístico no Brasil.....	43
2.4	Modelos para o planejamento de distribuição de medicamentos.....	49
2.5	Conclusões da revisão de literatura.....	52
3	A REDE DE DISTRIBUIÇÃO DE MEDICAMENTOS.....	54
3.1	Aspectos gerais da indústria farmacêutica.....	54
3.2	A rede de distribuição da empresa objeto de estudo de caso.....	58
3.2.1	Descrição da Operação Logística.....	58
4	MODELAGEM DO PROBLEMA.....	65
4.1	Considerações e pressupostos.....	65
4.2	Modelo integrado de localização e distribuição considerando tributação (MILDT)	71
4.3	Cálculo de limitantes.....	83

4.3.1	Cálculo de limites superiores para as variáveis inteiras (Z_{ijlt} e Z'_{jklt}).....	83
4.3.2	Cálculo de limitantes para as restrições ($M1$, $M2$, $M3$ e $M4$).....	84
4.4	Estratégias de solução: Abordagem para a construção e uma solução inicial – ACSI.....	85
5	ANÁLISE E PREPARAÇÃO DOS DADOS	87
5.1	Descrição dos dados coletados.....	87
5.2	Agregação de produtos em famílias usando o método <i>K-means</i>	90
5.3	Agregação de demanda em diferentes horizontes de planejamento.....	95
6	TESTES COMPUTACIONAIS	97
6.1	Análise da abordagem para a construção de uma solução inicial – ACSI.....	99
6.2	Impacto da agregação de produtos e demanda.....	100
6.3	Detalhamento dos resultados de instância representativa.....	109
6.4	Comparação com o planejamento atual da rede.....	116
6.4.1	Comparação com o planejamento atual da rede.....	117
6.4.2	Comparação com uma abordagem hierárquica.....	121
6.5	Testes adicionais.....	123
6.6	Conclusões do estudo para a unidade de análise do estudo de caso.....	127
7	CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS	130
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	133
	APÊNDICE A. Modelos matemáticos propostos.....	139
	APÊNDICE B. Dados da rede de distribuição de medicamentos.....	141
	APÊNDICE C. Descrição dos métodos empregados para agregação dos produtos em famílias..	142
	APÊNDICE D. Agregação dos produtos em famílias.....	143
	APÊNDICE E. Validação de modelos matemáticos propostos.....	147

1 INTRODUÇÃO

Na indústria farmacêutica fusões e aquisições de empresas globais são processos muito comuns, que decorrem do reposicionamento estratégico e competitivo das empresas e de suas marcas. Estes processos influenciam a topologia da cadeia de suprimentos, particularmente as redes de distribuição, as quais são compostas basicamente por plantas industriais, centros de distribuição (CDs) e diversos clientes dispersos geograficamente. O planejamento da logística do setor farmacêutico visa à redução dos custos, mas também à satisfação das exigências das agências reguladoras, em relação à qualidade do produto, e exigências dos clientes, em relação ao atendimento da demanda e dos prazos de entrega.

O planejamento da distribuição de medicamentos depende da localização das plantas, CDs e clientes. De fato, a estrutura física da rede logística tem grande impacto nas decisões de transporte de produtos, nos custos e nos tempos de atendimento. Uma vez estabelecidos os locais das instalações, todas as decisões de alternativas de modal de transporte, tipo de frete utilizado e tipo de veículo, ficam condicionados às alternativas disponíveis nestes locais.

Em geral, a localização das plantas industriais é bem estabelecida porque envolve alto custo e complexidade, devido ao elevado investimento em estruturas físicas, tecnologia, ajuste à ampla e rigorosa legislação aplicável ao setor. Porém, a localização de CDs não implica incorrer em custos de construção e compra de equipamentos porque, comumente, a indústria farmacêutica contrata operadores logísticos altamente especializados no setor. Muitos operadores logísticos possuem CDs próprios, com estruturas que podem ser compartilhadas entre várias empresas, reduzindo os custos logísticos, além de permitir uma maior flexibilidade no planejamento das redes de distribuição. Isso porque para uma empresa, os custos fixos de alugar um CD de um operador logístico são significativamente menores que os

custos de instalar e manter um local próprio. Desta forma, a empresa só deve assumir os compromissos contratuais, custos por abastecimento dos novos CDs e o custo de operação dos CDs.

Assim, as decisões de localização de instalações, transporte e estoque estão relacionadas, porém pertencem a diferentes níveis de decisão, pois tem horizontes de tempo diferentes. A localização é uma decisão estratégica definida para o longo prazo, enquanto que as decisões sobre transporte e estoque pertencem ao nível tático, e são tomadas para períodos de tempo menores e com maior frequência. A literatura clássica aborda decisões de níveis diferentes em forma hierárquica, primeiro são tomadas as decisões estratégicas, a seguir as decisões táticas que são limitadas pelas decisões estratégicas e, finalmente, as decisões operacionais, restritas pelas decisões táticas e estratégicas. Esta abordagem pode resultar em decisões subótimas (GEBENNINI; GAMBERINI; MANZINI, 2009; SALEMA; BARBOSA-POVOA; NOVAIS, 2010; SHEN; QI, 2007). Portanto, considerar simultaneamente decisões de diferentes níveis, com uma estratégia adequada de integração, pode resultar em soluções que melhorem o desempenho logístico como um todo.

Neste contexto, este trabalho foca o planejamento da rede logística da indústria farmacêutica, de forma a integrar as decisões de localização de CDs –como locais existentes de propriedade do operador logístico-, com as decisões de transporte de medicamentos, mais especificamente as decisões de escolha de modal, tipo de frete e tipo de veículo, além de decisões acerca da manutenção de estoques para atendimento à demanda. A pesquisa é conduzida via estudo de caso de uma empresa multinacional que possui operações de fabricação e distribuição de medicamentos no Brasil.

O Brasil é um dos maiores consumidores de medicamentos do mundo, de fato é o país com mais farmácias *per capita* do mundo, com 3,34 farmácias para cada grupo de 10 mil habitantes, ultrapassando as recomendações da Organização Mundial da

Saúde, isto somado à extensão continental do país faz com que a cadeia de suprimento de medicamentos no Brasil tenha ampla capilaridade e complexidade. O transporte de medicamento é realizado, na sua maioria, por via terrestre, através do modal rodoviário, seguido do modal aéreo. Manter intervalos estáveis de cadeia fria -para medicamentos que exigem essa condição- durante o transporte em um país de clima tropical e com a extensão territorial do Brasil (8,5 mil km²), é um desafio para o setor de medicamentos. Além disso, a baixa qualidade e insegurança das rodovias nacionais dificultam as operações de transporte. As cargas de medicamentos são suscetíveis a roubos, devido ao valor dos produtos e facilidade de receptação. Por isso, as empresas investem na contratação de serviços de seguradoras, serviços de escolta armada e uso de tecnologias para monitorar a rota dos veículos, o implica custos de transporte adicionais (CORREA; AGUIAR, 2012). Embora o transporte aéreo ofereça maior rapidez e segurança, a infraestrutura aeroportuária brasileira é limitada.

Por outro lado, todas as operações da rede de distribuição de medicamentos no Brasil estão sujeitas à tributação do Imposto sobre Circulação de Mercadorias e Serviços (ICMS), cujas alíquotas dependem da origem e do destino do transporte, variando tanto interestadual quanto intraestadualmente. Assim, a localização de CDs em diferentes estados implica em diferentes montantes de ICMS a pagar, portanto, é importante considerar a tributação no planejamento da rede logística (CARRARO; YOSHIZAKI, 2009).

Baseados nas observações do estudo de caso e do setor, este trabalho propõe um modelo de programação matemática para apoiar as decisões no planejamento de redes de distribuição de medicamentos, considerando manutenção de cadeia fria, medidas de segurança no transporte de carga e quartões tributárias associadas a ICMS. Esta pesquisa é motivada pela escassez de trabalhos sobre modelos de configuração de rede neste setor. Segundo Melo, Nickel e Saldanha-Da-Gama (2009) há poucos estudos de caso na indústria farmacêutica, devido às dificuldades na coleta de dados ou à

indisponibilidade dos mesmos, e ainda, no caso de existir dados disponíveis, não é permitida a sua divulgação. Outra motivação para esta pesquisa é o fato de que a ineficiência na distribuição de medicamentos é refletida na qualidade e no custo dos produtos. O custo logístico tem uma participação importante no valor dos medicamentos, portanto, a proposta de ferramenta para melhorar o desempenho da rede de distribuição pode contribuir com a redução do custo do produto, e, conseqüentemente, ampliar o acesso aos medicamentos.

1.1. Objetivo

O objetivo geral da pesquisa é apresentar uma ferramenta de apoio a decisão no planejamento de rede de distribuição de medicamentos, através da proposição de um modelo de programação matemática para integrar decisões relacionadas à localização de CDs (loais existentes de propriedade do operador logístico), e decisões táticas de definição de fluxos e alternativas de transporte a utilizar (modal, tipo de frete e tipo de veículo, uso de escoltas), estoque em CDs, estoque consignado nos clientes e atendimento da demanda (atraso, venda perdida). Considerando aspectos particulares como conservação de produtos em cadeia fria, medidas de segurança no transporte de carga como a utilização de escoltas para os veículos e a proibição de fretes com alto valor monetário e simultaneamente questões tributárias associadas a ICMS que incidem no transporte de produtos no Brasil.

1.2. Metodologia

A pesquisa pode ser classificada como descritivo-explicativa, segundo o objetivo, porque visa descrever, analisar e identificar relações causais em um sistema para estruturar modelos teóricos que o expliquem; e pode ser classificada como uma Pesquisa Empírica Quantitativa Normativa, conforme o delineamento, porque a preocupação principal é assegurar que exista adesão entre o problema real e o modelo elaborado daquela realidade, a fim de desenvolver políticas, estratégias e ações que melhorem a

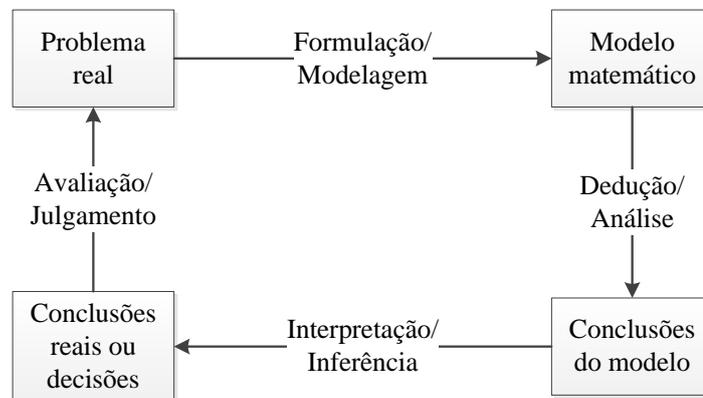
situação existente (BERTRAND; FRANSOO, 2002; MORABITO; PUREZA, 2012). Também envolve o estudo de caso único, cuja unidade de análise foi uma multinacional farmacêutica que possui operações de produção e distribuição no Brasil (GIL, 2002), realizando a triangulação dos dados com várias fontes de evidências; entrevistas com o pessoal responsável da área de logística, assim como dados e relatórios da empresa e do setor, a fim de esclarecer quais são os fatos e decisões chaves no problema (YIN, 2001).

A abordagem de problemas através da modelagem matemática parte de uma situação do mundo real e propõe a definição de um modelo conceitual, a partir do qual se identificam as principais informações para definir as variáveis e as relações causais entre elas, que descrevem o sistema real através de expressões algébricas para representar o problema. É feita uma análise na qual se aplicam técnicas e métodos para resolver o modelo proposto. A seguir as soluções do modelo são interpretadas para definir se têm significado para inferir decisões para o problema real. Finalmente, uma avaliação destas decisões mostra se tem viabilidade na prática ou se a modelagem matemática precisa ser refinada, o que implica a repetição do ciclo como mostra a Figura 1 (MORABITO; PUREZA, 2012).

Assim neste trabalho, foi estudado o problema de planejamento de redes distribuição de medicamentos no Brasil, através de um estudo de caso de uma multinacional farmacêutica. A partir do estudo de caso, foram levantados os principais desafios para o planejamento da rede de distribuição de produtos farmacêuticos. Assim, foi proposta uma formulação matemática, abordando o problema desde um nível estratégico e tático, envolvendo decisões de localização de CDs (locais existentes de propriedade do operador logístico), definição de fluxos e alternativas de transporte a utilizar (modal, tipo de frete e tipo de veículo), número de viagens com e sem escolta, adiantamento, atraso ou venda perdida.

Para validação da abordagem proposta foram construídas instâncias de pequeno porte (ilustrativas) e grande porte (tamanho real) a partir de dados reais fornecidos pela empresa estudada, validando o modelo matemático com as instâncias ilustrativas. As instâncias de tamanho real foram difíceis de resolver, demandando a proposição de uma estratégia de solução para encontrar boas soluções em tempo razoável. Finalmente, foram analisados os resultados de instâncias de tamanho real, e extraídas as conclusões para o problema prático.

Figura 1. Processo de modelagem.



Fonte: Morabito e Pureza (2012)

1.3. Organização do Trabalho

O texto apresenta a seguinte estrutura: o Capítulo 1 compreende a introdução; o Capítulo 2 apresenta a revisão bibliográfica dos principais trabalhos encontrados na literatura que aborda os problemas que integram decisões de diferentes níveis de decisão no contexto de planejamento de redes de distribuição, assim como trabalhos de otimização da cadeia de suprimento de medicamentos; o Capítulo 3 apresenta a contextualização e descrição do problema; o Capítulo 4 apresenta a formulação matemática e a estratégia de solução propostas; o Capítulo 5 expõe a preparação dos dados; o Capítulo 6 apresenta as instâncias testadas e resultados computacionais; o Capítulo 7 apresenta as considerações finais e perspectivas de trabalhos futuros.

2 PLANEJAMENTO DE REDES DE DISTRIBUIÇÃO

Este capítulo apresenta uma contextualização teórica do planejamento de redes de distribuição, incluindo a definição de conceitos básicos para compreensão do problema e uma revisão da literatura de modelos matemáticos que abordam o problema de planejamento de redes logísticas, particularmente modelos que consideram a integração de decisões estratégicas de localização com decisões táticas relacionadas ao transporte e gerenciamento de estoques e níveis de serviço. Também são apresentadas revisões da literatura de modelos para o planejamento de cadeias de suprimento de medicamentos e modelos que incorporam aspectos tributários no planejamento de redes logísticas.

2.1 Contextualização teórica

Uma rede de distribuição é um conjunto de instalações dentro da cadeia de suprimentos que fazem a recepção, armazenamento e expedição de produtos, vinculadas através de canais de comunicação e distribuição (FARAHANI et al., 2014). Em geral, o planejamento de redes logísticas envolve decisões de localização de instalações e decisões de estoque e fluxos entre as instalações. As soluções destes problemas visam à satisfação da demanda do cliente e a minimização dos custos totais da rede.

A literatura clássica define a estrutura de planejamento em níveis hierárquicos de decisão de acordo com o horizonte de planejamento: estratégico para o longo prazo, tático para médio prazo e operacional para o curto prazo, embora os limites entre cada nível permaneçam incertos (MIRANDA; GARRIDO, 2004).

O nível estratégico aborda decisões sobre o número, localização geográfica, capacidades de instalações e, em alguns casos, alocação de demanda dos clientes. Geralmente, envolvem grandes investimentos, conseqüentemente, espera-se que as

facilidades instaladas operem para um horizonte de longo prazo (BADRI; BASHIRI; HOSSEIN, 2013; GEBENNINI; GAMBERINI; MANZINI, 2009; ZADEH; SAHRAEIAN; HOMAYOUNI, 2014). No nível tático, a empresa decide antecipadamente sobre planejamento de transporte e manuseio de estoque em relação às decisões tomadas em nível estratégico (GEBENNINI; GAMBERINI; MANZINI, 2009; SHEN; QI, 2007; ZADEH; SAHRAEIAN; HOMAYOUNI, 2014). Já no nível operacional, a variável tempo é introduzida, bem como a alocação diária ideal da demanda do cliente para varejistas, CDs ou plantas de produção (GEBENNINI; GAMBERINI; MANZINI, 2009).

Esses níveis de decisão são tipicamente tratados individual e hierarquicamente na literatura, o que dá origem a subotimalidade na solução dos problemas de planejamento de redes de distribuição (GEBENNINI; GAMBERINI; MANZINI, 2009; MIRANDA; GARRIDO, 2004). Na prática, as decisões estratégicas são tomadas pelos altos executivos, enquanto as decisões táticas e operacionais são tomadas por gestores de diferentes setores, o que tende a promover incompatibilidades e incoerências entre as decisões. Por exemplo, os problemas de localização de instalações são considerados estratégicos, impondo uma forte simplificação em relação a aspectos táticos e operacionais que influenciam diretamente a localização. Exemplos desses aspectos táticos e operacionais são: a política de controle de estoques, a seleção dos modos de transporte e capacidades dos veículos, roteamento de veículos, entre outros (MIRANDA; GARRIDO, 2004). Ao mesmo tempo alguns autores afirmam que as decisões de nível estratégico têm um impacto significativo nas decisões que ocorreram no nível tático e que essas o problema de planejamento de rede de distribuição precisa considerar a integração de decisões de diferentes níveis de decisão para o melhor desempenho da cadeia de suprimentos (SHEN; QI, 2007; SHU; MA; LI, 2010). Conforme Ballou e Masters (1993) no planejamento de uma rede, há quatro áreas que estão interconectadas, localização de facilidades, controle de estoque, transporte e

gestão do nível de serviço ao cliente e, portanto, devem ser integradas (ARABZAD, GHORBANI e TAVAKKOLI-MOGHADDAM, 2015; LIAO, HSIEH e LAI, 2011a).

Como o nível estratégico lida com decisões sobre o número, localização e capacidade das instalações se estabelece uma ligação clara entre o problema de planejamento de rede e os modelos de localização (MELO; NICKEL; SALDANHA-DA-GAMA, 2009). Farahani et al. (2014) observaram, especificamente, que as decisões de localização de instalações são um dos elementos mais críticos no planejamento estratégico de redes de distribuição.

Os modelos para o problema de localização envolvem a seleção de um ou mais locais onde as instalações devem ser estabelecidas, dentre um conjunto de locais candidatos disponíveis, a fim de satisfazer as demandas dos clientes, visando minimizar distâncias, tempos ou os custos de transporte (MELO; NICKEL; SALDANHA-DA-GAMA, 2009). Os modelos de localização podem ser classificados em modelos de p -medianas, modelos de p -centros, modelos de cobertura, modelos de localização com custo fixo de instalações, entre outros; além de classificações relacionadas a outros aspectos referentes à representação e escopo dos problemas abordados (DASKIN, 1995).

Em geral, modelos matemáticos para os problemas de localização consistem em abordagens muito úteis para resolução de problemas em contextos reais, como a configuração de redes logísticas. Muitos modelos de localização incluem outras decisões e características dos problemas de planejamento de redes logísticas. Dentre as decisões estão: definição de capacidade, aquisição, gerenciamento de estoque, roteamento, produção, seleção de alternativas de transporte. Dentre as características estão o número de camadas, mono ou multiproduto, mono ou multiperíodo e parâmetros determinísticos ou estocásticos (MELO; NICKEL; SALDANHA-DA-GAMA, 2009). Neste sentido, existem tentativas de integrar decisões estratégicas, táticas e

operacionais, tradicionalmente consideradas em uma sequência hierárquica (GEBENNINI; GAMBERINI; MANZINI, 2009)

2.2 Modelos para planejamento de redes logísticas

Como este estudo tem interesse na decisão de localização como decisão estratégica combinada com decisões táticas, foi realizada uma revisão de literatura focada em três aspectos: i) trabalhos que propõem integração de decisões de diferentes níveis de decisão no planejamento de redes de distribuição; ii) estudos de otimização da cadeia de suprimentos da indústria farmacêutica (objeto do estudo de caso); e iii), modelos de localização de instalações que incorporam a consideração de questões tributárias associadas a ICMS, particularmente importantes para a configuração de redes logísticas no atual contexto brasileiro.

Delimitou-se a busca a estudos que fazem uso de ferramentas de pesquisa operacional, especificamente modelos de programação matemática. Documentos em inglês publicados em periódicos com revisão por pares em *Web of Science* e *Scopus*, buscando apenas artigos nas áreas de pesquisa *Engineering* e *Operations Research Management Science*, categorias que englobam as áreas de interesse.

Na primeira busca foram usados os termos: *network design*, *location*, *inventory*, *transportation*, *integrated decisions levels* no período compreendido entre 2007 e 2017. Foram encontrados 18 artigos. Em uma segunda busca, as palavras-chaves foram “*Pharmaceutical supply chain*”, *Network design* e *Optimization*, e não se especificou período de busca. Foram encontrados 21 artigos. Em uma terceira fase de busca, foram levantados trabalhos de modelagem matemática que incorporam aspectos tributários que incidem sobre as redes de distribuição com os termos *Taxation*, *Network design* e *Optimization* foram encontrados dois artigos. Dado que a tributação é específica para cada país, a busca foi ampliada a periódicos nacionais e bases de dados de dissertações de mestrado e doutorado no Brasil. Nesta fase foram encontrados cinco trabalhos. Após

a leitura todos os artigos alguns foram descartados por não estarem relacionados com o escopo do trabalho, apesar dos termos de busca coincidirem. Finalmente, foi realizada uma pesquisa dentro das referências dos artigos encontrados para buscar trabalhos associados ao escopo da pesquisa, que não foram encontrados com os critérios de busca estabelecidos.

Para representar a integração de decisões estratégicas com decisões tático-operacionais, os trabalhos pesquisados utilizam diferentes estratégias de modelagem. A apresentação dos resultados desta revisão da literatura foi dividida em: trabalhos com modelos nos quais as decisões são definidas para um único período – modelos integrados monopérido e, trabalhos com modelos que consideram múltiplos períodos.

2.2.1 Integração de decisões estratégicas e táticas em horizonte de planejamento monopérido

Na literatura de problemas de localização predominam modelos com único período de tempo, apesar das decisões consideradas serem válidas para horizontes de tempo diferentes. Todas as informações são altamente agregadas. A representação dos problemas depende de quais são as decisões envolvidas. Conforme mencionado anteriormente, dentre as decisões estão definição de capacidade, aquisição de matérias-primas, gerenciamento de estoque, roteamento de veículos, produção, seleção de modos de transporte, sendo que as mais frequentes são as decisões de transporte e gerenciamento de estoques e níveis de serviço.

2.2.1.1 Integração de decisões de localização e gerenciamento de estoques

As decisões estratégicas de localização apresentam uma relação de interdependência com as decisões de estoque em algumas redes logísticas. Candas e Kutanoglu, (2007) apresentam um estudo que captura explicitamente esta interdependência entre as decisões de localização-alocação e as decisões de estoque em

serviços logísticos (*service parts logistics*). O estudo mostra que a abordagem integrada permite economias significativas de custos quando os custos fixos de localização e do transporte são relativamente baixos e/ou os custos de manutenção de estoque são relativamente elevados. Também mostraram que as abordagens integrada e desacoplada podem gerar soluções totalmente diferentes, mesmo no número e localizações das instalações, ampliando a importância de considerar o gerenciamento de estoque como parte dos modelos de configuração de rede.

Dentre os modelos monoperíodos que integram as decisões de localização e estoque, muitos utilizam uma abordagem de aproximação a uma política de estoque em um contexto de demanda estática. Estes modelos consideram a determinação de uma quantidade de produto em estoque que permita atender a demanda e ao mesmo tempo minimiza os custos de realizar um pedido, conhecida como tamanho de lote econômico. Os trabalhos de Liao, Hsieh e Lai (2011), Ahmadi-Javid e Hoseinpour (2015) e Ahmadi-Javid e Seddighi (2012) propõem a integração de definição de tamanho de lote econômico nos modelos de localização. O cálculo de tamanho de lote econômico é dado por: $Q = \sqrt{2DS/IC}$. Em que Q : tamanho de pedido para reposição de estoque, D : demanda, S : custo de aquisição, I : custo de manutenção como porcentagem do valor do item, C : valor de manutenção do item.

Farahani et al. (2014) e Escalona, Ordóñez e Marianov (2015) propõem modelos de localização que incorporam decisões de ponto de reposição de estoques. Este ponto de reposição consiste em determinar a quantidade mínima permitida para o estoque antes de encaminhar um pedido de reposição, que é calculado como: $ROP = D LT + Z_{1-\alpha} DP \sqrt{LT}$. Em que ROP : quantidade de ponto de reposição, LT : *lead time*, $Z_{1-\alpha}$: desvio padrão da média da distribuição de demanda para dar a desejada probabilidade de presença de estoque $(1 - \alpha)$ durante o período do prazo de entrega e DP : Desvio padrão da distribuição de demanda. Esta probabilidade de disponibilidade de estoque $(1 - \alpha)$ é usada como nível de serviço ao cliente.

Por outro lado, ante a impossibilidade de determinar exatamente a demanda e os prazos de entrega, é preciso definir uma quantidade em estoque além do estoque regular, chamado estoque de segurança $DP = \sqrt{LT DP^2 + D^2 DP_{LT}^2}$. Em que DP_{LT}^2 é o desvio padrão do prazo de entrega. Park, Lee e Sung (2010) e Shu, Wu e Zhang (2014) propõem modelos que integram a decisão de localização com abordagens de controle de estoque, considerando somente a decisão de estoque de segurança.

Uma abordagem mais abrangente que incorpora o tamanho de lote econômico, estoque de segurança e ponto de reposição de estoque junto com decisões de localização é proposta por Shahabi et al. (2013).

Diabat, Battaia e Nazzal (2015) propõem um modelo para o problema de distribuição de um único produto, que considera custos de realizar pedido tanto nos CDs como nos varejistas, assim se definem tamanho de lote de compra, níveis de estoque médio e tempo de ciclo para CDs e varejistas. Diabat e Theodorou (2015) propõem um modelo para decidir o tempo de ciclo de varejistas e a estratégia de reabastecimento de estoque, a fim de minimizar os custos totais.

Kaya e Urek (2016) introduziram um modelo não linear para decidir sobre os locais ótimos para CDs, quantidade de estoque em cada um deles, os preços de novos produtos e os valores de incentivo para a coleta da quantidade certa de produtos usados, a fim de maximizar o lucro da cadeia de suprimento. O modelo que usa a equação de tamanho de lote econômico e incorporaram uma variável de tempo de ciclo do estoque.

Tiwari et al. (2010) define estoque como o somatório da demanda média mais o estoque de segurança, associado a uma variável binária de alocar a demanda de um cliente a uma instalação.

Outros autores consideram o estoque implicitamente, isto é, não tem uma variável explícita para quantidade de produto em estoque nem um cálculo para as abordagens de controle de estoque como apresentado anteriormente. Os custos de estoque são associados a outra variável na função objetivo. Por exemplo, Miranda e Garrido (2009) usaram a abordagem para definição de tamanho de estoque de segurança como custos associados às decisões estratégicas de localização-alocação e não como decisões do modelo. Desta forma, as decisões estratégicas são tomadas levando em consideração custos táticos (transporte, realizar pedido e estoque de segurança) mesmo que agregados e aproximados.

Shen e Qi, (2007) consideram um problema de configuração de cadeia de suprimentos, onde precisa-se decidir o número e a localização dos CDs, quantidade de estoque de trabalho e estoque segurança, calculados com a equação de tamanho de lote econômico e estoque de segurança, respectivamente; a fim de atingir certo nível de serviço para os clientes atendidos. Ghezavati e Makui (2009) propõem não dividir estoque em duas partes; em vez disso adicionar uma restrição de nível de serviço, assim o estoque necessário pode ser calculado automaticamente com base na restrição de nível de serviço proposta.

Candas e Kutanoglu (2007), Jeet, Kutanoglu e Partani (2009) e Gzara, Nematollahi e Dasci (2014) apresentam problemas de integração de projeto de rede e controle de estoque em sistemas de serviços de *part logistic*. Tais modelos são complicados devido à incerteza da demanda e restrições de nível de serviço. Candas e Kutanoglu (2007) não consideram estoque contínuo, definem um conjunto de níveis de estoque e uma variável de nível de estoque selecionado para cada instalação. Assim, de acordo com a demanda alocada a cada instalação, serão selecionados os níveis de estoque. Jeet, Kutanoglu e Partani (2009) apresentam um modelo para otimizar as decisões de localização-alocação, juntamente com decisões de estoque máximo. Gzara, Nematollahi e Dasci, (2014) modelam um sistema de *part logistic*, onde o armazém é

obrigado a entregar a demanda atribuída dentro da janela de tempo. Assim, definem o nível de estoque de um *part logistic* em um armazém aberto, de forma a garantir que a disponibilidade de estoque durante o *lead time* seja estritamente maior do que a demanda, usando uma função de distribuição de probabilidade.

2.2.1.2 Integração de decisões de localização e transporte

Os modelos clássicos de localização de instalações geralmente incorporam decisões de transporte de forma bastante aproximada, considerando apenas custos de transporte, de forma linear e diretamente proporcional às distâncias envolvidas. As decisões de transporte nos níveis tático-operacionais envolvem outras decisões como a escolha de modais, tipos de frete e *lead times* de entrega. A integração destas decisões em um único período de tempo implica simplificações e agregação das informações de custos, demandas e tempos.

Shen e Qi (2007), Shu, Wang e Zhang (2013) e Tiwari et al. (2010) incorporam os custos de transporte implicitamente através de uma variável de alocação de demanda, assumindo custos de transporte variáveis, dependendo das distâncias envolvidas na alocação. Outros modelos da literatura definem explicitamente uma variável de fluxo de produto entre instalações, por exemplo, Ghezavati e Makui (2009), Arabzad, Ghorbani e Tavakkoli-Moghaddam (2015), Kaya e Urek (2016) e Zhang, Lee e Zhang (2016).

Entre as decisões relacionadas ao transporte, a seleção de modais é uma das mais comuns e poucos trabalhos propõem a integração destas decisões nos modelos de localização. Sadjady e Davoudpour (2012) e Tiwari et al. (2010) propõem modelos que envolvem decisões de localização, alocação de demanda e seleção de modais de transporte. A seleção do modal de transporte está associada a uma variável binária de alocação. Saif e Elhedhli (2016) apresentam um modelo que integra decisões de tipo de veículo para transporte, estes autores focam na configuração da cadeia fria de

suprimentos em geral, com uma abordagem multiobjetivo, que envolve decisões de abertura de CDs, transporte e alocação de demanda. O modelo proposto visa minimizar custos logísticos, bem como a emissão de gases efeito estufa gerada pelo consumo de energia e perdas de gás refrigerante em armazéns e veículos.

Arabzad, Ghorbani e Tavakkoli-Moghaddam (2015) não incluem decisões de localização, mas também incorporam a decisão de alternativas de transporte em um modelo para definir alocação de demanda e fluxo de produtos de um operador logístico. Os objetivos do modelo são: minimizar custos de transporte e preparar pedidos; minimizar a penalidade por entregas fora do prazo (adiantadas e atrasadas); e, minimizar custos de deterioração dos produtos durante o transporte.

A integração do problema de localização e de transporte pode combinar decisões de roteamento de veículos. Por exemplo, Ahmadi-Javid e Seddighi (2012) abordam o problema de integração de localização, alocação de demanda, tamanho de pedido e roteamento para entrega.

2.2.1.3 Integração de decisões de localização e medidas de nível de serviço

A integração de decisões de localização com nível de serviço pode ocorrer de assumindo medidas de nível de serviço que devem ser asseguradas, na forma de restrições, ou usando medidas de nível de serviço como critérios de otimização. A maioria dos modelos que integram decisões de localização com decisões de gerenciamento de estoques definem a priori um nível de serviço ao cliente. Manatkar et al. (2015), Farahani et al. (2014), Shen e Qi (2007), Park, Lee e Sung (2010) e Shahabi et al. (2013) propõem modelos para assegurar um nível de serviço previamente especificado como parâmetro de entrada que representa a probabilidade de ter estoque disponível para atender a demanda.

Outra forma de incluir níveis de serviço é através dos tempos de entrega ou atendimento da demanda (*lead times*). Nos trabalhos de Shu, Wu e Zhang (2014) e Shu, Wang e Zhang (2013), o nível de serviço é considerado como um parâmetro de entrada que permite o cálculo do nível de estoque de segurança a manter nos depósitos, a fim de cumprir os tempos de entrega. O nível de estoque de segurança é medido pelo número de desvios padrão do tempo de atendimento da demanda.

O modelo proposto por Sadjady e Davoudpour (2012) visa minimizar os custos totais da rede, formados pelos custos de transporte e os custos de *lead time* de entrega. O custo de *lead time* de entrega é calculado como o produto de: *lead time* de entrega por origem e destino, tipo de produto e modo de transporte (parâmetro); o valor monetário por unidade de *lead time* de entrega por produto e modo de transporte (parâmetro); demanda (parâmetro); e fração de demanda de produto transportada da origem-destino (variável) por cada modo de transporte.

As distâncias entre clientes e instalações podem ser modeladas como medidas de nível de serviço. Ghezavati e Makui (2009) assumem que nem todos os CDs podem atender a todos os clientes porque cada um deles tem um raio de cobertura crítico e, se um cliente não estiver dentro desta área de cobertura crítica, o CD não pode atender esse cliente, assim incorporam a consideração destas distâncias através de restrições de raio de cobertura e restrições de nível de serviço, com o objetivo de selecionar os melhores pontos para localizar CDs. Da mesma forma, o trabalho de Zhang, Lee e Zhang (2016) assume uma área de cobertura para o atendimento de fornecedores a determinadas plantas e para o atendimento de plantas a CDs, devido às questões geográficas e econômicas. Este trabalho considera um parâmetro de nível de serviço para instalação de cada fornecedor, planta e CD.

Em alguns casos é interessante considerar níveis de serviço diferentes de acordo com os tipos de cliente. Escalona, Ordóñez e Marianov (2015) formularam um modelo

para a configuração de rede de distribuição para produtos de rápida movimentação, classificando a demanda dos clientes em dois grupos, alta e baixa prioridade. O modelo é capaz de oferecer níveis de serviço diferenciados em termos de disponibilidade de produto para duas classes de clientes usando uma política de nível crítico.

Algumas empresas querem garantir prazos curtos para os clientes mais importantes, abrindo ou contratando armazéns próximos a seus clientes. Yao et al. (2010) propuseram um modelo com uma restrição para garantir um nível de serviço associado a atendimento da demanda e que garante que a média ponderada de tempo de entrega do cliente está em um nível aceitável. Os modelos de Candas e Kutanoglu (2007), Jeet, Kutanoglu e Partani (2009) e Gzara, Nematollahi e Dasci (2014) incorporam nível de serviço através de uma restrição que garante que uma porcentagem específica das demandas globais do cliente seja satisfeita dentro de uma janela de tempo de serviço especificada. Ou seja, o nível de serviço está relacionado com satisfação de demanda e também com o cumprimento de prazos de entrega.

Liao, Hsieh e Lai (2011) apresentam um modelo multiobjetivo para minimizar custos da rede e maximizar nível de serviço ao cliente medido através de dois indicadores: fração de demanda satisfeita e porcentagem do volume de demanda satisfeita dentro da distância de cobertura máxima. Arabzad, Ghorbani e Tavakkoli-Moghaddam (2015) também apresentam um modelo multiobjetivo que visa a minimizar a penalidade por entrega fora da data definida (atrasada ou adiantada), além do custo logístico e custo de deterioração de estoque.

Miranda e Garrido (2009) propõem uma abordagem hierárquica de dois estágios, que consiste resolver um modelo de localização e gerenciamento de estoque para um nível de serviço dado como parâmetro de entrada, em seguida, resolver outro modelo utilizando como parâmetros de entrada as decisões de localização e estoque do modelo

anterior para otimizar o nível de serviço, definido como minimizar demanda não atendida.

Alguns autores consideram ainda a venda perdida como medida de nível de serviço. Tiwari et al. (2010) definem nível de serviço como a porcentagem desejada de pedidos atendidos e penaliza na função objetivo a demanda não atendida dos clientes. Além disso, formula restrições que garantem que as zonas de demanda têm que ser atendidas respeitando seus requerimentos de *lead time*.

A Tabela 1 sintetiza as principais características dos modelos monoperíodo que integram o planejamento estratégico e tático de redes logísticas. Além das decisões de integração discutidas nas subseções anteriores, a Tabela 1 apresenta as características dos modelos propostos em relação ao número de produtos, ao número de modais de transporte e a consideração de restrições quanto à capacidade. Podemos observar que todos os trabalhos consideram decisões relacionadas ao gerenciamento de estoques, sendo que 40% usam estratégias de modelagem baseadas nos pressupostos de lote econômico (EOQ). Em relação aos níveis de serviço, 72,4% dos trabalhos revisados consideram esta característica nos modelos propostos.

Tabela 1. Síntese de trabalhos que estudam o problema de localização integrando decisões táticas em um contexto monopérido.

Autores	Multi Produto	Multi Modal	Capacidade	Nível serviço	Estoque	Transporte
Candas e Kutanoglu (2007)				✓	✓	
Shen e Qi (2007)				✓	✓	
Miranda e Garrido (2009)			✓	✓	✓	
Ghezavatie e Makui (2009)			✓	✓	✓	✓
Jeet, Kutanoglu e Partani (2009)				✓	✓	
Park, Lee e Sung (2010)			✓	✓	EOQ	
Yao et al. (2010)	✓		✓	✓	✓	✓
Tiwari et al. (2010)		✓		✓	✓	✓
Liao, Hsieh e Lai (2011)	✓		✓	✓	EOQ	
Liao, Hsieh e Lin (2011)	✓		✓	✓	EOQ	
Ahmadi-Javid e Seddighi (2012)			✓		EOQ	✓
Sadjady e Davoudpour (2012)	✓	✓	✓		✓	✓
Shahabi et al. (2013)				✓	EOQ	
Shu, Wang e Zhang (2013)	✓			✓	EOQ	✓
Shu, Wu e Zhang (2014)				✓	EOQ	
Gzara, Nematollahi e Dasci (2014)				✓	✓	
Farahani et al. (2014)	✓		✓	✓	✓	✓
Arabzad et al. (2014)		✓	✓	✓	✓	✓
Ahmadi-Javid e Hoseinpour (2015)	✓		✓		EOQ	
Manatkar et al. (2015)	✓			✓	✓	
Diabat e Theodorou (2015)			✓		✓	
Diabat, Battaia e Nazzal (2015)					✓	
Escalona et al. (2015)				✓	EOQ	
Zhang e Unnikrishnan (2016)				✓	EOQ	
Kaya e Urek (2016)					✓	✓
Zhang, Lee e Zhang (2016)	✓		✓	✓	✓	✓
Saif e Elhedhli, (2016)	✓	✓	✓		✓	✓

2.2.2. Integração de decisões estratégicas e táticas em horizonte de planejamento multipérido

Os problemas de localização multipérido têm sido propostos para abordar situações em que os parâmetros mudam ao longo do tempo de uma forma previsível. O objetivo é adaptar a configuração das instalações a esses parâmetros. Dessa forma, o

horizonte de planejamento é dividido em vários períodos de tempo (MELO; NICKEL; SALDANHA-DA-GAMA, 2009).

Sousa, Shah e Papageorgiou (2008) propõem uma abordagem hierárquica para a tomada de decisões em um contexto multiperíodo. Os autores apresentaram um estudo de caso de uma cadeia de suprimentos agroquímicos com o objetivo de reconfigurar a rede global da cadeia de suprimento e, na sequência, otimizar o plano de produção, a distribuição e o estoque.

Da mesma forma que nos modelos monoperíodo, as decisões mais frequentemente integradas à localização de instalações são as decisões de gerenciamento de estoques, níveis de serviço e decisões de transporte. Uma abordagem para integração das decisões é o uso de diferentes escalas de tempo interconectadas: macroperíodos para as decisões estratégicas e microperíodos para as decisões táticas. O trabalho de Salema, Póvoa e Novais (2009) apresenta uma modelagem onde a decisão de localização das facilidades permanece inalterável ao longo do horizonte de tempo, nos macroperíodos se alocam as decisões de não atendimento de demanda e sobre a quantidade de resíduos não coletados, já nos microperíodos se alocam as decisões de produção, fluxos diretos e reversos e estoque nas facilidades.

Fattahi, Mahootchi e Hussein (2016) propõem um modelo para tomada de decisões estratégicas de localização de plantas, CDs e seleção de nível de capacidade, custo de investimento total gasto para projetar/redesenhar a rede, orçamento não gasto; e decisões táticas de produção, transporte, estoque em planta e CDs, demanda não satisfeita, nível de preços dos produtos, custo de abrir ou fechar um CD no problema; com o objetivo de otimização é maximizar o rendimento líquido da rede. Assim como Salema, Póvoa e Novais (2009), dividem o horizonte de planejamento em períodos de tempo diferentes para as decisões estratégicas e táticas. Bashiri, Badri e

Talebi (2012) apresentam um modelo com períodos de tempo diferentes para decisões estratégicas e táticas.

2.2.2.1 Integração de decisões de localização e gerenciamento de estoque em horizonte multiperíodo

A maioria dos modelos multiperíodo que integram a decisão de estoque, definem explicitamente uma variável de estoque para contabilizar a quantidade de produto a estocar em cada período.

Bashiri, Badri e Talebi (2012) e Brahimi e Khan (2014) apresentaram modelos para otimizar as decisões de localização, juntamente com decisões de produção, estoque e transporte.

Gebennini, Gamberini e Manzini (2009) propuseram um modelo para decidir sobre a localização, alocação dinâmica da demanda, taxas de produção e estoque de segurança (o estoque de segurança definido a partir de um parâmetro de fator de segurança para controlar o nível de atendimento ao cliente). Ahmadi, Torabi e Tavakkoli-Moghaddam (2015) apresentam um modelo que integra decisões de localização-alocação de demanda, estoque, fluxos, dimensionamento de frota, atraso e venda perdida, a fim de maximizar lucro e a satisfação dos clientes.

Mousavi et al. (2015) apresentaram um modelo de localização contínua para determinar as coordenadas das localizações dos distribuidores, e simultaneamente determinar o número ideal de pacotes dos produtos ordenado pelos varejistas em cada período, demanda não atendida, tamanho de lote econômico e estoque nos distribuidores, visando minimizar o custo total. Este trabalho define uma variável de estoque por produto encomendado por cada varejista a cada distribuidor em cada período.

2.2.2.2 Integração de decisões de localização e nível de serviço em horizonte multiperíodo

Assim como em modelos monoperíodo, o nível de serviço pode ser especificado previamente. Gebennini, Gamberini e Manzini (2009) propuseram um modelo que considera um fator de segurança para o nível de serviço ao cliente e substitui desvio padrão ($Z_{1-\alpha}$) na equação de cálculo de ponto de reposição de estoque. O ponto de reposição é considerado na função objetivo do modelo para o cálculo do custo de pedido.

Alguns trabalhos apresentam a decisão de quantidade de demanda insatisfeita, como, por exemplo, Sousa, Shah e Papageorgiou (2008), Gebennini, Gamberini e Manzini (2009) e Fattahi, Mahootchi e Hussein (2016). Mousavi et al. (2015) consideram que os produtos são entregues em pacotes de tamanho conhecido, em caso de escassez, uma fração da demanda é considerada em atraso e uma fração de venda perdida. O trabalho de Salema, Póvoa e Novais, (2009) estuda uma rede fechada que considera decisões de não atendimento, tanto para a demanda de produtos como para a não coleta de resíduos, com uma respectiva penalidade na função objetivo.

Outros autores consideram um objetivo adicional para considerar nível de serviço. Ahmadi, Torabi e Tavakkoli-Moghaddam (2015) apresentam um modelo multiobjetivo que visa maximizar lucro e minimizar a insatisfação dos clientes, calculada como o maior número de vendas perdidas de cada cliente durante o horizonte de planejamento. Mousazadeh, Torabi e Zahiri (2015) desenvolveram um modelo multiobjetivo para um problema de configuração de rede de suprimento farmacêutico, que pretende simultaneamente minimizar os custos totais e a demanda não atendida.

Previendo impossibilidade de atender a demanda de períodos futuros, é possível considerar o adiantamento da demanda sob penalização na função objetivo, porém esta consideração não foi encontrada nos trabalhos.

2.2.2.3 Integração de decisões de localização e transporte em horizonte multiperíodo

Todos os trabalhos encontrados na revisão de modelos para o planejamento estratégico e tático de redes logísticas consideram decisões de fluxo, ou seja, da quantidade de produto transportada entre facilidades. Apenas Mousavi et al. (2015) consideram os custos de transporte associados a uma variável de alocação, sem definir explicitamente uma variável de fluxo.

Hammami e Frein (2014) trataram o problema de reconfiguração da cadeia de suprimento, integrando decisões de abertura e fechamento de instalações, localização e realocação de atividades de produção, planejamento de capacidade das instalações com decisões de e distribuição.

A integração de decisões relacionadas à escolha de modal de transporte no problema de localização de instalações é proposta apenas no trabalho de Mousazadeh, Torabi e Zahiri (2015). Estes autores apresentam um modelo para um único produto da indústria farmacêutica (Amoxicilina), considerando apenas a possibilidade de frete fracionado para o transporte.

A quantidade de mercadorias enviadas por cada tipo de frete, completo ou dedicado (*Full truckload-FTL*) ou fracionado (*Less Than Truckload-LTL*) representam fatores importantes para o planejamento da distribuição, porém não foi abordado nos trabalhos estudados (DE LA VEGA et al., 2017).

A Tabela 2 apresenta em resumo as características e considerações feitas nos modelos multiperíodo que integram decisões estratégicas e táticas encontrados na revisão de literatura.

Tabela 2. Sínteses de trabalhos que estudam o problema de localização integrando decisões táticas em um contexto multiperíodo.

Autor	Multi Produto	Multi Modal	Capacidade	Nível serviço	Estoque	Transporte
Sousa, Shah e Papageorgiou (2008)	✓		✓	✓	✓	✓
Gebennini, Gamberini e Manzini (2009)			✓	✓	✓	✓
Hammami, Frein e Hadj-Alouane (2009)	✓		✓			✓
Salema, Póvoa e Novais (2009)	✓		✓	✓		✓
Bashiri, Badri e Talebi (2012)	✓		✓		✓	✓
Badri, Bashiri e Hossein (2013)	✓		✓		✓	✓
Brahimi e Khan (2014)			✓		✓	✓
Ahmadi et al. (2015)	✓		✓	✓	✓	✓
Mousavi et al. (2015)	✓		✓	✓	✓	
Fattahi et al. (2016)	✓		✓	✓	✓	✓
Mousazadeh, Torabi e Zahiri (2015)	✓	✓	✓	✓	✓	✓

2.3 Modelos que consideram aspectos tributários no planejamento

O gerenciamento e controle dos custos tributários são fundamentais para a tomada de decisão no planejamento de redes logísticas. De fato, a integração da política fiscal, impostos e benefícios fiscais, levariam a uma cadeia de suprimento competitiva em termos de custos (BALAJI; VISWANADHAM, 2008).

Os benefícios fiscais impactam a localização das plantas e CDs e, mesmo que a localização das instalações gere aumento nos custos logísticos (custo de transporte e armazenamento), estes custos são facilmente sobrepostos pelos benefícios fiscais incidentes. Os impostos sobre movimentação de mercadorias, que existem em alguns países, são um componente de custo estratégico na determinação de uma rede física de distribuição. Dependendo do local de uma instalação, podem-se pagar menos impostos, devido às taxas diferenciadas de origem-destino. Uma análise pouco aprofundada destas questões tributárias pode gerar decisões equivocadas sobre a configuração da rede de distribuição (BERNARDO e LEITE; 2012)

Na literatura de modelos para planejamento de redes logísticas, foram encontrados poucos trabalhos que abordam estes aspectos, entre eles Avittathur, Shah e Gupta (2005), Balaji e Viswanadham (2008), Bassett e Gardner (2013) e Hammami e Frein (2014).

Na perspectiva de planejamento de redes de suprimento globais, Balaji e Viswanadham (2008) desenvolveram um modelo incorporando tributação para decidir entre as duas alternativas em cada estágio de uma cadeia de suprimentos: estabelecimento de instalações próprias ou terceirização. Já o trabalho de Bassett e Gardner (2013) propõem um modelo para maximizar a rentabilidade, considerando os custos de instalação, produção, custos de transporte, impostos, estoque, implicações regulatórias de toda a rede e preços para diferentes países. As variáveis envolvidas são aquisição de matérias primas, produção, estoque, fluxo e localização.

Supondo a existência de uma rede inicial, Hammami e Frein (2014) trataram o problema de reconfiguração da cadeia de suprimento para aproveitar possíveis vantagens logísticas, financeiras e fiscais oferecidas pelos governos. Os autores apresentam um modelo de otimização que integra decisões de abertura e fechamento de instalações, localização e realocação de atividades de produção e distribuição, produção, fluxos entre facilidades, preços de transferência e planejamento de capacidade das instalações.

Avittathur, Shah e Gupta (2005) abordaram o problema que ocorre na Índia, onde o imposto sobre as vendas chamado *Central Sales Tax* (CST) pode gerar ineficiências logísticas em empresas que operam no país. O CST é uma tarifa aplicável às operações de venda interestaduais, quando um fabricante localizado no Estado A distribui diretamente bens para um cliente do Estado B, a remessa atrai CST, bem como o imposto sobre vendas local do estado B. No entanto, se o fabricante distribuir bens para o mesmo cliente a partir de seu próprio CD localizado no estado B, apenas o imposto de vendas local do Estado B deve ser pago. Assim, para evitar o pagamento de

CST, uma empresa deve manter pelo menos um CD em cada estado, o que equivale a maiores custos de estoque e coordenação dos estabelecimentos. Os autores desenvolveram um modelo para determinar locais de CDs, a alocação de clientes e o impacto do imposto sobre as operações de venda.

As políticas fiscais são próprias de cada país. No Brasil, os trabalhos encontrados consideram a tributação relacionada ao ICMS (Imposto sobre Circulação de Mercadorias e Serviços) e a incentivos fiscais.

2.3.1 Aspectos tributários que impactam o planejamento logístico no Brasil

Toda operação logística no Brasil é taxada pelo ICMS, um imposto estabelecido pela Constituição Federal de 1988, que determina que os estados e o distrito federal possam estabelecer as taxas ou alíquotas do imposto. O ICMS é seletivo, por exemplo, para certos alimentos básicos cobra-se uma alíquota de ICMS de 7% e para produtos considerados supérfluos cobra-se 25%. Em operações de importação e exportação de produtos, também incide o ICMS. Com a atual política fiscal as alíquotas de ICMS de importação e exportação são as mesmas para todos os estados do país, 4%, aliás, estas alíquotas são menores que as alíquotas aplicadas dentro do país, superiores ou iguais a 7%.

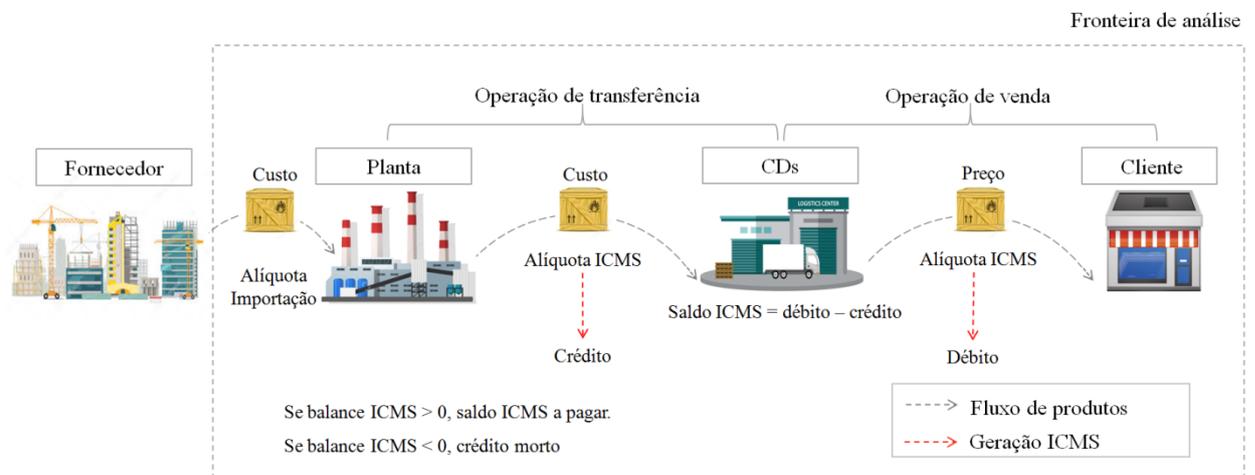
O ICMS é um imposto não cumulativo, com estrutura de débitos e créditos que possibilita que o pagamento do imposto possa ser descontado nas etapas seguintes da rede de distribuição. O fato gerador é a movimentação de mercadorias entre estabelecimentos, ainda que de mesmo titular. O cálculo do ICMS é feito sobre o valor da mercadoria na saída do estabelecimento de origem ou, no caso de prestação de serviços de transporte, sobre o preço do serviço segundo a Lei Complementar 87 de 1996 no seu artigo 13 (BRASIL, 1996). Assim, a movimentação de mercadorias entre instalações da mesma empresa, por exemplo, de uma planta para um CD, se define como uma operação de transferência. Neste caso o cálculo de ICMS é feito sobre o

custo da mercadoria. Já na operação de venda, isto é, movimentação de uma instalação da empresa até o cliente o ICMS é calculado sobre o preço de venda da mercadoria. O sujeito passivo é a pessoa jurídica que realiza operações de circulação de mercadorias ou a prestação de serviços de transportes. O cálculo de ICMS é feito pela fórmula:

$$ICMS = \frac{\text{Valor do produto em \$}}{(1 - \text{Alíquota de ICMS em \%})} - \text{Valor do produto em \$}.$$

A Figura 2 ilustra a base de cálculo de ICMS (DA SILVA, 2007).

Figura 2. Base de cálculo de ICMS.



Fonte: Elaboração própria

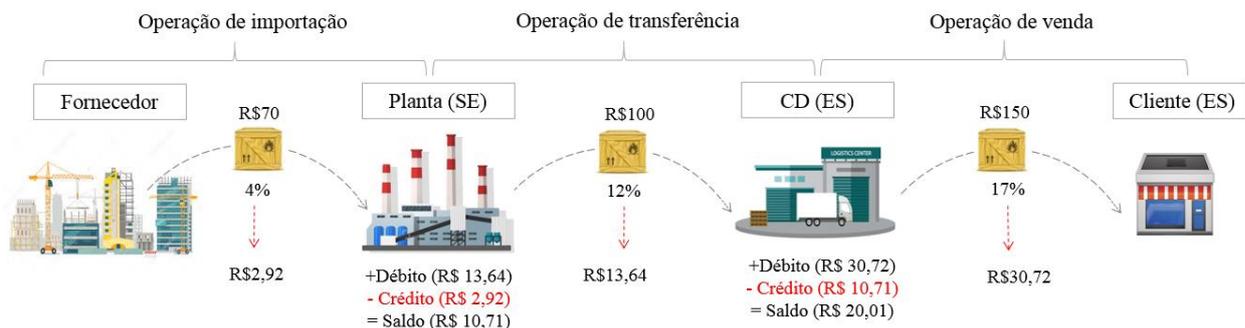
Para atrair a inversão e as operações logísticas dentro de seus estados, alguns governos oferecem benefícios fiscais que permitem reduzir a carga tributária das empresas. Um destes incentivos fiscais é o crédito presumido, através do qual o Estado concede uma redução da taxa de ICMS previamente estabelecida. Logicamente, esta alíquota de crédito presumido sempre vai ser menor que alíquota de ICMS aplicada. Segundo a Secretaria de Fazenda do Estado de São Paulo (2016), o valor do crédito presumido é calculado pela aplicação de uma determinada alíquota sobre o valor do imposto devido na operação, como se mostra a seguir.

$$ICMS = \left[\frac{\text{Valor do produto}}{1 - \% ICMS} - \text{Valor do produto} \right] - \left[\frac{\text{Valor do produto}}{1 - \% \text{Crédito Presumido}} - \text{Valor do produto} \right]$$

$$ICMS = \left[\frac{\text{Valor do produto}}{1 - \% ICMS} - \frac{\text{Valor do produto}}{(1 - \% \text{Crédito Presumido})} \right]$$

Para exemplificar a cobrança e pagamento de ICMS, suponha uma empresa brasileira com operações de importação, produção e distribuição. A empresa importa matérias primas do exterior com valor de \$70, dado que a alíquota de importação é de 4% (para todos os estados), se gera um valor de ICMS de \$2,92. As matérias primas são transformadas em uma planta da empresa situada no Estado de Sergipe (SE) e a seguir se realiza uma transferência do produto, com custo de \$100, da planta para um CD no Espírito Santo (ES). A alíquota de ICMS de SE-ES é de 12%, gerando um valor de ICMS de \$13,64, deduzindo o valor de ICMS já pago na importação, tem-se um montante a pagar de \$10,72. Suponha agora que seja feita uma movimentação corresponde a uma venda do CD para um cliente localizado no mesmo estado. Neste trecho a taxa de ICMS é de 17%, aplicada sobre o preço de venda do produto de \$150, gerando um valor de \$30,72. Como o ICMS não é cumulativo, a transferência anterior constitui um crédito que é subtraído, ou seja, o imposto devido é de \$20. A Figura 3 apresenta graficamente o exemplo.

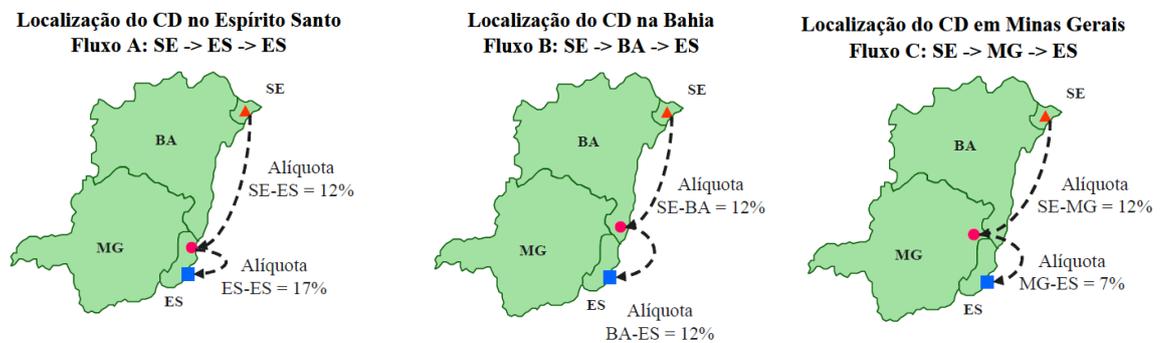
Figura 3. Exemplo de cálculo de ICMS.



Fonte: Adaptado de Da Silva (2007).

Para entender o impacto da tributação no planejamento logístico, considere agora que todas as matérias primas utilizadas pela empresa são nacionais, e que a empresa esteja planejando abrir um novo CD para atender seus clientes no Espírito Santo. As possíveis localizações são Espírito Santo (ES), Bahia (BA) e Minas Gerais (MG). A Figura 4 ilustra as diferenças entre os fluxos e as alíquotas nas três situações mencionadas.

Figura 4. Representação de alíquotas de ICMS e fluxo gerado pelas alternativas de localização do exemplo.



Fonte: Da Silva (2007)

Assim, para transportar uma carga de \$100, da planta em SE para o CD em ES o valor total de ICMS cobrado seria de \$17,08. Suponha agora uma transferência de mercadoria de \$100 da planta em SE para um CD na BA, também gerando um valor de ICMS de \$13,64. Sobre a transferência na operação de venda da BA para o cliente no ES, incide uma taxa de ICMS de 12%, aplicada sobre o preço de venda da mercadoria de \$150, gerando um débito de \$20,45. Porém o estado de Bahia oferece crédito presumido de ICMS de 3%, de forma que o valor real de ICMS a pagar é de \$15,82, do qual se subtrai o crédito pela operação de transferência, obtendo-se um total de \$2,18 de ICMS a pagar. De modo análogo, o cálculo da transferência para MG e depois para o ES gera um valor negativo a ser pago, pois o valor pago na transferência para o CD (\$13,64) é maior que o valor devido na operação de venda (\$11,29). O valor

negativo é chamado de ‘crédito morto’ e não é devolvido pelo Estado, ou seja, não pode ser recuperado pela empresa (DA SILVA, 2007). Os valores de ICMS pagos em cada opção são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3. ICMS pago em cada pelas alternativas de localização do exemplo.

	ES	BA	MG
Planta > CD	\$13,64	\$13,64	\$13,64
CD > Cliente	\$30,72	\$15,82	\$11,29
Balanço no CD	\$17,08	\$2,18	\$2,35
ICMS pago na rede	\$30,72	\$15,82	\$13,64

Alguns trabalhos da literatura proíbem a geração de crédito morto via restrições. A tabela 3 mostra que mesmo com gerando crédito morto, algumas soluções podem reduzir o montante total de ICMS a pagar, por isso neste trabalho, o crédito morto é penalizado na função objetivo, mas não é proibido.

Este exemplo mostra como a configuração da rede de distribuição pode ser impactada pelas diferenças nas alíquotas de ICMS dos estados e alíquotas de crédito presumido. É possível estabelecer algumas relações entre estas alíquotas:

- Alíquota de ICMS na operação de transferência $> = <$ Alíquota de ICMS na operação de venda.
- Alíquota de ICMS $>$ Alíquota de ICMS de importação.
- Alíquota de ICMS $>$ Alíquota de ICMS de crédito presumido.

Entre estes trabalhos que consideram questões tributárias relacionadas com ICMS na literatura destacam-se Pantalena (2004), Junqueira e Morabito (2006), Da Silva (2007), Bernardo e Leite (2012) e Carraro e Yoshizaki (2009).

O trabalho de Pantalena (2004) foi o pioneiro, apresentando um modelo de localização de CDs para o caso de uma indústria química que produz insumos agrícolas. O modelo visa minimizar custos de instalação, transporte e custo de ICMS. Para isto,

inclui na função objetivo parcelas para o cálculo de ICMS pela circulação de mercadorias entre uma planta e os CDs candidatos.

Junqueira e Morabito (2006) propõem um modelo para auxiliar o planejamento agregado da produção e logística de sementes de milho, visando minimizar custos de produção, logísticos e fiscais, atendendo às restrições de programação da colheita, capacidade das plantas e demanda dos clientes. Os resultados mostraram a importância de se considerar os custos fiscais de ICMS no planejamento desta rede.

Para considerar os incentivos fiscais, Da Silva (2007) apresenta um modelo matemático para a configuração de rede logística minimizando o custo total, incorporando na função objetivo uma parcela de benefício fiscal por aproveitar crédito presumido. O modelo tem uma restrição de saldo nulo ou zero para garantir que não gera de crédito morto; porém, esta restrição pode cortar boas soluções do problema.

Bernardo e Leite (2012) propõem um modelo para o problema de localização, minimizando os custos de abertura e transporte, e maximizando margem e benefício fiscal. A margem é calculada subtraindo os custos das mercadorias que chegam ao CD incluindo ICMS e o saldo do valor de venda das mercadorias que saem do CD incluindo ICMS.

Carraro e Yoshizaki (2009) propõem um modelo de programação inteira mista para avaliar os *trade-off* existentes entre os custos logísticos, os incentivos fiscais baseados no ICMS e as variações no volume de emissões de carbono gerados nos problemas de localização de facilidades. Na função objetivo o modelo contempla parcelas de custo de localização de plantas e CDs, custos de transporte e trasbordo, custo ambiental do CO₂ emitido e uma parcela de ganho fiscal. Os autores consideraram vários cenários com base em dados reais de uma empresa de bens de consumo no Brasil, e os resultados indicam que os benefícios fiscais podem reduzir o custo total, porém os custos ambientais por emissão de carbono são desconsiderados.

Segundo os autores, estes resultados indicam que a política fiscal brasileira pode resultar em aumentos na emissão de poluentes, além de maior desgaste e fluxo de veículos pelas rodovias do país. Isso concorda com o exposto por Shah (2004), que muitas vezes ao considerar implicações fiscais na configuração de rede, estas têm precedência sobre questões de logística, resultando em cadeias de suprimento potencialmente mais complicadas, pois as considerações fiscais podem facilmente dominar sobre os custos logísticos.

2.4 Modelos para o planejamento de distribuição de medicamentos

Poucos trabalhos na literatura abordam modelos para o planejamento de redes logísticas da indústria farmacêutica. A maior parte dos trabalhos encontrados foca no planejamento da produção e da distribuição, sendo que apenas os trabalhos de Saif e Elhedhli (2016) e Mousazadeh, Torabi e Zahiri (2015) consideram decisões relacionadas com a configuração da estrutura física da rede.

Levis e Papageorgiou (2004) estudam a tomada de decisões sobre produção e estoque em uma rede farmacêutica com incerteza em relação ao sucesso de ensaios clínicos de um conjunto de potenciais fármacos. O sucesso dos ensaios clínicos é necessário para a autorização da comercialização por parte das entidades sanitárias. Considera-se que a probabilidade de sucesso dos ensaios clínicos dos produtos é conhecida, assim é utilizada uma abordagem de programação estocástica de dois estágios. As decisões estratégicas, tomadas antes de conhecer o sucesso dos ensaios clínicos, consistem em determinar o portfólio de produtos, a sua alocação aos locais produtivos e a estratégia de investimento. As decisões operacionais, tomadas após conhecer os resultados dos ensaios clínicos, correspondem ao planejamento de vendas e ao dimensionamento de estoque de modo a maximizar o valor presente líquido esperado.

Amaro e Póvoa (2008) apresentam uma abordagem sequencial para decidir sobre planejamento e programação da produção de uma cadeia de suprimento com fluxo reverso para maximizar lucro na indústria farmacêutica. São desenvolvidos dois modelos, o primeiro para decidir sobre plano agregado da produção para todo o horizonte de planejamento e o segundo para a programação da produção em cada período. A ligação entre o planejamento e a programação é realizada sequencialmente através de duas escalas de tempo interconectadas: macro e microperíodos.

O planejamento de estoques, produção e distribuição de medicamentos também é abordado por Susarla e Karimi (2012) e Uthayakumar e Priyan (2013). O trabalho de Susarla e Karimi (2012) considera os efeitos dos impostos, custos de manutenção de estoque e tratamento/disposição de resíduos farmacêuticos sobre o lucro. Enquanto Uthayakumar e Priyan (2013) desenvolveram um modelo para atingir um determinado nível de serviço e minimizar os custos logísticos em um sistema composto por uma empresa e um hospital.

Sousa, Shah e Papageorgiou (2005) apresentaram um modelo para decidir sobre a alocação de produção dos produtos às plantas, transferências de produtos finais a CDs, produção, estoque, transporte e demanda não atendida. O objetivo é maximizar o valor de lucro líquido da empresa em um contexto multiperíodo e considerando as categorias de produtos, primários e secundários. No mesmo contexto, Sousa *et al.* (2011) consideram que cada produto será produzido em um único local (política de abastecimento único), no entanto, a atribuição do produto/local pode mudar ao longo do horizonte de planejamento, refletindo a prática real da empresa. Assim, apresentam um problema de planejamento e alocação dinâmica da cadeia de fornecimento global de uma empresa farmacêutica com uma longa lista de produtos em seu portfólio e uma extensa rede de centros produtivos com locais em todo o mundo com as mesmas decisões de modelo apresentado por Sousa, Shah e Papageorgiou (2005).

Particularmente para cadeias frias (*cold-chain*), Saif e Elhedhli (2016) apresentam um modelo multiobjetivo para a configuração da rede de suprimentos. Segundo os autores as cadeias frias resultam em altos níveis de emissões de gases de efeito estufa devido ao alto consumo de energia e às perdas de gás refrigerante no transporte de produtos e nos CDs. Com esta motivação, o modelo proposto visa minimizar o custo total de abertura de centros de armazenamento, estoque e transporte; e um segundo objetivo de minimizar a emissão de gases efeito estufa gerada pelo consumo de energia e às perdas de gás refrigerante em armazéns e veículos. As decisões envolvidas são de abertura de centros, transporte e alocação de demanda, considerando múltiplos produtos e frota heterogênea. A localização dos centros influencia diretamente às distâncias entre instalações, a determinação dos fluxos influencia no número de quilômetros percorridos; conseqüentemente, estas decisões influenciam o consumo de energia.

Finalmente, o trabalho de Mousazadeh, Torabi e Zahiri (2015) considera o planejamento da rede logística de medicamentos. Estes autores desenvolveram um modelo multiobjetivo para um problema de configuração de rede de suprimento farmacêutico, que pretende simultaneamente minimizar os custos totais e a demanda não atendida. O modelo envolve decisões estratégicas de localização e dimensionamento de plantas e CDs e decisões táticas de produção, fluxo e estoque de produtos para múltiplos períodos. Consideraram parâmetros incertos de demanda, custos unitários de produção, transporte, níveis de estoque de segurança devido à indisponibilidade de produtos, bem como à natureza dinâmica e imprecisa dos dados, que devem ser estimados principalmente baseando-se nas opiniões e experiências subjetivas de especialistas. Uma abordagem que combina programação robusta e programação possibilista (associada a teoria *fuzzy*) é usada para lidar com as incertezas. Para verificar e analisar o modelo proposto, ele é testado em um estudo de caso real de uma cadeia de distribuição de Amoxicilina no Irã.

2.5 Conclusões da revisão de literatura

A revisão de literatura do problema de integração de decisões estratégicas e táticas para o planejamento de redes logísticas mostra que muitos trabalhos abordam este problema de forma estática. Ou seja, consideram a tomada de decisões para todo o horizonte de planejamento, o que obriga a agregar informações de custos, demandas e tempos comprometendo a qualidade das soluções encontradas (DIABAT; THEODOROU, 2015; ZHANG; LEE; ZHANG, 2016). Isto porque, decisões estratégicas de localização, que tem um horizonte de planejamento de longo prazo, e decisões táticas como transporte e estoques, que variam ao longo do horizonte, são abordadas conjuntamente em uma mesma linha de tempo.

Como a abordagem monopériodo é menos representativa para a maior parte dos problemas práticos, alguns autores propõem um enfoque multipériodo, onde as decisões são vinculadas a cada período de tempo, de acordo com as mudanças e variações de demanda, por exemplo Farahani et al. (2014) e Mousavi et al. (2015). Geralmente, as decisões estratégicas são tomadas no início do horizonte de planejamento e as decisões táticas são tomadas para cada período de tempo. Particularmente Fattahi, Mahootchi e Hussein (2016); Salema, Póvoa e Novais (2009) utilizam uma abordagem de duas escalas de tempo interconectadas para integrar as decisões.

As decisões estratégicas estudadas nos artigos foram localização e, em alguns casos, a decisão de alocação, enquanto as principais decisões táticas foram decisões de transporte, de gerenciamento de estoques e do níveis de serviço.

Dentre todos os trabalhos encontrados na literatura, o modelo proposto por Mousazadeh, Torabi e Zahiri (2015) é o mais próximo em relação ao problema de planejamento da rede de distribuição de medicamentos considerado neste trabalho. Isto porque o modelo integra a tomada de decisões de localização de CDs (seleção de locais existentes de propriedade do operador logístico) com decisões táticas de dimensionamento

de estoque, fluxo e escolha de modais de transporte para uma rede farmacêutica. No entanto, Mousazadeh, Torabi e Zahiri (2015) consideram o transporte de cargas fracionadas para um único produto e não consideram a necessidade de armazenamento e transporte em cadeia fria. Além disso, não abordam questões relacionadas à segurança do transporte, como a utilização de escolta armada ou limites de seguro para o valor das cargas. Adicionalmente, esta pesquisa considera no planejamento de rede de distribuição questões tributárias associadas a ICMS, a saber, geração de crédito morto e benefícios fiscais por crédito presumido.

3 A REDE DE DISTRIBUIÇÃO DE MEDICAMENTOS

Este capítulo descreve o problema de distribuição de medicamentos, apresentando o contexto geral da indústria farmacêutica no Brasil e os desafios para o planejamento da distribuição de medicamentos da empresa, objeto do estudo de caso. O objetivo desta descrição é a caracterização da operação logística, tanto em relação à estrutura da rede atual, quanto em relação ao processo decisório do planejamento logístico. Também são discutidas algumas abordagens da literatura de modelos de planejamento para a indústria farmacêutica.

3.1 Aspectos gerais da indústria farmacêutica

Segundo a INTERFARMA (Associação da Indústria Farmacêutica de Pesquisa), em 2015 os mercados mais importantes da América Latina foram Brasil, Venezuela, México e Argentina, nesta ordem. Ainda de acordo com esta associação, o Brasil é um dos maiores consumidores de medicamentos do mundo, em cinco anos o país passou da 10^o posição para a 7^o posição no *ranking* mundial de vendas e a estimativa é que em 2020, o país ocupe a 5^o posição (INTERFARMA, 2016).

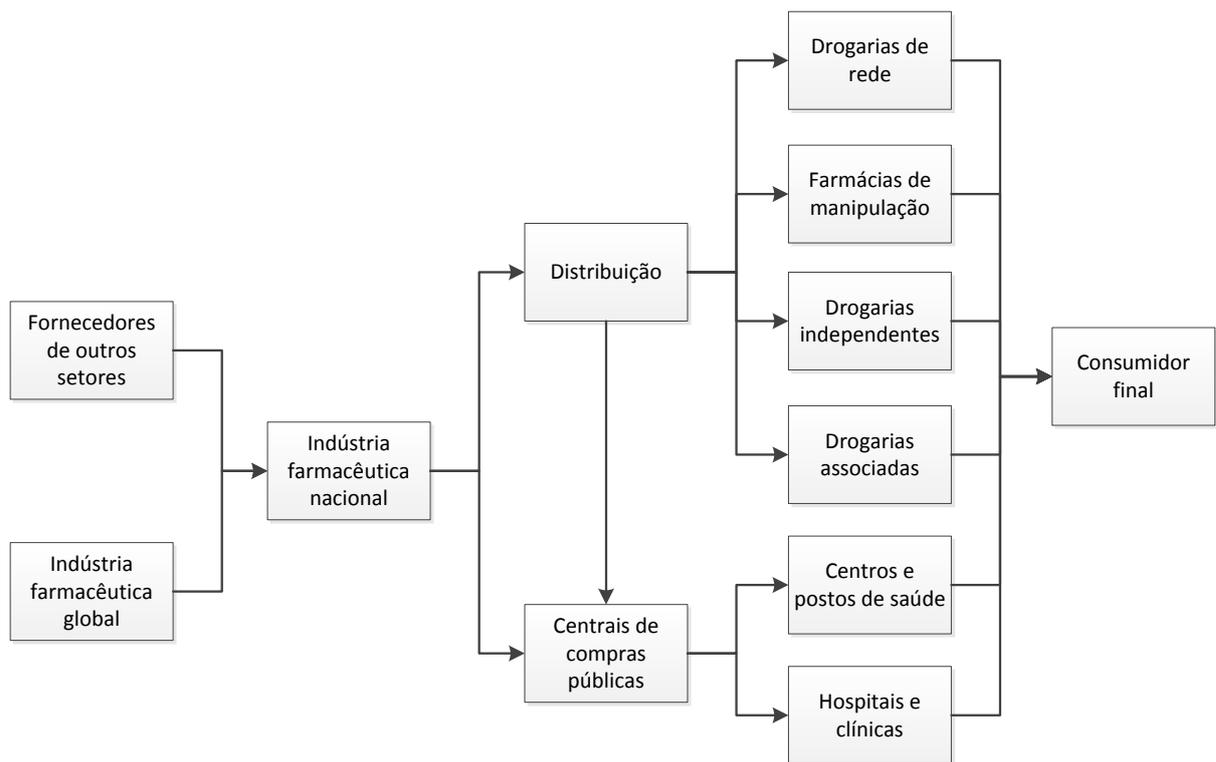
A organização da cadeia de suprimentos da indústria farmacêutica envolve diversas empresas, desde fornecedores da indústria química e de embalagens, passando por empresas dedicadas à importação, fabricação e distribuição até empresas dedicadas à comercialização de medicamentos (HIRATUKA et al., 2013). A Figura 5 apresenta uma estrutura geral desta cadeia, destacando a relação da indústria brasileira com os demais agentes da cadeia.

Estima-se que a indústria farmacêutica brasileira agrupe cerca de 600 empresas entre fornecedores, laboratórios, importadores e distribuidores. Em termos dos canais de comercialização, existem mais de 70.000 farmácias e drogarias nos diferentes estados do país (HIRATUKA et al., 2013). O Brasil possui o maior índice de farmácias por

habitante no mundo, com 3,34 farmácias para cada grupo de 10 mil habitantes, sendo que a Organização Mundial da Saúde (OMS) recomenda uma farmácia para cada grupo de 8 a 10 mil habitantes (GRACIANI; FERREIRA, 2014).

Os hospitais e clínicas também fazem parte da rede farmacêutica e constituem um importante elo na entrega de medicamentos. A rede hospitalar brasileira agrupa mais de 11 mil estabelecimentos distribuídos em 6.422 hospitais, 774 unidades de pronto socorro e 4.346 policlínicas (HIRATUKA et al., 2013). Este universo de entidades somado à extensão territorial do país faz com que a cadeia de suprimentos de medicamentos no Brasil tenha ampla capilaridade e, por sua vez, alta complexidade.

Figura 5. Cadeia de suprimento farmacêutica



Fonte: Adaptado de Hiratuka et al., (2013)

No que tange à regulação do setor farmacêutico no Brasil, a Agência Nacional de Vigilância Sanitária (ANVISA) é o principal agente de regulação, tendo como característica a independência administrativa e autonomia financeira. Sua finalidade é

promover a proteção da saúde da população através do controle sanitário da produção e da comercialização de produtos e serviços (HIRATUKA et al., 2013).

O principal modal utilizado no transporte de medicamentos no Brasil é o rodoviário (ENCIMA, 2012). De acordo com os dados da Confederação Nacional de Transporte (CNT, 2016), o transporte rodoviário representa cerca de 60% da movimentação de cargas no Brasil. A CNT apresenta um relatório da pesquisa realizada em 2016 no qual expõe que a extensão total das rodovias brasileiras gira em torno de 1.720.756 km, onde apenas 12,3% estão pavimentadas. Aliás, o estado geral das vias é deficiente, 58,2% dos trechos de vias analisadas apresentaram algum tipo de deficiência, seja no pavimento, na sinalização ou na geometria da via. O mau estado do sistema rodoviário gera elevados custos de operação dos serviços de transporte, dada a frequente manutenção dos veículos e o aumento do consumo de combustível (CNT, 2016a).

Diante dos problemas decorrentes da má estrutura das estradas, a distribuição e o transporte de medicamentos exige ainda mais atenção, pois os produtos são biologicamente ativos e frequentemente reativos (MEDEIROS; MOREIRA; LOPES, 2014); são sensíveis a choques mecânicos e condições ambientais. A temperatura, por exemplo, é o fator ambiental responsável pelo maior número de alterações e deterioração dos medicamentos. A alta temperatura é contraindicada porque pode acelerar a indução de reações químicas e biológicas, ocasionando a decomposição dos produtos, diminuindo a eficácia, segurança e qualidade, alterando os prazos de validade, e podendo afetar a saúde dos consumidores. Segundo sua composição, os medicamentos devem ser conservados em diferentes intervalos de temperatura especificados pelos fabricantes. Manter a temperatura controlada ou a refrigeração durante toda a cadeia, em um país de grande extensão e clima tropical, como o Brasil, gera altos custos por consumo de energia e combustível (SAIF; ELHEDHLI, 2016).

Procedimentos inadequados significam riscos para a saúde dos consumidores, portanto, durante toda a cadeia, deve-se manter controle de identidade e condições ambientais para garantir eficácia, qualidade e segurança dos produtos farmacêuticos (MINISTÉRIO DA SAÚDE, SECRETARIA DE VIGILÂNCIA SANITÁRIA, 2008). De acordo com a resolução nº 357 de 20 de abril de 2001 no artigo 109, o transporte de medicamentos deverá assegurar que os produtos cheguem aos usuários em perfeitas condições de conservação e segurança, cumprindo as requisições de temperatura, luminosidade e umidade especificadas pela (ANVISA, 2009).

Outro fator que merece atenção refere-se ao fato dos veículos estarem expostos a roubos frequentes. Segundo a Associação Nacional de Transporte de Cargas e Logística (NTC), o Sudeste do país concentra 85,7% dos casos de roubo. O estado de São Paulo é o que lidera a lista, contabilizando 44,1% das ocorrências. Os produtos farmacêuticos estão entre aqueles mais visados (CNT, 2016b). Por isso, as empresas estão investindo em sistemas de contratação de escolta armada, serviços de seguradoras e gerenciadoras de risco, para preservar a integridade física dos motoristas, dos veículos e das cargas transportadas, o que implica custos ainda mais elevados de transporte (CORRÊA; AGUIAR, 2012). O valor do seguro alcança, por exemplo, cerca de 15% do custo da mercadoria.

O transporte aéreo também é empregado no transporte de medicamentos, pois fornece maior segurança e redução dos custos com seguro, e pode percorrer longas distâncias em menor tempo, sendo adequado para mercadorias com urgência na entrega. Por outro lado, o valor do frete é mais elevado em relação ao transporte rodoviário e o número de aeroportos com autorização da ANVISA para a movimentação de medicamentos é bastante reduzido no Brasil.

Com este panorama, a distribuição de medicamentos no Brasil precisa ser planejada cuidadosamente, para entregar ao cliente produtos com as condições de qualidade necessárias, nos prazos estabelecidos, ou seja, com elevados níveis de serviço

e com os menores custos logísticos possíveis. Falhas na distribuição de medicamentos, seja por escassez ou por procedimentos inadequados, podem acarretar em consequências irreparáveis para os consumidores finais, especialmente quando se trata de medicamentos usados no tratamento de doenças graves. Além do mais, quaisquer tipos de falhas podem afetar negativamente a imagem das empresas do setor.

3.2 A rede de distribuição da empresa objeto de estudo de caso

O desenvolvimento desta pesquisa é baseado no estudo de caso de uma das maiores empresas farmacêuticas do mundo, que está presente em mais de 120 países. A empresa tem um faturamento anual de mais de US\$ 30 bilhões no mundo, sendo que no Brasil o faturamento é superior a US\$ 3 bilhões. Por motivos de confidencialidade das informações fornecidas, a empresa não é identificada neste trabalho.

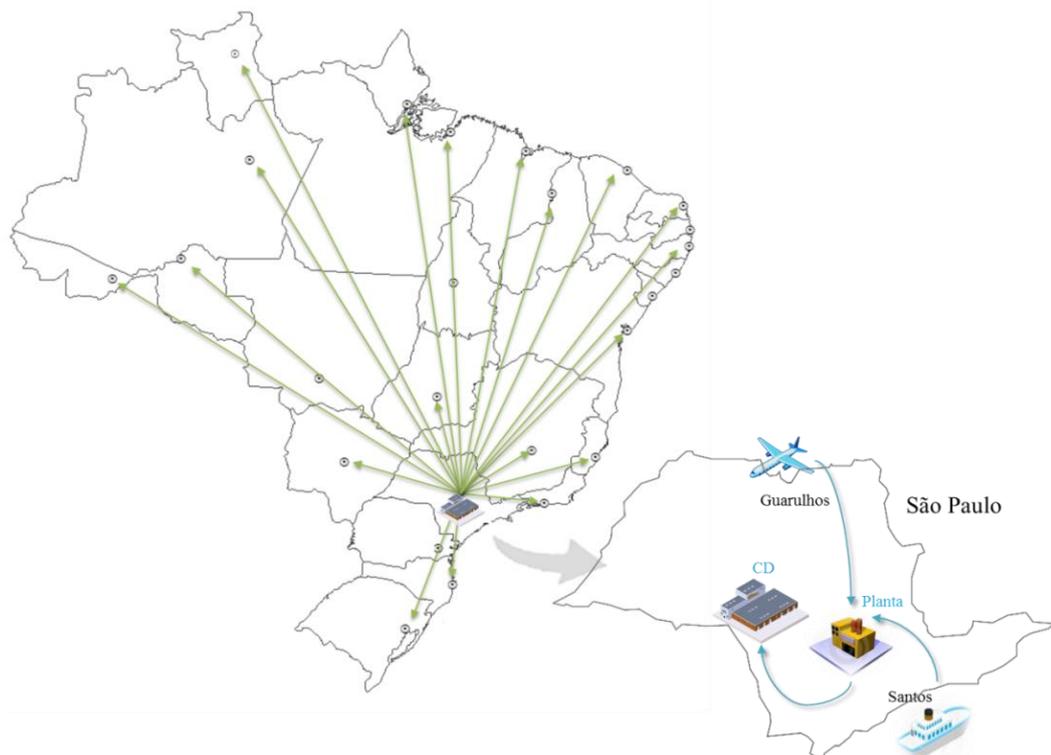
O portfólio de produtos da empresa é bastante amplo com mais de 250 itens diferentes, que incluem desde medicamentos de venda liberada sem indicação médica, como comprimidos antitérmicos, até medicamentos altamente especializados para doenças raras. A carteira de clientes da empresa é composta por instituições públicas e privadas: redes farmacêuticas, farmácias independentes, postos de saúde, hospitais e clínicas, dispersos em todos os estados do país.

3.2.1 Descrição da Operação Logística

No Brasil, a empresa possui plantas industriais onde são produzidos uma pequena parte dos seus produtos. A maior parte dos produtos comercializados no país é importada de plantas que a empresa possui no exterior. Destes, a maioria é importada a granel, sendo embalados em cartelas ou frascos (dependendo das características do produto) nas plantas industriais nacionais. Após a embalagem e empacotamento, os medicamentos são levados para armazenamento em um CD, pois as plantas industriais não armazenam os produtos.

As operações de armazenamento e distribuição são terceirizadas, sendo executadas por um operador logístico altamente especializado, que possui experiência nacional e internacional na logística do setor farmacêutico. O operador logístico atua nas operações de recepção de produtos no CD, armazenamento, despacho e transporte dos produtos para os clientes, garantindo durante todo o processo as condições requeridas pelos produtos e as exigências das entidades reguladoras do setor. Atualmente, a empresa centraliza suas operações de armazenamento e distribuição em um único CD, localizado próximo às fábricas. A Figura 6 ilustra as operações logísticas da empresa no Brasil e a estrutura da rede de distribuição atual.

Figura 6. Esquema das operações logísticas da empresa no Brasil.



Fonte: Elaboração própria

Na rede farmacêutica, a localização de instalações é resultante de processos de aquisição e fusão de empresas, típicos deste setor farmacêutico. As decisões de localização de plantas industriais envolvem alto custo e complexidade, devido ao elevado investimento em tecnologia, ajuste à ampla e rigorosa legislação aplicável, entre

outros fatores. Dado que o armazenamento é terceirizado, localizar novos CDs não implica incorrer em custos de construção e compra de equipamentos necessários para armazenagem. A empresa só deve pagar um seguro pela a descentralização do estoque para o abastecimento dos novos CDs e o custo de operação dos novos CDs. Assim, as decisões de localização de CDs são mais viáveis e frequentes, fornecendo proximidade aos mercados consumidores, que pode interferir significativamente no desempenho da rede logística.

Neste sentido, como a estrutura da cadeia de medicamentos está sujeita a reestruturações e variações macroeconômicas de mercado, de tempos em tempos a empresa reavalia a malha logística, a possibilidade de descentralizar a operação em mais de um CD e as possíveis localizações dos CDs. Recentemente foi contratada uma consultoria especializada, que avaliou a operação de distribuição da empresa, analisando vários cenários de estrutura da rede. Estudou os custos logísticos incorridos com o aluguel de novos CDs em vários estados do país, para indicar pontos de melhoria na estrutura da rede de distribuição. Também foi feito outro estudo para a localização de CDs, considerando aspectos tributários associados a ICMS.

Os custos logísticos da empresa consistem basicamente nos custos de armazenamento e de transporte. O estoque de produtos nos CDs tem um custo de manutenção que depende das condições nas quais os medicamentos devem ser armazenados, temperatura ambiente ou cadeia fria, e das quantidades armazenadas. Já as atividades de transporte são contratadas mediante tabelas de preços previamente negociadas para as diferentes alternativas disponíveis. Segundo HIRATUKA et al. (2013), os custos de transporte variam principalmente em função das condições da malha, da idade média da frota de caminhões e dos altos índices de tráfego de veículos nos grandes centros urbanos. No caso da empresa estudada, o custo das alternativas de transporte varia em função dos seguintes fatores:

- Modal de transporte: aéreo ou rodoviário;
- Tipos de frete: completo/dedicado ou fracionado;
- Capacidade de carga do veículo;
- Acondicionamento de carga: movimentação de carga seca ou fria;
- Distância percorrida entre pontos de origem e destino;
- Outros fatores como acesso, estado e segurança das rodovias ou aeroportos.

Em relação ao tipo de carga, a empresa considera a alternativa de enviar carga completa (*Full truckload -FTL*), que pode utilizar veículos de diferentes capacidades em volume (*fiorino, toco, truck, carreta e truck refrigerado*), e a alternativa de carga fracionada (*Less Than Truckload-LTL*), para envios de volumes menores, compartilhando o frete com produtos de outras empresas.

O transporte de quantidades menores leva a custos reduzidos associados aos estoques dos retalhistas, mas requer custos adicionais de frete. No modal rodoviário, o custo da carga fracionada depende do peso da mercadoria, e só é possível enviar produtos a temperatura ambiente. Já o custo de carga completa depende da capacidade do veículo usado, que pode ser em peso ou em volume, dependendo das características dos produtos. No modal aéreo tem-se um custo diferenciado para o transporte de produtos a temperatura ambiente e em cadeia fria, o qual depende do peso da mercadoria enviada. Adicionalmente, existe um custo para o transporte entre o CD e o aeroporto de origem e entre o aeroporto de destino e o cliente.

Mediante estes aspectos, o operador logístico define para a empresa uma estrutura de preços, por faixas de peso da carga, para o caso das alternativas fracionadas, e por veículo utilizado, para o caso de alternativas de transporte dedicado. A Tabela 4 resume estas informações.

Tabela 4. Base para cálculo do custo de transporte para as diferentes alternativas utilizadas.

Tipo de Modal	Tipo de carga	BASE DE CÁLCULO PARA CUSTO DE TRANSPORTE	
		Temperatura Ambiente	Refrigerado
Rodoviário	Fracionada	Custo por faixa de peso / distância (origem-destino)	-
	Completa	Custo de cada tipo de veículo / distância (origem-destino)	Custo do veículo próprio / distância (origem-destino)
Aéreo	Fracionada	Custo por faixa de peso / distância (origem-destino)	Custo por faixa de peso / distância (origem-destino)

Devido aos altos índices de roubo de cargas e de acidentes durante o transporte, existem restrições sobre o fluxo de produtos associadas ao valor em unidades monetárias da carga. Isto é, as seguradoras estabelecem limites para o valor total da carga transportada, a partir do qual não cobram por eventualidades como acidentes, perdas ou roubos, portanto é indesejável o transporte de cargas com valor superior ao limite. Além disso, existe um limite de valor monetário da carga, acima do qual os veículos precisam ser escoltados durante o percurso, incorrendo em custos extras para o transporte.

Para manter um nível de serviço adequado e para não pôr em perigo as características físico-químicas dos produtos, a empresa não realiza envio de carga fracionada pelo modal rodoviário caso a distância entre origem e destino sejam muito grandes (superiores a 3100 km). Ainda em relação ao transporte, devido à estrutura aeroportuária brasileira, não é possível envios de carga pelo modal aéreo dentro do mesmo Estado.

No planejamento operacional da distribuição, conforme a empresa recebe os pedidos dos clientes, avalia a viabilidade de cumprir os prazos e condições de entrega, considerando as alternativas de transporte negociadas previamente. Desta forma, tanto a estrutura física da rede, mais especificamente a localização do CD, quanto a estrutura

planejada para o transporte, afetam toda a dinâmica da operação. Em outras palavras, as decisões do planejamento estratégico e tático são fatores determinantes para o bom desempenho no nível operacional. A observação desta situação prática corrobora a afirmação de alguns autores, como Fleischmann e Meyr, (2003); Melo, Nickel e Saldanha-Da-Gama, (2009), de que as decisões de localização impõem uma forte simplificação sobre os níveis tático e operacional.

Embora o planejamento da malha logística, feito pela consultoria contratada, tenha considerado as decisões de transporte, os dados foram muito agregados. Por exemplo, os produtos foram divididos apenas em dois tipos, considerando apenas a condição de temperatura para armazenamento e transporte, e foram considerados apenas os cinco clientes com maior faturamento nas cidades com maior faturamento. A consideração dos parâmetros de forma agregada para o planejamento da rede de distribuição física pode implicar em soluções subótimas para os demais níveis de planejamento. De fato, embora a empresa tenha como estratégia competitiva o foco no atendimento ao cliente (nível de serviço), a diferença entre os custos logísticos previstos no planejamento da rede e os custos logísticos efetivos praticados pela empresa apresentam diferenças significativas ao longo dos períodos.

Neste contexto, os desafios para o planejamento da rede de distribuição observados na empresa envolvem a integração de decisões nos níveis estratégico e tático. A Tabela 5 resume as principais decisões envolvidas no contexto da empresa estudada.

Tabela 5. Decisões envolvidas no planejamento da rede de distribuição de medicamentos da empresa estudada.

Decisões estratégicas	É necessário usar novos CDs para realizar a distribuição de produtos? Em caso afirmativo, onde estes CDs devem estar localizados.
Decisões táticas	Quais clientes atender a partir de cada CD? Quais alternativas de transporte utilizar? Quando usar escolta? Quanto produto estocar em cada CD?

Considerar simultaneamente todas estas decisões no planejamento da rede de distribuição é uma atividade bastante complexa, envolve a definição de escalas de tempo adequadas para cada tipo de decisão e requer a utilização de ferramentas estruturadas de apoio à decisão, como os modelos de programação matemática propostos na literatura e discutidos no capítulo 2. Assim, no capítulo 4 se apresenta uma modelagem matemática para auxiliar a tomada destas decisões e no capítulo 5, trata-se a agregação da demanda em escalas de tempo diferente para a tomada de decisões táticas, a fim de determinar a escala mais adequada para o estudo de caso.

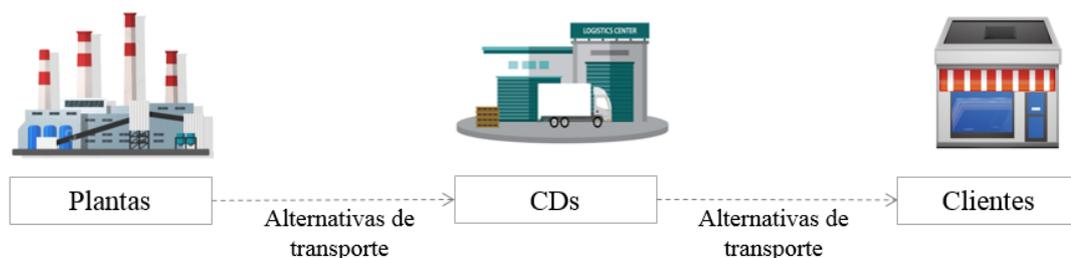
4 MODELAGEM DO PROBLEMA

A proposta deste trabalho é formular um modelo de programação matemática para apoiar as decisões estratégicas e táticas envolvidas no problema de planejamento da rede de distribuição de medicamentos discutidos anteriormente. Neste capítulo, primeiramente são apresentadas as considerações e pressupostos para a modelagem do problema, levantadas a partir do estudo de caso realizado em uma empresa do setor farmacêutico com operações no Brasil e, a partir destas premissas são propostos dois modelos de otimização para o planejamento logístico da empresa estudada, que podem ser utilizados para outras empresas da indústria farmacêutica. Os modelos também são facilmente adaptáveis para realizar o planejamento de rede de outros setores que requerem segurança no transporte de carga como indústria de eletrônicos e autopeças, e/ou setores que requerem conservação de produtos em cadeia fria, como indústria química e alimentícia.

4.1 Considerações e pressupostos

A rede de distribuição de medicamentos é composta basicamente por fábricas, CDs e vários pontos de entrega aos clientes. A conexão entre os diferentes pontos da rede é feita por diferentes alternativas de transporte. Todos os produtos são enviados aos clientes através do CD, ou seja, não são enviados produtos diretamente das plantas para os clientes. A Figura 7 mostra a estrutura geral da rede de distribuição.

Figura 7. Eixos da rede de distribuição.

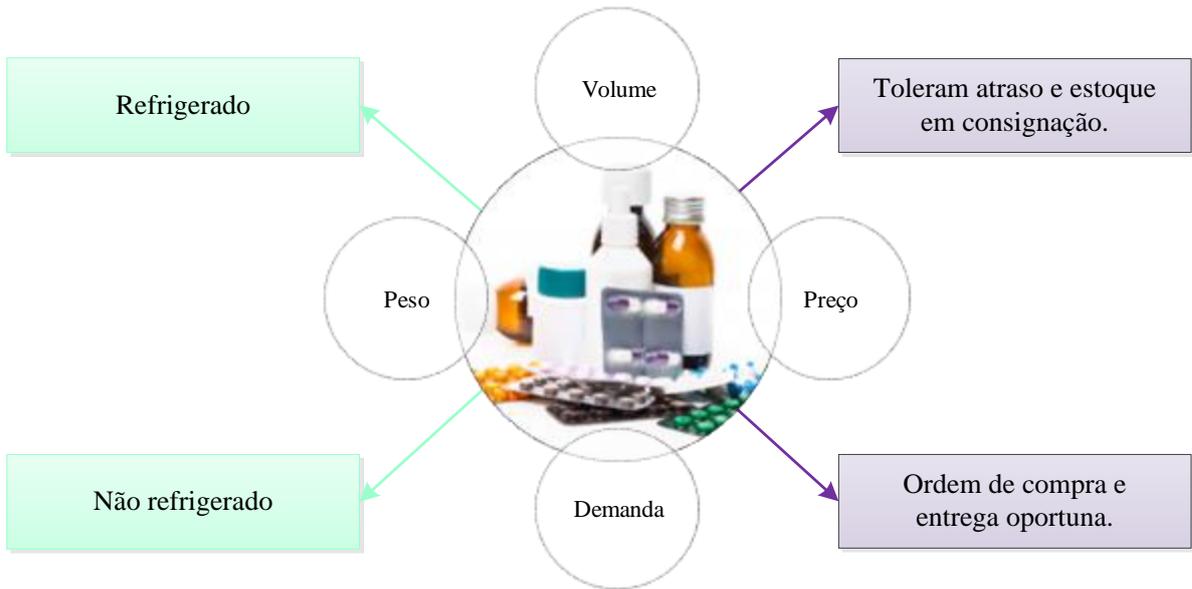


Fonte: Elaboração própria

Para a modelagem do problema assumimos que a localização das plantas é conhecida pelas razões expostas na sessão 3.2.1. Assim, as decisões de localização consistem em determinar quais locais preexistentes de propriedade do operador logístico selecionar para a operação de CDs. Como os operadores logísticos, possuem instalações com grande capacidade de armazenamento, não são consideradas restrições de capacidade.

Se considera a distribuição de múltiplos produtos, que apresentam diferenças em volume, peso, preço e demanda, assim como a condição de temperatura requerida para o transporte, cadeia fria ou temperatura ambiente (refrigerado ou não refrigerado), como mostra a Figura 8. Alguns produtos da empresa, geralmente aqueles produtos com vendas regulares, podem ser entregues após o prazo estabelecido, sem incorrer em perdas de venda. Ou seja, caso um pedido não possa ser atendido em determinado período, é possível atender a essa demanda em períodos seguintes. No entanto, a política de atendimento da empresa está voltada estrategicamente para manter um alto nível de serviço, e reduzir a possibilidade de atrasos nas entregas. Desta forma, embora seja possível ter atrasos na entrega de determinados produtos, não é ‘desejável’ e, portanto, devem ser penalizados na proposição do modelo. Outra estratégia para equilibrar a demanda e a capacidade da rede de distribuição é a entrega antecipada, colocando estoques em consignação nos clientes, sob um custo de estoque. Da mesma forma que o atraso, esta alternativa não está alinhada com o posicionamento estratégico da empresa. Mas diferentemente do caso de atrasos na entrega, é mais tangível quantificar os custos para manter o produto em estoque no cliente.

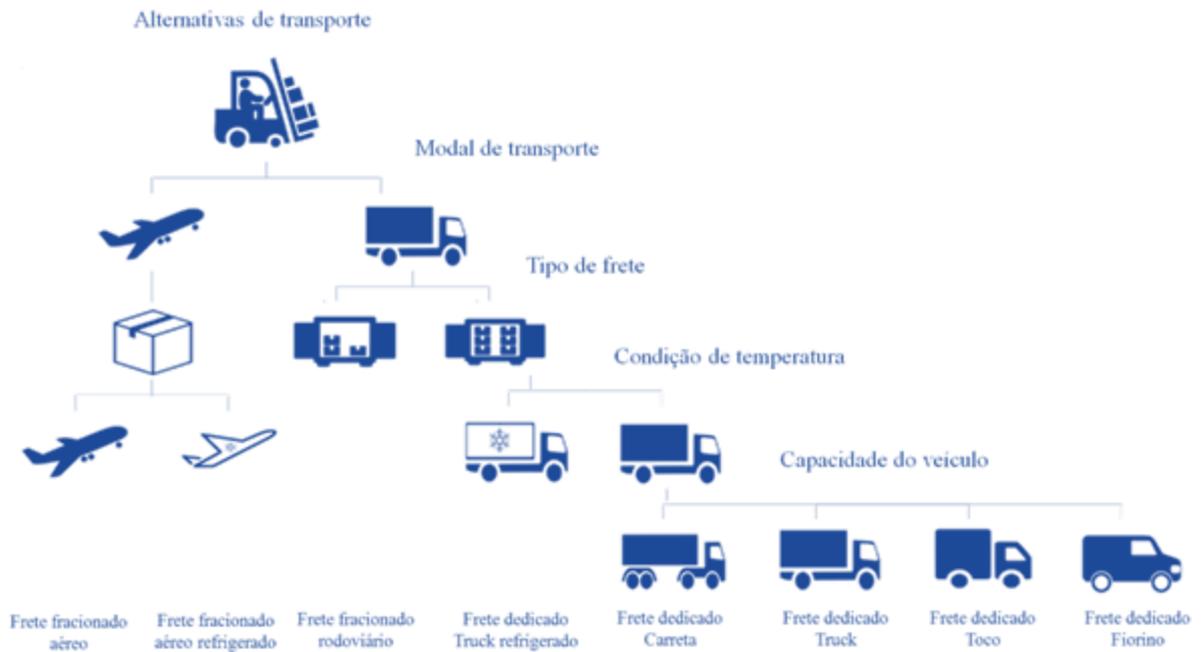
Figura 8. Características dos medicamentos.



Fonte: Elaboração própria.

A conexão entre os eixos da rede é feita através das alternativas de transporte apresentadas na Figura 9. Além do tipo de modal e do tipo de frete, quando se trata de frete dedicado, é necessário considerar um conjunto de veículos diferentes que podem realizar o frete. Ainda em relação ao transporte, é preciso considerar a relação existente entre os tipos de transporte disponíveis e as características dos produtos que podem transportar. Por exemplo, produtos refrigerados não podem ser transportados por frete rodoviário fracionado (conforme Tabela 4, Capítulo 3), sendo necessária a escolha adequada dentro das alternativas de transporte disponíveis. Os custos de transporte dependem do tipo de produto, dos volumes transportados e do tipo de transporte utilizado. Existem limites relacionados ao valor da carga transportada, de forma que pode incorrer na necessidade de escolta. Além dos custos de transporte, existem custos associados ao armazenamento dos produtos, que também dependem da condição de temperatura requerida (refrigerado ou não refrigerado).

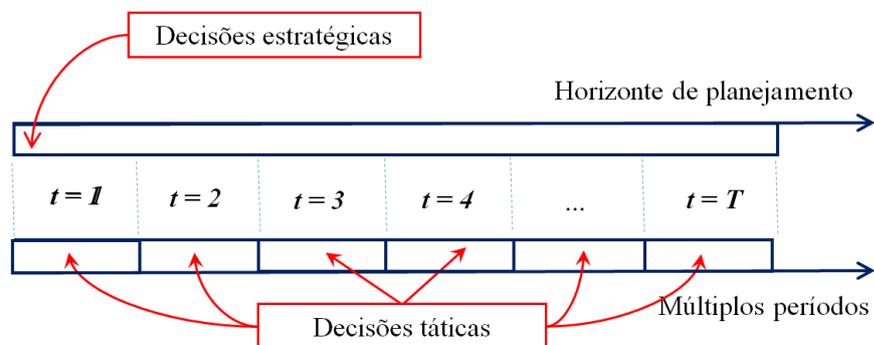
Figura 9. Alternativas de transporte disponíveis.



Fonte: Elaboração própria.

Como a proposta deste trabalho é a integração de decisões de diferentes níveis de decisão, estratégico e tático, consideramos um horizonte de planejamento multiperíodo. Assim, a decisão de localização dos CDs é tomada no início do horizonte de planejamento e permanece inalterável, já as decisões táticas variam de acordo com o período, como mostra a Figura 10.

Figura 10. Horizonte de planejamento das decisões estratégicas e táticas.



Fonte: Adaptado de Salema, Póvoa e Novais (2009)

A decisão de localização de CDs (seleção de locais existentes de propriedade do operador logístico) é tomada considerando as decisões táticas (Figura 11), que envolvem: o dimensionamento dos estoques a cada período nos CDs e nos clientes (para o caso de entrega antecipada); o atendimento da demanda de cada cliente a cada período, assim como os atrasos e perdas de vendas; o transporte entre os diferentes trechos, com a escolha de modais de transporte e tipos de carga, definindo o número de viagens necessárias de cada tipo e se é necessário que a viagens sejam escoltadas.

Figura 11. Decisões integradas no modelo matemático.



Fonte: Elaboração própria.

Em resumo, para modelagem do problema foram feitas as seguintes considerações:

- A localização das plantas e clientes é fixa, já a localização dos CDs é uma decisão do modelo, definida para todo o horizonte de planejamento.
- A demanda dos clientes só pode ser satisfeita pelos CDs, ou seja, não existe fluxo entre planta e clientes.
- Os CDs recebem produtos só das plantas, ou seja, não existe fluxo entre CDs.
- Todos os locais candidatos à instalação de CDs possuem infraestrutura para armazenar produtos em cadeia fria e temperatura ambiente.
- A quantidade de produtos disponíveis nas fábricas é suficiente para atender a demanda dos clientes em todos os períodos.
- Não são consideradas limitações de capacidade de armazenagem/operação nos CDs.
- Alguns produtos podem ser entregues com atraso, sem incorrer em perdas de venda.
- As alternativas de transporte contêm tipos frete fracionado e dedicado, sendo que o frete dedicado envolve a escolha do tipo de veículo, diferenciados em capacidade (volume).
- A estrutura dos custos de transporte depende do tipo de alternativa escolhida.
- Cargas acima de determinado valor incorrem na obrigatoriedade de escolta e existe um limite para o valor da carga, mesmo com o uso de escolta.

4.2 Modelo integrado de localização e distribuição considerando tributação (MILDT)

O problema de planejamento da rede de distribuição de medicamentos pode ser formulado como um modelo de programação linear inteira mista. Para formulação matemática deste problema considere a seguinte notação.

Índices e Conjuntos

$t \in T$	Períodos.
$p \in P$	Produtos.
$i \in I$	Fábricas.
$j \in J$	Potenciais locais para CDs.
$k \in K$	Clientes.
$l \in L = L_{FTL} \cup L_{LTL}$	Alternativas de transporte.
$L_{FTL} \subset L$	Alternativas de frete dedicado (veículos).
$L_{LTL} \subset L$	Alternativas de frete fracionado.
$P_l \subset P$	Produtos que podem ser transportados pela alternativa l .
$P_\Delta \subset P = P_\Delta \cup P \setminus P_\Delta$	Produtos que admitem atraso ou antecipação na entrega.

Parâmetros

d_{pkt}	Demanda do produto p do cliente k no período t (unidades).
o_j	Custo fixo de abertura do CD j (unidades monetárias).
φ	Custo por descentralização de estoque (unidades monetárias).
h_{pj}	Custo de estoque de uma unidade do produto p no CD j (unidades monetárias).
r_{pk}^A	Custo de estoque de uma unidade do produto p no cliente k (unidades monetárias).
r_{pk}^B	Penalidade pelo atraso de uma unidade do produto p do cliente k (unidades monetárias).
r_{kp}^U	Penalidade pela venda perdida de uma unidade do produto p do cliente k (unidades monetárias).
c_{ijl}, c'_{jkl}	Custo de transporte da planta i para o CD j e do CD j para o cliente k pela alternativa l (se $l \in L_{FTL}$, unidades monetárias por viagem, se $l \in L_{LTL}$ unidades monetárias por unidade de peso).
$\varepsilon_{ij}, \varepsilon_{jk}$	Custo de uma escolta para o CD j e para o cliente k (unidades monetárias por viagem).
q_l	Capacidade dos veículos em volume (unidades de volume).

ω_p	Peso do produto p (unidades de peso).
v_p	Volume do produto p (unidades de volume).
ρ_p	Preço do produto p (unidades monetárias).
θ_p	Custo de produção do produto p (unidades monetárias).
σ	Valor limite para transporte sem escolta (unidades monetárias por viagem).
γ_l	Valor limite para transporte de carga com a alternativa l (se $l \in L_{FTL}$, unidades monetárias por viagem, se $l \in L_{LTL}$ unidades monetárias por período).
$\alpha_{ij}, \alpha'_{jk}$	Taxa do ICMS para a transferência da planta i ao CD j e do CD j ao cliente k (%).
β_j	Taxa referente ao crédito presumido de ICMS outorgada ao candidato j (%).
δ	Taxa de ICMS na importação (%).
N	Número máximo de CDs na rede (unidades).
M_1, M_2, M_3, M_4	Números suficientemente grandes*.

*Na sessão 4.3.2 é apresentado uma forma de cálculo para M_1, M_2, M_3, M_4 .

Variáveis de decisão contínuas

X_{pijlt}, X'_{pjkl}	Fluxo de produto p (da planta i para o CD j e do CD j para o cliente k) usando a alternativa l no período t .
G_{ijlt}, G'_{jkl}	Custo total de escolta com a alternativa $l \in L_{FTL}$ no período t (da planta i para o CD j e do CD j para o cliente k).
A_{pkt}	Quantidade de produto p estocada no cliente k no período t .
B_{pkt}	Quantidade de produto p atrasada para o cliente k no período t .
U_{pkt}	Quantidade de perda de venda do produto p para o cliente k no período t .
I_{pjt}	Estoque de produto p no DC j no período t .
Q_j^+	Saldo de ICMS a ser pago pelo centro j .
Q_j^-	Crédito morto de ICMS a pagar do candidato j .
Z	Valor da função objetivo.

Variáveis de decisão discretas.

Y_j	1 se o CD j é aberto; 0, caso contrário.
W	1, se mais de um CD é aberto e, conseqüentemente, o estoque é descentralizado; 0, caso contrário.
$Z_{ijlt}, Z'_{jkl} \in Z^+$	Número de viagens (da planta i para o CD j e do CD j para o cliente k) usando a alternativa l no período t .
E_{ijlt}, E'_{jkl}	1, se a carga (da planta i para o CD j e do CD j para o cliente k) usando a alternativa l no período t é escoltada; 0, caso contrário.

A função objetivo (1) minimiza o custo total da rede.

$$\min Z = CID + CEP + CND + CTF + CTD + CVE + ITI + ISI + CRM. \quad (1)$$

Onde,

$$CID = \sum_{j \in J} o_j Y_j + \varphi W \quad (1.a)$$

$$CEP = \sum_{t \in T} \sum_{j \in J} \sum_{p \in P} h_{pj} I_{pj} + \sum_{t \in T} \sum_{k \in K} \sum_{p \in P_\Delta} r_{pk}^A A_{pkt} \quad (1.b)$$

$$CND = \sum_{t \in T} \sum_{k \in K} \left[\sum_{p \in P_\Delta} r_{pk}^B B_{pkt} + \sum_{p \in P \setminus P_\Delta} r_{kp}^U U_{pkt} \right] \quad (1.c)$$

$$CTF = \sum_{t \in T} \sum_{p \in P} \sum_{l \in L_{LTL}} \left[\sum_{i \in I} \sum_{j \in J} c_{ijl} \omega_p X_{pijlt} + \sum_{j \in J} \sum_{k \in K} c'_{jkl} \omega_p X'_{pjkl} \right] \quad (1.d)$$

$$CTD = \sum_{t \in T} \sum_{l \in L_{FTL}} \left[\sum_{i \in I} \sum_{j \in J} c_{ijl} Z_{ijlt} + \sum_{j \in J} \sum_{k \in K} c'_{jkl} Z'_{jkl} \right] \quad (1.e)$$

$$CVE = \sum_{t \in T} \sum_{l \in L_{FTL}} \left[\sum_{i \in I} \sum_{j \in J} G_{ijlt} + \sum_{j \in J} \sum_{k \in K} G'_{jkl} \right] \quad (1.f)$$

$$ITI = \sum_{t \in T} \sum_{l \in L} \sum_{p \in P} \sum_{j \in J} \sum_{i \in I} \left(\frac{\theta_p X_{pijlt}}{1 - \alpha_{ij}} - \frac{\theta_p X_{pijlt}}{1 - \delta} \right) \quad (1.g)$$

$$ISI = \sum_{j \in J} Q_j^+ \quad (1.h)$$

$$CRM = \sum_{j \in J} Q_j^- \quad (1.i)$$

O termo CID corresponde aos custos fixos para abertura dos CDs. A expressão CEP representa o custo total de armazenamento de produtos em todos os CDs e os custos de armazenamento nos clientes, no caso de entrega antecipada. As penalidades por atrasos e por vendas perdidas são contabilizadas no termo CND. As expressões CTF e CTD correspondem aos custos de transporte, sendo que o primeiro termo representa os custos das alternativas de frete fracionado, que dependem do tipo de modal, do tipo de produto e das distâncias envolvidas. Já a expressão CTD, representa os custos de transporte utilizando o frete dedicado, que depende do tipo de veículo utilizado, das distâncias envolvidas e do número de vezes que cada veículo é usado em cada trecho. O termo CVE representa os custos de escolta no transporte das plantas

até os CDs e dos CDs até as plantas. O termo ITI representa o montante de ICMS gerado pelas operações de transferência das plantas aos CDs. Esta expressão é o resultado de uma simplificação algébrica da fórmula de cálculo de crédito de ICMS (apresentada no capítulo 2, seção 3.3.1), da qual se deduz o montante de ICMS pago na importação do produto. O termo ISI representa o saldo de ICMS, definido como montante de ICMS nas operações de transferência das plantas aos CDs menos as operações de venda dos CDs até as plantas. Finalmente, o termo CRM representa custo por crédito morto gerado na rede. Para a definição dos termos ISI e CRM também foi usada a fórmula de cálculo de ICMS (apresentada no capítulo 2, seção 3.3.1) e serão detalhados na explicação das restrições (20) e (21).

Para controlar o atendimento da demanda, é preciso formular restrições de balanceamento de estoques nos clientes, a cada período e para todos os produtos. As restrições (2) e (3) representam as restrições de atendimento da demanda.

$$\sum_{i \in I} \sum_{l \in L} X'_{pjkl t} + A_{pk(t-1)} - B_{pk t-1} = d_{pkt} + A_{pkt} - B_{pkt}, \quad p \in P_{\Delta}, k \in K, t \in T \quad (2)$$

$$\sum_{i \in I} \sum_{l \in L} X'_{pjkl t} + U_{pkt} = d_{pkt}, \quad p \in P \setminus P_{\Delta}, k \in K, t \in T \quad (3)$$

A restrição (2) se refere ao conjunto de produtos que admitem atrasos e estoques nos clientes ($p \in P_{\Delta}$). Para cada período e produto, caso a quantidade total transportada dos CDs para o cliente k ($\sum \sum X'_{pjkl t}$) somada à quantidade de estoque em consignação do período anterior $A_{pk(t-1)}$, seja menor que a soma da demanda do período d_{pkt} , demanda não satisfeita em períodos anteriores $B_{pk(t-1)}$ e o estoque disponível em k , é necessário incorrer em atrasos (B_{pkt}). Enquanto que a restrição (3) se refere ao balanço de estoque dos produtos que não admitem atrasos ou antecipação nas entregas ($p \in P \setminus P_{\Delta}$). Neste caso, a variável U_{pkt} contabiliza a venda perdida.

Todos os produtos devem ser enviados para os CDs antes de serem entregues aos clientes. Assim, é preciso garantir que a quantidade total de cada produto que chega a

determinado CD somado à quantidade em estoque no final do período anterior, seja igual à quantidade do produto enviado para o cliente somada à quantidade mantida em estoque. A restrição (4) garante essa conservação do fluxo de produtos nos CDs em todos os períodos.

$$\sum_{i \in I} \sum_{l \in L} X_{pijlt} + I_{pj(t-1)} = \sum_{k \in K} \sum_{l \in L} X'_{pjkl t} + I_{pj t}, \quad j \in J, p \in P, t \in T \quad (4)$$

Como as decisões de localização e transporte são integradas, é preciso garantir que os envios de produtos sejam feitos apenas para os CDs que são abertos. Desta forma, a restrição (5) impõe que qualquer fluxo de produtos, de todas as fábricas, em todos os tipos de veículos, em todos os períodos, só pode ocorrer para CDs que estejam abertos. Ou seja, quando a variável binária Y_j assume o valor 1.

$$\sum_{i \in I} \sum_{p \in P} \sum_{l \in L} \sum_{t \in T} X_{pijlt} \leq M_1 Y_j, \quad j \in J \quad (5)$$

Existem muitas exigências regulatórias para o armazenamento e distribuição de medicamentos, portanto, para manter a centralização e o controle das operações é desejável restringir o número de CDs abertos. Assim, a restrição (6) impõe um limite para o número de CDs na rede de distribuição. A restrição (7) assegura que se mais de um CD é aberto, é necessário pagar um valor fixo de seguro pela ‘descentralização’ de estoques.

$$\sum_{j \in J} Y_j \leq N \quad (6)$$

$$\sum_{j \in J} Y_j - 1 \leq |J| W \quad (7)$$

No caso do transporte com frete dedicado ($l \in L_{FTL}$), é preciso determinar o número de vezes que esta alternativa será usada para cada tipo de veículo disponível, considerando a capacidade de carga de cada tipo (q_l). Ou seja, é preciso relacionar a quantidade de material transportada que usa frete dedicado (X_{pijlt} , $l \in L_{FTL}$) com a

variável de decisão que determina o número de viagens necessárias (Z_{ijlt} , $l \in L_{FTL}$). As restrições (8) e (9) determinam, através de um cálculo agregado, o número mínimo de viagens necessárias para realizar o transporte com os veículos dedicados das plantas até CDs e dos CDs até os clientes, respeitando as capacidades em volume dos veículos. Não é seguro que o volume total possa ser particionado em Z_{ijlt} viagens, porém dado o caráter tático do estudo, considera-se uma aproximação adequada.

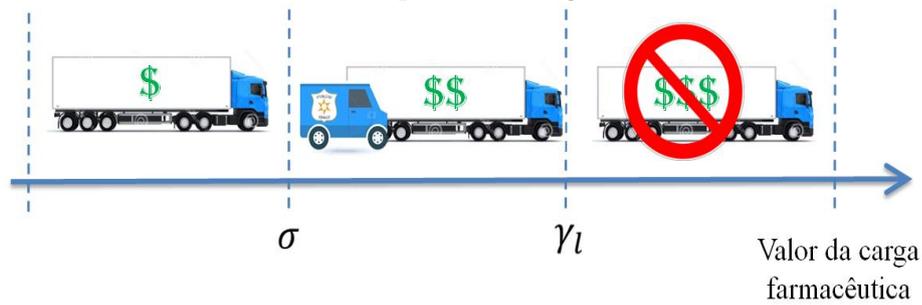
$$\sum_{p \in P_l} v_p X_{pijlt} \leq q_l Z_{ijlt}, \quad i \in I, j \in J, l \in L_{FTL}, t \in T \quad (8)$$

$$\sum_{p \in P_l} v_p X'_{pjkl} \leq q_l Z'_{jkl}, \quad j \in J, k \in K, l \in L_{FTL}, t \in T \quad (9)$$

As restrições (8) e (9) são importantes para contabilizar os custos de transporte com veículos dedicados, que dependem do número de viagens necessárias com cada tipo de veículo em cada trecho, conforme apresentado na função objetivo (1.e).

Além dos limites de capacidade para determinar o número de viagens necessárias, também existem limites para o valor transportado, de acordo com os valores de seguro contratados pela transportadora, como mostra a Figura 12.

Figura 12. Limites monetários no transporte de carga em frete dedicado.



Fonte: Elaboração própria.

Para cargas até um valor σ , o transporte não requer o uso de escolta. Para valores entre σ e o valor limite do seguro (γ_l) é obrigatório o uso de escolta armada acompanhando o veículo em todo o trajeto. O transporte de valores maiores que γ_l não são cobertos pelo seguro, e, portanto, não são permitidos.

Assim, o valor de carga máximo permitido para transporte dedicado é γ_l , $l \in L_{FTL}$, definido em unidades monetárias por viagem. As restrições (10) e (11) asseguram que o valor total da carga não ultrapasse o valor estabelecido pelo seguro.

$$\sum_{p \in P_l} \rho_p X_{pijlt} \leq \gamma_l Z_{ijlt}, \quad i \in I, j \in J, l \in L_{FTL}, t \in T \quad (10)$$

$$\sum_{p \in P_l} \rho_p X'_{pjkl} \leq \gamma_l Z'_{jkl}, \quad j \in J, k \in K, l \in L_{FTL}, t \in T \quad (11)$$

Note-se nas restrições (10) e (11) que, o valor total transportado em determinado período em cada trecho deve ser menor que o valor do seguro (γ_l) vezes o número de viagens. Ou seja, este é um cálculo aproximado do número de viagens, com o qual se admite que o valor total da carga possa ser distribuído entre os veículos, de forma que o valor médio do frete seja menor que o valor máximo assegurado. Esta consideração implica em perda de generalidade, pois, como também existem restrições em relação ao volume da carga, podem ocorrer situações em que não é possível combinar a restrição de volume e a de valor. No entanto, para formular de forma exata a restrição de valor da carga, é preciso definir uma variável para cada viagem, o que implica em aumentar substancialmente o número de variáveis discretas. Desta forma, optamos por assumir esta pressuposição, considerando que é uma estimativa razoável para um escopo de planejamento tático.

Ainda em relação ao valor da carga, existem limites para o envio de produtos com ou sem a necessidade de escolta como é mostrado na Figura 12. As restrições (12) determinam a necessidade de escolta em todos os períodos para todos os percursos entre a fábrica e os CDs, e as restrições (13) entre os CDs e os clientes. Novamente assumimos que, se o valor total transportado por um veículo em um determinado período não ultrapassa o valor limite para todas as viagens (σZ_{ijlt}), então é possível distribuir este valor entre as viagens sem considerar a necessidade de escolta em nenhuma delas.

$$\sum_{p \in P_l} \rho_p X_{pijlt} - \sigma Z_{ijlt} \leq M_2 E_{ijlt}, \quad i \in I, j \in J, l \in L_{FTL}, t \in T \quad (12)$$

$$\sum_{p \in P_l} \rho_p X'_{pjkl} - \sigma Z'_{jkl} \leq M_2 E'_{jkl}, \quad j \in J, k \in K, l \in L_{FTL}, t \in T \quad (13)$$

Note-se nas restrições (12) e (13) que, se o valor transportado é maior que o valor limite estabelecido, então a variável binária (E_{ijlt}, E'_{jkl}) obrigatoriamente deve ser igual a um, indicando a necessidade de contratação de serviço de escolta. No caso do valor transportado ser menor que o valor limite, a variável auxiliar pode ser igual a zero ou igual a um, indicando que o serviço de escolta pode ser contratado, mas não é obrigatório.

Quando $E_{ijlt} = 0$, temos que $\sum \rho_p X_{pijlt} \leq \sigma Z_{ijlt}$. Assim, $\sum \rho_p X_{pijlt} > 0$ se, e somente se, $Z_{ijlt} > 0$. No entanto, se $\sum \rho_p X_{pijlt} = 0$, temos que $Z_{ijlt} \geq 0$. Ou seja, o modelo considera que possam ocorrer viagens, mesmo quando não há fluxo de produtos. Esta mesma condição também é verificada para as restrições (8) - (11). No entanto, na otimalidade esta situação não ocorre porque a direção de otimização é de minimização e estas variáveis estão penalizadas na função objetivo.

Suponha que $\sum \rho_p X_{pijlt} = 0$. Pelas restrições (12), temos que $-\sigma Z_{ijlt} \leq M_2 E_{ijlt}$. Assim, independente do valor de Z_{ijlt} , temos que $E_{ijlt} \geq 0$. Ou seja, a possibilidade de escolta é considerada mesmo que não exista fluxo de produtos. É possível evitar a enumeração de parte destas soluções indesejáveis estabelecendo uma relação entre as variáveis Z_{ijlt} e E_{ijlt} . Desta forma, as restrições (14) e (15) impedem que seja considerada a contratação de escolta quando não são realizadas viagens.

$$E_{ijlt} \leq Z_{ijlt}, \quad i \in I, j \in J, l \in L_{FTL}, t \in T \quad (14)$$

$$E'_{jkl} \leq Z'_{jkl}, \quad j \in J, k \in K, l \in L_{FTL}, t \in T \quad (15)$$

Para calcular os custos totais de escolta podemos multiplicar o número de viagens em cada trecho (Z_{ijlt} ou $Z'_{jkl t}$) pela variável que indica a necessidade de escolta (E_{ijlt} ou $E'_{jkl t}$). O que resulta em uma não linearidade na modelagem, e pode dificultar ainda mais a obtenção de métodos de solução eficientes. Para contornar esta questão, nas restrições (16) e (17), novas variáveis auxiliares são utilizadas para calcular os custos com escolta.

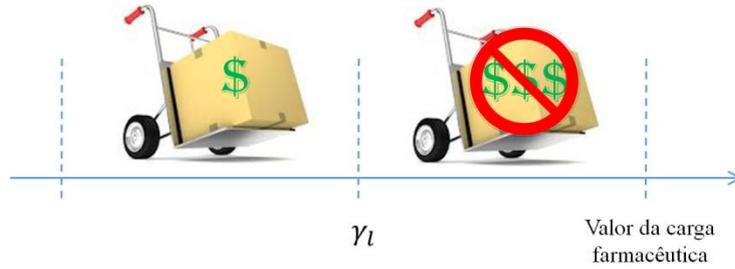
$$G_{ijlt} \geq \varepsilon_{ij} Z_{ijlt} - (1 - E_{ijlt}) M_3, \quad i \in I, j \in J, l \in L_{FTL}, t \in T \quad (16)$$

$$G'_{jkl t} \geq \varepsilon_{jk} Z'_{jkl t} - (1 - E'_{jkl t}) M_4, \quad j \in J, k \in K, l \in L_{FTL}, t \in T \quad (17)$$

Assim, sempre que é necessária a contratação de serviços de escolta ($E_{ijlt} = 1$), a variável auxiliar, que contabiliza os custos de escolta (G_{ijlt}), deve ser maior do que o valor da escolta para o veículo l (ε_{ij}) vezes o número de vezes que ele é utilizado no percurso ($\varepsilon_{ij} Z_{ijlt}$). Caso contrário, quando E_{ijlt} é igual a zero, as restrições são desativadas.

No caso do transporte utilizando frete fracionado ($l \in L_{LTL}$), assumimos que os custos de seguro e de escolta estão embutidos no custo de transporte estabelecido e, portanto, a decisão de uso de escolta no transporte é responsabilidade do transportador e não do embarcador. No entanto, também existem limites em relação ao valor máximo transportado γ_l , como mostra a Figura 13. O valor máximo de carga fracionada γ_l , $l \in L_{LTL}$ é definido em unidades monetárias por cada período, mesmo que embarcado em envios diferentes. As restrições (18) e (19) garantem que o valor máximo transportado em cada alternativa $l \in L_{LTL}$ seja respeitado em todos os períodos, nos percursos das plantas para os CDs (18) e dos CDs para os clientes (19).

Figura 13. Limites monetários no transporte de carga em frete fracionado.



Fonte: Elaboração própria.

$$\sum_{p \in P_l} \rho_p X_{pijlt} \leq \gamma_l, \quad \forall i \in I, j \in J, l \in L_{LTL}, t \in T \quad (18)$$

$$\sum_{p \in P_l} \rho_p X'_{pjkl t} \leq \gamma_l, \quad \forall j \in J, k \in K, l \in L_{LTL}, t \in T \quad (19)$$

As restrições (20) e (21) permitem calcular os montantes de ICMS a pagar por cada CD. Estas restrições utilizam a forma de cálculo de ICMS definida que foi detalhada no capítulo 2, sessão 2.3.1. Assim, o montante de ICMS a pagar depende do custo e preço do produto, e das relações entre as alíquotas de ICMS e crédito presumido. Algumas relações evidentes entre as alíquotas são:

$$\alpha_{ij} > = < \alpha'_{jk} \quad \alpha_{ij} > \delta \quad \alpha'_{jk} > \beta_j$$

Veja-se que para determinar o crédito de ICMS pela operação de transferência tem-se que deduzir o pago de ICMS na importação do produto:

$$\sum_{t \in T} \sum_{l \in L} \sum_{p \in P} \sum_{i \in I} \left(\left(\frac{\theta_p X_{pijlt}}{1 - \alpha_{ij}} - \theta_p X_{pijlt} \right) - \left(\frac{\theta_p X_{pijlt}}{1 - \delta} - \theta_p X_{pijlt} \right) \right), \quad \forall j \in J$$

Esta expressão pode ser simplificada com se mostra a seguir.

$$\sum_{t \in T} \sum_{l \in L} \sum_{p \in P} \sum_{i \in I} \left(\frac{\theta_p X_{pijlt}}{1 - \alpha_{ij}} - \theta_p X_{pijlt} - \frac{\theta_p X_{pijlt}}{1 - \delta} + \theta_p X_{pijlt} \right), \quad \forall j \in J$$

$$\sum_{t \in T} \sum_{l \in L} \sum_{p \in P} \sum_{i \in I} \left(\frac{\theta_p X_{pijlt}}{1 - \alpha_{ij}} - \frac{\theta_p X_{pijlt}}{1 - \delta} \right), \quad \forall j \in J$$

Este mesmo procedimento de simplificação algébrica aplica-se para determinar o débito da operação de venda, deduzindo o montante de ICMS pelo benefício fiscal.

$$\sum_{t \in T} \sum_{l \in L} \sum_{p \in P} \sum_{k \in K} \left(\frac{\rho_p X'_{pjkl t}}{1 - \alpha'_{jk}} - \frac{\rho_p X'_{pjkl t}}{1 - \beta_j} \right), \quad \forall j \in J$$

Assim, o balanço de ICMS nos CDs se define como:

$$\sum_{t \in T} \sum_{l \in L} \sum_{p \in P} \left[\sum_{k \in K} \left(\frac{\rho_p X'_{pjkl t}}{1 - \alpha'_{jk}} - \frac{\rho_p X'_{pjkl t}}{1 - \beta_j} \right) - \sum_{i \in I} \left(\frac{\theta_p X_{pijlt}}{1 - \alpha_{ij}} - \frac{\theta_p X_{pijlt}}{1 - \delta} \right) \right], \quad \forall j \in J$$

Se este é positivo é chamado de saldo Q_j^+ e se é negativo é chamado de crédito morto Q_j^- , assim estas variáveis são mutuamente excludentes para cada CD. A restrição (20) permite o cálculo do saldo de ICMS a ser pago pelos CDs candidatos em cada período, depois de deduzir o crédito da operação de transferência entre planta a cada CD e o valor do incentivo obtido. A restrição (21) foi definida a partir das equações de cálculo de ICMS e permitem contabilizar o saldo negativo, isto é, o crédito morto que não poderá ser aproveitado em operações posteriores. Veja-se que estas restrições

$$\sum_{t \in T} \sum_{l \in L} \sum_{p \in P} \left[\sum_{k \in K} \left(\frac{\rho_p X'_{pjkl t}}{1 - \alpha'_{jk}} - \frac{\rho_p X'_{pjkl t}}{1 - \beta_j} \right) - \sum_{i \in I} \left(\frac{\theta_p X_{pijlt}}{1 - \alpha_{ij}} - \frac{\theta_p X_{pijlt}}{1 - \delta} \right) \right] \leq Q_j^+, \forall j \in J \quad (20)$$

$$\sum_{t \in T} \sum_{l \in L} \sum_{p \in P} \left[\sum_{i \in I} \left(\frac{\theta_p X_{pijlt}}{1 - \alpha_{ij}} - \frac{\theta_p X_{pijlt}}{1 - \delta} \right) - \sum_{k \in K} \left(\frac{\rho_p X'_{pjkl t}}{1 - \alpha'_{jk}} - \frac{\rho_p X'_{pjkl t}}{1 - \beta_j} \right) \right] \leq Q_j^-, \forall j \in J \quad (21)$$

Finalmente, as restrições (22) a (26) representam o domínio das variáveis.

$$Y_j, W \in \{0,1\}, \quad i \in I, j \in J, k \in K, l \in L_{FTL}, t \in T \quad (22)$$

$$E_{ijlt}, E'_{jkl t} \in \{0,1\}, \quad i \in I, j \in J, k \in K, l \in L_{FTL}, t \in T \quad (23)$$

$$Z_{ijlt}, Z'_{jkl t} \in Z^+, \quad i \in I, j \in J, k \in K, l \in L_{FTL}, t \in T \quad (24)$$

$$X_{pijlt}, X'_{pjkl t}, A_{pkt}, B_{pkt}, U_{pkt}, I_{pjt} \geq 0, \quad i \in I, j \in J, k \in K, p \in P, l \in L, t \in T \quad (25)$$

$$G_{ijlt}, G'_{jkl t}, Q_j^+, Q_j^- \geq 0, \quad i \in I, j \in J, k \in K, l \in L, t \in T \quad (26)$$

A Tabela 6 apresenta a expressão que representa o número de restrições e variáveis do modelo.

Tabela 6. Número de restrições, variáveis contínuas, inteiras e binárias do MILDT.

Número de restrições	$3 J + P \cdot T \cdot J + K + I \cdot J \cdot T + J \cdot K \cdot T \cdot (4 L_{FTL} + L)$
Número de variáveis contínuas	$2 J + P \cdot T \cdot J + K + P_{\Delta} \cdot K \cdot T + I \cdot J \cdot T + J \cdot K \cdot T \cdot (P \cdot L + L_{FTL})$
Número de variáveis binárias	$ J + J \cdot L_{FTL} \cdot T (I + K)$
Número de variáveis inteiras	$ J \cdot L_{FTL} \cdot T (I + K)$

Em um contexto no qual não se tem interesse de incorporar a política fiscal para a solução do problema, é possível resolver um modelo matemático simplificado, MILD, com função objetivo (1.a) – (1.f) sujeito às restrições (2) – (19) e (22) – (26) como é mostrado no Apêndice A.

Os modelos propostos, MILD e MILDT, apresentam expressões algébricas do modelo clássico de localização, assim como representações de conjuntos e expressões algébricas comuns na literatura, adaptadas para representar o problema descrito neste trabalho. De forma que a formulações matemáticas propostas não apresenta novidades em termos de modelagem, mas representam um problema com características novas. A modelagem matemática adentra no tratamento de particularidades como manutenção de cadeia fria e segurança no transporte de carga. Consideraram-se múltiplos produtos, com qualidades diferentes, assim como múltiplas alternativas de transporte, diferenciadas por modal e tipo de frete (dedicado e fracionado) com estruturas de custo diferentes. O MILDT considera adicionalmente o gerenciamento de questões tributárias associadas ao ICMS, para o qual se utiliza a fórmula de cálculo de ICMS definida pelo governo brasileiro. A diferença de outros modelos da literatura que tratam ICMS, o MILDT não proíbe a geração de crédito morto, senão que visa um equilíbrio entre saldo e crédito morto, evitando cortar boas soluções do problema.

Além disso, os modelos se propõem a integração de decisões de localização com decisões de transporte no planejamento da rede de distribuição farmacêutica, sendo que a integração de decisões de diferentes níveis foi apontada por vários autores como questão que permite melhorar o desempenho da rede como um todo.

Esta formulação matemática é facilmente estendível a empresas de outros setores com características similares como indústria química e alimentícia, que precisam de manutenção de cadeia fria para alguns produtos. Além disso, estas indústrias precisam segurança no transporte de carga, a primeira porque seus produtos são valiosos e perigosos e a outra porque os produtos são muito visados pelos assaltantes pela facilidade de revender posteriormente.

4.3 Cálculo de limitantes

Nesta seção são apresentados alguns limitantes para as restrições com número grande M e cálculos de limitantes superiores para as variáveis inteiras do MILDT. Espera-se que estes limitantes para as variáveis e valores mais apertados para algumas restrições (com número grande M) possam ajudar na convergência e redução do tempo de resolução computacional.

4.3.1 Cálculo de limites superiores para as variáveis inteiras (Z_{ijlt} e Z'_{jklt})

Em cada trecho origem-destino não podem ser transportados mais produtos que o total demandado no horizonte de planejamento considerado. Portanto, assumindo que toda a demanda é transportada em um único período e em um único trecho, não seriam necessários mais do que um número de veículos Z_{ijlt}^{up1} e $Z'_{jklt}{}^{up1}$ determinado por:

$$Z_{ijlt}^{up1} = Z'_{jklt}{}^{up1} = \left\lceil \frac{\sum_{p \in P} \sum_{k \in K} \sum_{t' \in T} d_{pkt}}{q_l} \right\rceil \quad \forall i \in I, j \in J, k \in K, l \in L_{FTL}, t \in T.$$

O valor da carga transportada também limita o número de viagens. Para garantir cobertura do seguro, a carga transportada nos veículos não pode superar o

valor estabelecido pelas seguradoras. Ou seja, pode ser definido um segundo limitante para o número de viagens Z_{ijlt}^{up2} e $Z'_{jkl t}{}^{up2}$, dado por:

$$Z_{ijlt}^{up2} = \left\lceil \frac{\sum_{p \in P} \sum_{k \in K} \sum_{t' \in T} \rho_p d_{pkt'}}{\gamma_l} \right\rceil \forall i \in I, j \in J, l \in L_{FTL}, t \in T$$

$$Z'_{jkl t}{}^{up2} = \left\lceil \frac{\sum_{p \in P} \sum_{t' \in T} \rho_p d_{pkt'}}{\gamma_l} \right\rceil \forall j \in J, k \in K, l \in L_{FTL}, t \in T$$

Assim, temos que $Z_{ijlt}^{up} = \max(Z_{ijlt}^{up1}, Z_{ijlt}^{up2})$ e $Z'_{ijlt}{}^{up} = \max(Z'_{ijlt}{}^{up1}, Z'_{ijlt}{}^{up2})$ e as seguintes restrições (1) - (26) são incorporadas ao MILDT:

$$Z_{ijlt} \leq Z_{ijlt}^{up} \forall i \in I, j \in J, l \in L_{FTL}, t \in T \quad (27)$$

$$Z'_{jkl t} \leq Z'_{jkl t}{}^{up} \forall j \in J, k \in K, l \in L_{FTL}, t \in T \quad (28)$$

4.3.2 Cálculo de limitantes para as restrições (M_1, M_2, M_3 e M_4)

Considerando novamente que, em cada trecho origem-destino não podem ser transportados mais produtos do que o total demandado, o valor do limitante M_1 na restrição (5) pode ser estimado como:

$$M_1 = \sum_{p \in P} \sum_{k \in K} \sum_{t \in T} d_{pkt}$$

De forma similar, o valor para o limitante M_2 , nas restrições que definem a escolha de veículos nas restrições (12) e (13), pode ser estimado como:

$$M_2 = \sum_{p \in P} \sum_{k \in K} \sum_{t \in T} \rho_p d_{pkt}$$

A partir dos limitantes para as variáveis de número de veículos, podem ser estimados limitantes para as restrições que contabilizam o custo de escoltas M_3 e M_4 , conforme as seguintes expressões:

$$M_3 = \max_{i,j,l,t} (Z_{ijlt}^{up} \varepsilon_{ij}) \forall i \in I, j \in J, l \in L_{FTL}, t \in T$$

$$M_4 = \max_{j,k,l,t} (Z'_{jkl t}{}^{up} \varepsilon_{jk}) \forall j \in J, k \in K, l \in L_{FTL}, t \in T$$

4.4 Estratégias de solução: Abordagem para a construção e uma solução inicial – ACSI

A resolução do MILDT com instâncias de tamanho real, usando as configurações *default* do *software* GAMS/CPLEX, envolve tempos de resolução acima de 12 horas com *gaps* superiores a 1%. Assim, nesta sessão é apresentada uma estratégia de solução que visa a construção de uma solução inicial para o MILDT, a fim de reduzir do tempo computacional necessário para que o modelo encontre soluções de boa qualidade.

A dificuldade na resolução do modelo se deve às variáveis inteiras de número de viagens entre cada trecho - da planta para o CD e do CD para o cliente $(Z_{ijlt}, Z'_{jkl t})$ e variáveis binárias de definição de necessidade de escolta entre os mesmos trechos $(E_{ijlt}, E'_{jkl t})$. Assim, foi proposto um modelo relaxado, denominado MILDTR, que trata com estas variáveis. As variáveis Z_{ijlt} e $Z'_{jkl t}$ são consideradas variáveis reais, enquanto que as variáveis E_{ijlt} e $E'_{jkl t}$ são retiradas do modelo e assume-se que todas as viagens feitas com veículos dedicados devem ser escoltadas, portanto, o custo do serviço de escolta deve ser cobrado para cada viagem feita.

Sendo assim, o MILDTR é constituído então pelas restrições (1) – (11), (18) – (22) e (25) – (26) do MILDT e as seguintes restrições (27) – (31).

$$Z_{ijlt} \leq Z_{ijlt}^{up} \quad \forall i \in I, j \in J, l \in L_{FTL}, t \in T \quad (27)$$

$$Z'_{jkl t} \leq Z'_{jkl t}^{up} \quad \forall j \in J, k \in K, l \in L_{FTL}, t \in T \quad (28)$$

$$G_{ijlt} \geq \varepsilon_{ij} Z_{ijlt}, \quad i \in I, j \in J, l \in L_{FTL}, t \in T \quad (29)$$

$$G'_{jkl t} \geq \varepsilon_{jk} Z'_{jkl t}, \quad j \in J, k \in K, l \in L_{FTL}, t \in T \quad (30)$$

$$Z_{ijlt}, Z'_{jkl t} \geq 0, \quad i \in I, j \in J, k \in K, l \in L_{FTL}, t \in T \quad (31)$$

As restrições (27) e (28) representam os limites superiores para as variáveis Z_{ijlt} e $Z'_{jkl t}$ propostos na sessão 4.3.1. As restrições (29) e (30) representam o cálculo

de custo do serviço de escolta para todas as viagens feitas. Finalmente, a restrição (31) representa o novo domínio das variáveis Z_{ijlt} e Z'_{jklt} .

O MILDTR é resolvido e a solução é adaptada para ser factível para o MILDT. Para isso, as variáveis de número de viagens do MILDTR (Z_{ijlt}^R, Z'_{jklt}^R) são aproximadas ao inteiro superior e soma-se 1. Aliás, todas as variáveis de definição de necessidade de escolta do MILDT que retiradas do MILDTR (E_{ijlt}, E'_{jklt}) são definidas em 1, dado que considerou-se que todas as viagens foram escoltadas. A seguir, a solução é fornecida para o MILDT como solução inicial (que constitui um limitante superior), a partir da qual se inicia a busca de uma melhor solução.

O procedimento pode ser descrito pelo seguinte algoritmo:

Algoritmo - Abordagem para a construção e uma solução inicial – ACSI.

1: Resolva o modelo relaxado, MILDTR.

2: Adapte a solução do MILDTR para ser factível em MILDT:

$$\mathbf{Z}_{ijlt} = \lceil \mathbf{Z}_{ijlt}^R \rceil + \mathbf{1} ; \quad \mathbf{Z}'_{jklt} = \lceil \mathbf{Z}'_{jklt}^R \rceil + \mathbf{1} ; \quad \mathbf{E}_{ijlt} = \mathbf{1} ; \quad \mathbf{E}'_{jklt} = \mathbf{1}.$$

3: Estabeleça a solução do MILDTR no modelo original, MILDT.

4: Resolva o MILDT.

No capítulo 6, na sessão 6.1 se apresenta uma comparação entre resolver o problema com o *default* do CPLEX e resolver o problema utilizando a ACSI, em relação à qualidade da solução e o *gap* alcançado.

Outra forma de reduzir o tempo de resolução do problema, é através de uma abordagem hierárquica, onde as decisões de localização são definidas inicialmente com um modelo de localização e, a seguir, são fixadas no MILDT para definir as decisões táticas. Como foi mostrado na revisão de literatura esta abordagem pode resultar em soluções subótimas. Os resultados desta abordagem são apresentados no capítulo 6, na sessão 6.4.2.

5 ANÁLISE E PREPARAÇÃO DOS DADOS

O objetivo deste capítulo é apresentar uma descrição dos dados utilizados na resolução do modelo matemático. É apresentada a preparação dos dados coletados da empresa e do setor, estratégias de agregação da demanda e agrupamento de produtos. Em seguida, é apresentado o plano de experimentos para avaliar a agregação dos dados.

5.1 Descrição dos dados coletados

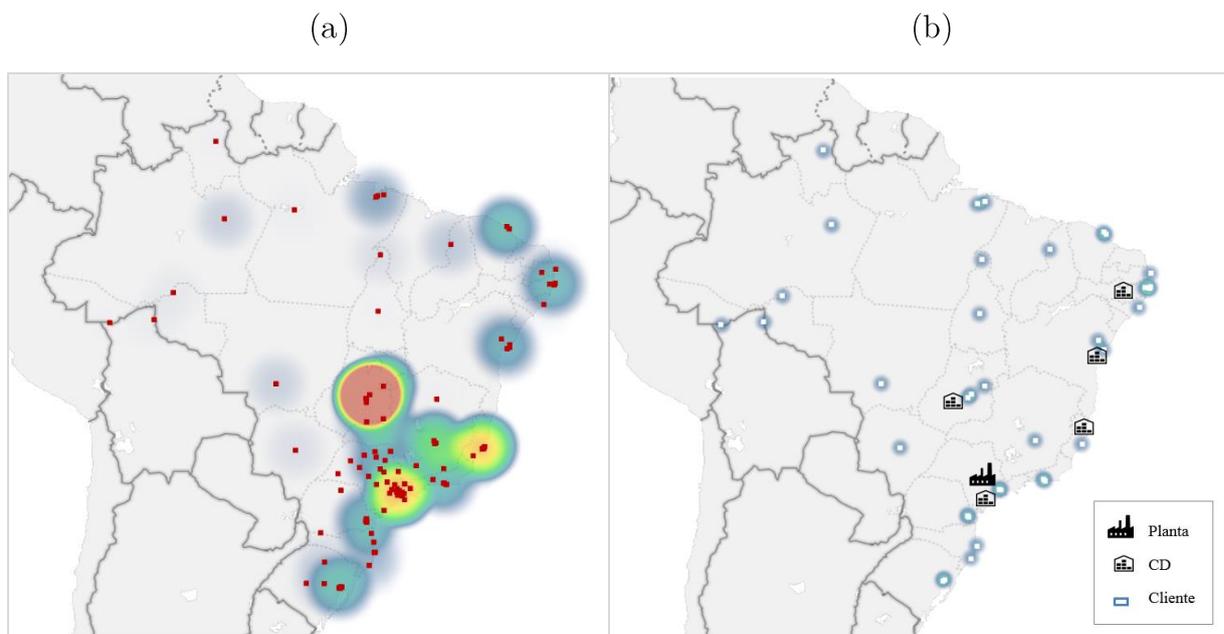
Os dados reais para desenvolvimento deste trabalho foram disponibilizados pela empresa, objeto do estudo de caso. Vale ressaltar que foi assinado um contrato de confidencialidade para proteger as informações da empresa, em que o autor e orientador do trabalho se comprometeram a preservar os dados e a identidade da mesma. Desta forma, a agregação dos dados, além de viabilizar os testes computacionais, também é uma estratégia para proteger as informações fornecidas.

Dado que as plantas de produção da empresa estão localizadas próximas e no mesmo Estado, considerou-se apenas um local. Em relação aos candidatos à localização de CDs, inicialmente foram consideradas as cidades de Goiânia, Recife, Fortaleza e Vitória, por serem as cidades candidatas para localização de CDs em estudos prévios feitos por consultorias. Para manter a centralização das operações da empresa, diante das muitas restrições regulatórias impostas para o armazenamento e transporte de medicamentos, consideramos inicialmente a abertura de apenas dois CDs, ou seja, $N = 2$.

A Figura 14(a) mostra um mapa de calor que indica a concentração da demanda por cidade, onde a cor vermelha indica maior concentração de demanda (em unidades) e a cor azul indica demanda menos concentrada, destacam-se alguns estados como Goiânia, Distrito Federal, São Paulo e Espírito Santo. Em todo o país, a carteira de clientes da empresa é composta por mais de 400 clientes, o que aumenta a

complexidade do problema. No entanto, como se trata de um planejamento estratégico-tático, é razoável agregar os clientes. Mesmo os dados de custos de transporte com os quais a empresa trabalha usam informações agregadas, por exemplo, as tabelas de custos são definidas para a capital e o interior de cada Estado brasileiro. Assim, os clientes foram agregados em 54 grupos, dependendo da sua localização, capital ou interior de cada Estado. Algumas regiões não possuem demanda, resultando em 36 clientes, ou seja, $|K| = 36$. Uma superestrutura das instalações é mostrada na Figura 14(b).

Figura 14. Distribuição da demanda no país agrupada em cidades e superestrutura da rede.



Fonte: Elaboração própria.

Em relação aos custos, todos os valores foram calculados com base em informações fornecidas pela empresa. Os custos de armazenamento nos CDs são definidos em unidades de *pallets* convencionais ($120 \times 100 \times 25 \text{ cm}^3$) para cada condição de temperatura; \$53,45 para estocar um *pallet* a temperatura ambiente e \$95,45 em ambiente refrigerado. A partir desta informação, calculou-se o custo unitário de estoque

por produto, usando os dados de volume de cada produto e a informação de quais são refrigerados ou não refrigerados, obtendo-se assim os parâmetros h_{pj} .

Os custos de armazenamento nos clientes ou estoque em consignação (r_{pk}^A) foram estimados como uma porcentagem do preço do produto. Os custos de transporte foram obtidos usando tabelas de valores das transportadoras e as distâncias envolvidas em cada trecho: da planta para os CDs (c_{ijl}) e dos CDs para os clientes (c'_{jkl}). As penalidades por atraso (r_{pk}^B) e venda perdida (r_{pk}^U), como representam valores intangíveis, foram estimados com base no valor de venda e devem ser reavaliados via análise de sensibilidade. Os custos fixos de instalação de novos CDs (f_j) foram estimados com base nos dados de estudos anteriores, o valor de seguro por descentralização de estoque de 4 bilhões, foi fornecido pela empresa.

Os valores de seguro para transporte dos produtos dependem do tipo de carga (γ_l). Para carga dedicada ($l \in L_{FTL}$), o limite máximo assegurado é de \$3.000.000; para carga fracionada ($l \in L_{LTL}$), o limite máximo é de \$15.000.000. Além disso, o valor máximo sem a necessidade de escolta (σ) é de \$150.000. Os custos de escolta dependem das condições de segurança das vias, portanto, variam em cada trecho ($\varepsilon_{ij}, \varepsilon_{jk}$). Os dados destes e dos demais parâmetros do modelo são apresentados no Apêndice B.

Atualmente, a empresa distribui mais de 250 produtos. Novamente, considerando a natureza tática das decisões envolvidas, do ponto de vista prático é possível agrupar esses produtos. Seguindo a estratégia utilizada pela consultoria, os produtos foram agrupados em dois grandes grupos, produto refrigerado e não refrigerado.

Dado que esta agregação pode afetar as decisões envolvidas, foram avaliadas outras formas de agregação de dados. Primeiramente, o agrupamento em intervalos de classe (conceito próprio da estatística descritiva) de acordo com os atributos de volume,

peso, demanda, preço e condição de temperatura. Assim, usando o procedimento descrito no Apêndice C foram obtidas 42 famílias de produtos. Também foi avaliada uma técnica de agrupamento de dados/objetos, mais sofisticada, chamada método de *K-means*.

5.2 Agregação de produtos em famílias usando o método *K-means*

A ‘clusterização’ ou agrupamento de objetos é considerado como uma das mais importantes técnicas da mineração de dados. Esta técnica faz a partição dos dados de acordo com comparações quantitativas de múltiplas características. Uma definição formal de clusterização pode ser: dada uma representação de n objetos, encontre K grupos (chamados *clusters*, classes ou famílias) baseados em uma medida de similaridade, de modo que as semelhanças entre objetos no mesmo grupo sejam altas, enquanto as semelhanças entre os objetos em diferentes grupos sejam baixas. Os grupos resultantes podem diferir em termos de forma, tamanhos e densidade (JAIN, 2010).

Os algoritmos de agrupamento podem ser divididos em: hierárquicos e particionais. As técnicas de agrupamento hierárquico estabelecem hierarquias entre os objetos. Estas podem ser aglomerativas (*bottom-up*) que encontram os dois pares mais semelhantes e os agrupa formando um *cluster*. Os pares podem ser objeto-objeto, objeto-*cluster* ou *cluster-cluster*, que são agrupados até que se tenha apenas um *cluster* raiz, ou podem ser divisivas (*top-down*) que inicia com um *cluster* contendo todos os objetos e vai dividindo os *clusters* recursivamente, de acordo com um determinado critério. O processo termina quando se alcança um critério de parada, geralmente o número de K *clusters* desejado. Já os métodos de agrupamento particional ‘aprendem’ diretamente, por meio da realocação iterativa dos objetos nos agrupamentos, ou tentando identificar *clusters* em áreas com muitos objetos (DE MELO, 2005).

Comparados aos algoritmos de agrupamento hierárquico, os algoritmos de agrupamento particional encontram todos os *clusters* simultaneamente como uma

partição dos dados e não impõem uma estrutura hierárquica. O algoritmo particional mais popular e o mais simples é *K-means*, que foi proposto há mais de 50 anos e ainda é um dos algoritmos mais utilizados para agrupamento, pela facilidade de implementação, simplicidade e eficiência (JAIN, 2010).

O *K-means* é uma heurística de agrupamento não hierárquico que busca minimizar a distância dos elementos a um conjunto de K centros, dado por $c = \{x_1, x_2, \dots, x_k\}$ de forma iterativa. A distância entre um ponto p_i e um conjunto de *clusters*, dada por $d(p_i, c)$, é definida como sendo a distância do ponto ao centro mais próximo dele (LINDEN, 2009). A função a ser minimizada então, é dada por:

$$d(P, X) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n d(p_i, X)^2$$

O algoritmo depende de um parâmetro (K =número de *clusters*) definido *a priori* pelo usuário.

Algoritmo do método *K-means*.

Entrada: N pontos

Saída: *Clusters*

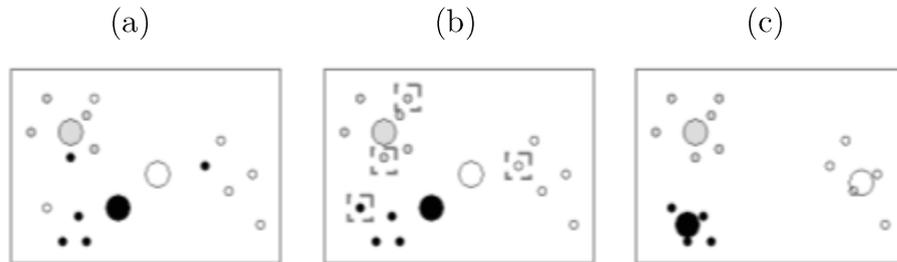
- 1: Definir o número dos K *clusters*;
 - 2: Escolher aleatoriamente os valores iniciais para os centroides;
 - 3: Cada ponto é associado ao *cluster* cujo centroide seja o mais próximo;
 - 4: Os centroides de cada grupo são recalculados com os atuais pontos associados;
 - 5: Os passos 3 e 4 são repetidos até que o número de iterações alcance o seu limite ou os pontos não troquem de centroide.
-

Fonte: Adaptado de Jain (2010).

Um exemplo da execução do algoritmo de *K-means*, apresentado por Linden (2009), pode ser visto na Figura 15. Cada elemento é designado para um dos três grupos aleatoriamente e os centroides (círculos maiores) de cada grupo são calculados, como pode visto na Figura 15(a). Os elementos são então designados para os grupos cujos centroides estão mais próximos, como mostrado na Figura 15(b). Finalmente, os

centroides são recalculados e os grupos já estão em sua forma final (Figura 15(c)). Caso não estivessem, os passos (b) e (c) seriam repetidos.

Figura 15. Exemplo de agrupamento usando o método *K-means*.



Fonte: Linden (2009)

A escolha do número de *cluster* feita pelo usuário pode afetar a qualidade dos resultados, um número pequeno de *cluster* pode causar a junção de dois *clusters* naturais, enquanto que um número grande pode fazer com que um *cluster* natural seja quebrado (LINDEN, 2009). Uma estratégia para encontrar o número apropriado de *clusters* em um conjunto de dados é chamado critério do cotovelo (*Elbow method*). Este método analisa a porcentagem de variância em função do número de *clusters*: deve-se escolher uma série de *clusters* para que a adição de outro *cluster* não ofereça melhoria na modelagem dos dados. Ou seja, em algum momento o ganho marginal cai, criando um ângulo no gráfico. O número de *clusters* é escolhido neste ponto, daí o nome do critério do cotovelo (KODINARIYA; MAKWANA, 2013).

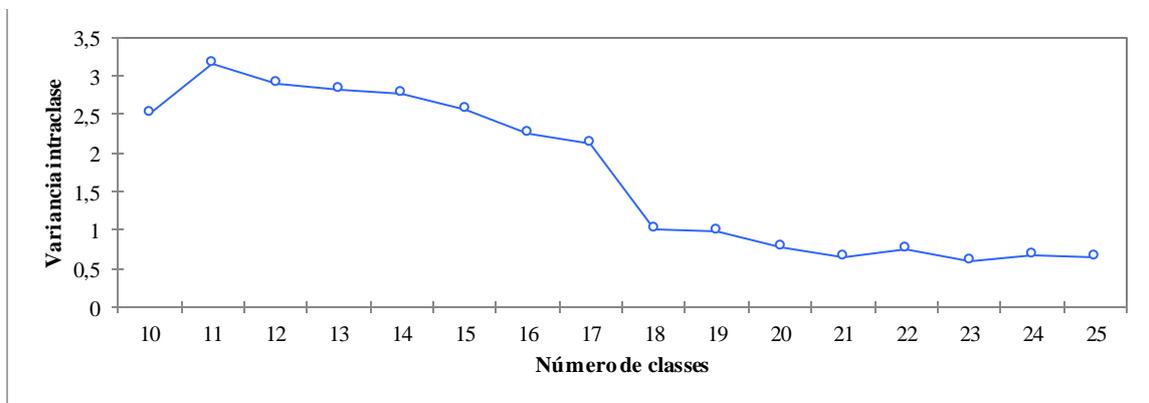
Para realizar o agrupamento de produtos, foram consideradas as características de condição de temperatura, preço, demanda, volume e peso. Inicialmente, divide-se em duas categorias de produtos de acordo com o requerimento de temperatura: produtos refrigerados e não refrigerados. A seguir, os dados das características quantitativas foram normalizados, calculando a média das observações para cada característica e dividindo cada observação entre a média da respectiva característica. Foi utilizado o software XLSTAT, um complemento para Excel para análise estatística. O *software* reporta um gráfico da variância dentre elementos do mesmo *cluster* para cada *K*.

Analisando o gráfico é selecionado o número mais adequado de *clusters* levando em conta o critério do cotovelo. A seguir são apresentados os resultados para cada categoria de produtos refrigerados e não refrigerados.

Produtos não refrigerados

Os produtos não refrigerados são 227 no total. Aplicando o *K-means* para um intervalo $K = [10, 25]$ *clusters* ou classes, obtém-se o comportamento da variância mostrado na Figura 16. Identifica-se um ponto de queda significativo na variância interclasse com $K=18$, assim seguindo o critério do cotovelo escolhe-se agrupar os produtos não refrigerados em 18 famílias, que reporta uma variância intraclasse de 1,90% e uma variância interclasse de 98,1%, cumprindo com o objetivo do método de agrupar produtos semelhantes e ao mesmo tempo formar classes diferentes entre si.

Figura 16. Variância intraclasse para produtos não refrigerados.



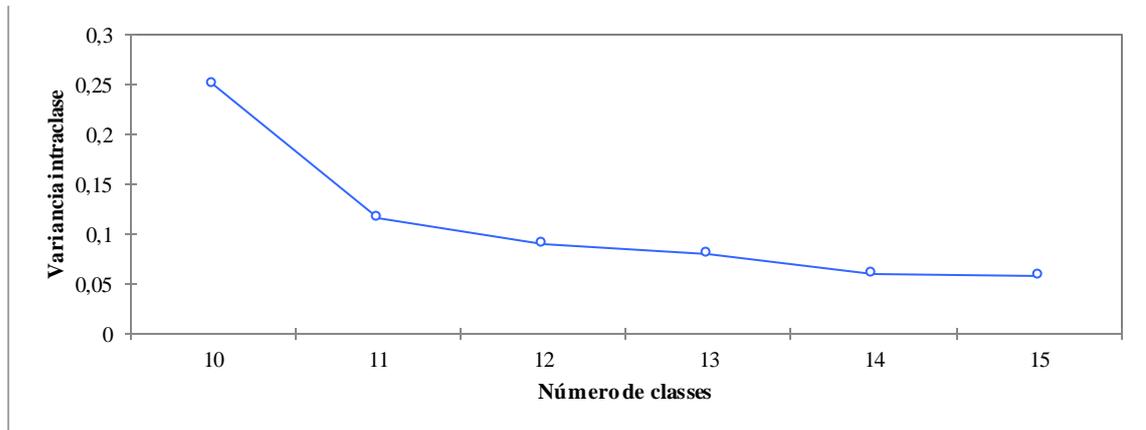
Fonte: Elaboração própria.

Produtos refrigerados

Os produtos refrigerados correspondem a 25 do total de 252 produtos. Optou-se pelo agrupamento *K-means* usando o intervalo $K = [10, 15]$ classes. O comportamento da variância é apresentado na Figura 17, identifica-se uma queda significativa na variância em $K=12$. Pelo critério do cotovelo, se decide agrupar os produtos

refrigerados em 12 famílias de produto. Este agrupamento reporta variância intraclasse de 0,54% e variância interclasse de 99,46%.

Figura 17. Variância intraclasse para produtos refrigerados.



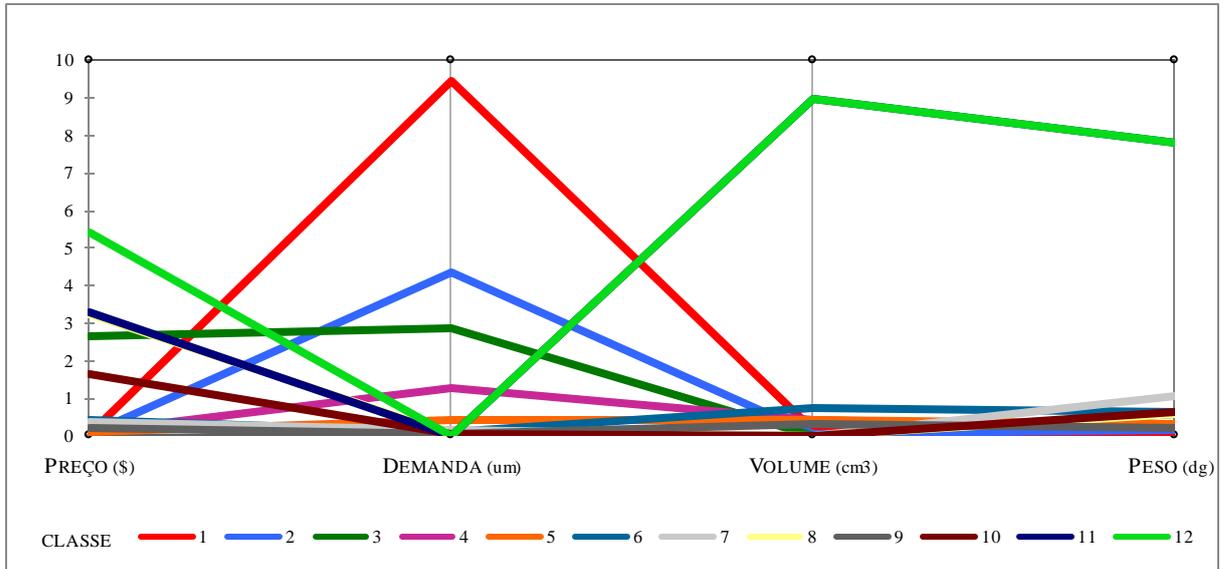
Fonte: Elaboração própria.

A Figura 18 mostra o comportamento das 12 classes em relação às suas características (preço, demanda, volume, peso). Observe-se que a classe 1 agrupa produtos com baixo preço e alta demanda, enquanto que a classe 12, agrupa produtos com preços mais elevados e baixos níveis de demanda.

Como os dados estão normalizados, o centroide de cada classe para cada característica é multiplicado por seu respectivo valor médio calculado inicialmente, retomando a ordem de grandeza inicial de cada característica. Os dados obtidos estão disponíveis no Apêndice D.

De acordo com as informações fornecidas pela empresa, alguns produtos mais especializados não podem ser entregues com atraso ou antecipação. Em geral, estes produtos também são os mais custosos. Assim, considerou-se que famílias de produtos com preços superiores as \$5.000, não podem ser entregues com atraso ou antecipação. Sendo assim, apenas as famílias que não possuem estes produtos (26 das 30 famílias) estão no subconjunto P_{Δ} .

Figura 18. Perfis das classes resultantes da agregação de produtos refrigerados.



Fonte: Elaboração própria.

Para avaliar o impacto do agrupamento de produtos na tomada de decisões através de testes computacionais, foram feitos outros agrupamentos em 15 e 20, seguindo o processo descrito anteriormente. No Apêndice D encontram-se todas as tabelas com a agregação de famílias em produtos e suas respectivas características.

5.3 Agregação de demanda em diferentes horizontes de planejamento

Como observado na revisão dos modelos que integram decisões estratégicas e táticas, a definição da estrutura do tempo é um fator importante para a representatividade do problema real. Desta forma, considerando o caráter tático das decisões de fluxo de produtos, a escolha das alternativas de transporte, os níveis de estoque nos CDs e nos clientes para atendimento da demanda, o horizonte de planejamento é dividido em períodos de tempo de diferentes alcances. A empresa forneceu dados de um semestre de demanda, então foram considerados períodos de meses ($T = 6$) e semanas ($T = 24$), sendo realizados testes a fim de definir a divisão adequada para o problema. A decisão de localização de CDs é tomada no início do

horizonte de planejamento e permanece inalterável. Assim, quanto maior o tamanho do horizonte de planejamento, melhor a avaliação em relação às decisões de localização. Por outro lado, quanto menor o período de tempo considerado, melhor é a representação das decisões de transporte.

Como clientes e produtos foram agrupados, resultando em 36 grupos de clientes e 2, 15, 20, 30 e 42 famílias de produtos, a demanda foi calculada como a soma das demandas dos produtos que pertencem a cada família e a soma da demanda dos clientes que pertencem a cada região de demanda, para cada período. A demanda para as diferentes instâncias é apresentada no Apêndice A.

6 TESTES COMPUTACIONAIS

O objetivo deste capítulo é apresentar e analisar os resultados dos testes realizados com o modelo matemático proposto no capítulo 4, MILDT, considerando diferentes formas de agregação dos dados reais coletados na empresa. Para resolução do modelo foi utilizada a linguagem de programação algébrica GAMS 24.1.3 e o solver CPLEX 12.5.1, em um computador com 32 GB de memória RAM, processador Intel® Xeon® CPU E5-1650 v3 @ 3.50 GHz, e sistema operacional Windows 7. Os critérios de parada definidos são *gap* de 1% ou 10.800 segundos para os testes de comparação da eficiência da abordagem de construção de uma solução inicial (ACSI) e critério de parada de *gap* de 1% para todos os demais testes.

Inicialmente, foi construída uma instância ilustrativa, a partir de um recorte a partir dos dados reais. Da agregação em 42 famílias de produtos foram selecionadas as quatro com maior faturamento ($|P| = 4$); seis entre os clientes com maior demanda ($|K| = 6$); e quatro semanas com valores de demanda médios ($|T| = 4$). A partir desta instância foi feita a validação do MILDT, analisando variações nos parâmetros de demanda, custos de transporte, estoque e instalação, assim como custos de penalidade por atraso e venda perdida. Além do MILDT proposto no capítulo 4, também foi testado uma simplificação deste modelo que não considera tributação (MILD). Os modelos são apresentados no Apêndice A e os resultados dos testes encontram-se no Apêndice E.

A seção 6.1 apresenta uma análise dos resultados da ACSI proposta na seção 4.4. Para avaliar a adequação do MILDT para resolver o problema prático e o impacto da agregação dos dados na solução, foram feitos diversos experimentos combinando diferentes formas de agregação dos dados reais coletados. Assim, a seção 6.2 apresenta uma análise do impacto do agrupamento dos dados nos resultados obtidos pelo MILDT para o problema prático. A seção 6.3 apresenta de forma detalhada a solução de uma

instância representativa para a análise dos resultados do MILDT, principalmente em termos das decisões táticas. A seção 6.4 compara os resultados do MILDT com o planejamento realizado na prática e com uma abordagem de decisão hierárquica.

Para identificar os experimentos, a agregação em famílias é denotada pela letra F seguida do número de famílias em que os dados são agregados. Por exemplo, F2 significa que os produtos são agregados em duas famílias. Da mesma forma, a divisão do horizonte de tempo é denotada com uma letra T seguida do número de períodos. Por exemplo, T1 significa que é considerado um único período de tempo. Assim, a instância T1_F2 corresponde à agregação dos produtos em duas famílias e a demanda é agregada em um único período de tempo. A Tabela 7 apresenta todas as combinações possíveis entre número de períodos de demanda e número de famílias de produto para a definição de experimentos e o número de variáveis de cada instância. Observe-se que o número de variáveis cresce com o aumento do número de períodos de tempo e de famílias de produtos.

Tabela 7. Experimentos computacionais e número de variáveis das instâncias para MILDT.

	# Variáveis e # Restrições	F2	F15	F20	F30	F42
T1	Binárias	931	931	931	931	931
	Inteiras	925	925	925	925	925
	Contínuas	3.920	23.350	30.815	45.765	63.690
	Restrições	5.277	5.810	6.015	6.425	6.917
T6	Binárias	5.556	5.556	5.556	5.556	5.556
	Inteiras	5.550	5.550	5.550	5.550	5.550
	Contínuas	23.470	140.050	184.840	274.540	382.090
	Restrições	31.587	34.785	36.015	38.475	41.427
T24	Binárias	22.206	22.206	22.206	22.206	22.206
	Inteiras	22.200	22.200	22.200	22.200	22.200
	Contínuas	93.850	560.170	739.330	1.098.130	1.528.330
	Restrições	126.303	139.095	144.015	153.855	165.663

6.1 Análise da abordagem para a construção de uma solução inicial – ACSI

O agrupamento de produtos em maior número de famílias não aumenta o número de variáveis binárias e inteiras (como pode ser observado na tabela 7). Porém aumenta a complexidade relacionada ao *trade-off* entre os diversos elementos, como a decisão de seleção de alternativas de transporte em cada trecho para as famílias, aliás aumenta o número de restrições do problema. Por sua parte, a agregação da demanda em maior número de períodos, sim aumenta o número de variáveis inteiras e binárias (veja-se tabela 7), e conseqüentemente, aumenta a complexidade do problema. As instâncias tipo T1 e T6 resolvem em tempo razoável, mesmo com maior número de famílias, assim como a instância T24_F2; porém precisa-se de maior tempo para encontrar boas soluções para as instâncias tipo T24.

Nesta seção, são comparados o *gap* e os valores de função objetivo e limitante inferior dos testes das instâncias T24, usando o *default* do CPLEX e usando a ACSI apresentada na sessão 4.4, a fim de avaliar a eficiência desta última. Os critérios de parada definidos são *gap* de 1% ou 10.800 segundos, a Tabela 8 apresenta os resultados.

Tabela 8. Resultados de implementação da ACSI com as instâncias T24.

Instância	CPLEX (<i>default</i>)				ACSI			
	Função Objetivo	Limitante Inferior	Gap	Tempo (s)	Função Objetivo	Limitante Inferior	Gap	Tempo (s)
T24_F15	196.652.796	193.550.864	1,6%	10.800	195.039.675	193.679.345	1,0%	865
T24_F20	175.413.398	172.955.195	1,4%	10.800	174.511.021	173.060.686	1,0%	1.319
T24_F30	181.345.689	154.361.255	14,9%	10.800	155.947.079	154.544.718	1,0%	5.618
T24_F42	101.360.015.370	150.060.561	99,9%	10.800	166.338.000	150.396.000	9,58%	10.800

Utilizando a ACSI se encontram soluções melhores que a resolução do MILDT com CEPLEX em *default*, tanto em termos de qualidade das soluções (valores da F.O.), quanto em relação ao tempo de resolução.

Veja-se na tabela 8 que, utilizando a ACSI, na resolução das três primeiras instâncias se atinge o critério de parada de *gap* de 1% em menor tempo ao tempo definido no critério de parada, 10.800 segundos. Por sua parte, na resolução destas mesmas três instâncias com o *default* do CEPLEX se atinge o tempo de critério de parada tempo e não de *gap*, ainda a instância T24_F30, está mais longe da solução ótima com *gap* de 14,9%. No caso da instância T24_F42, a resolução atinge o critério de parada de tempo com um *gap* de 9,58%, porém comparada com a resolução só com o CEPLEX a diferença do *gap* é de mais de 90%. Veja-se também que o limitante inferior, obtido ao fornecer a solução inicial, é melhor que o limitante inferior do *default* do CPLEX.

6.2 Impacto da agregação de produtos e demanda

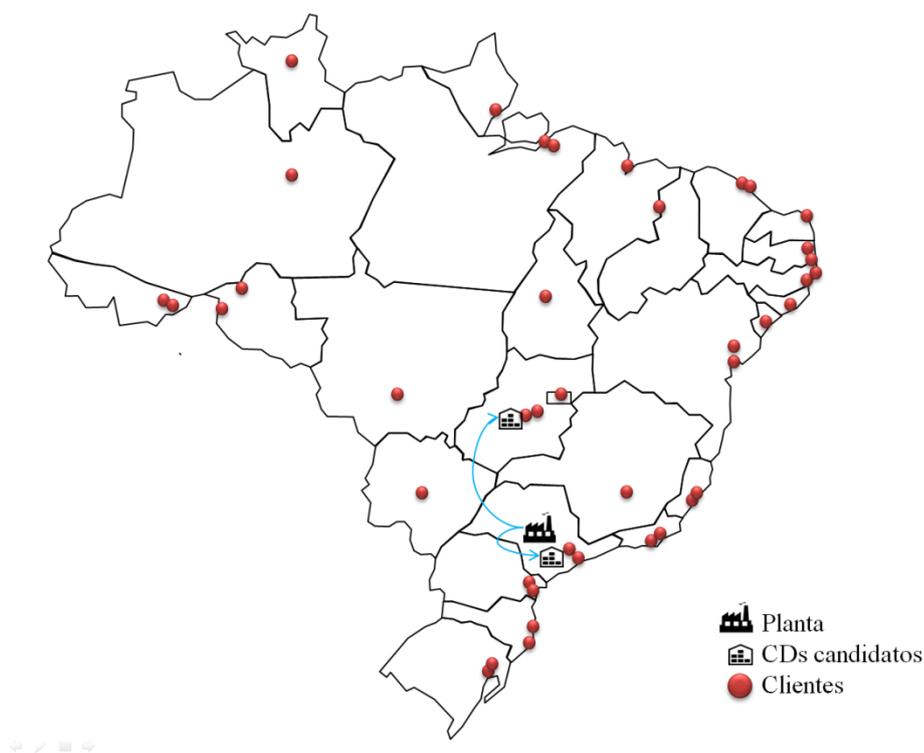
Nesta seção são apresentados os resultados obtidos com todas as combinações entre as diferentes estratégias de da agregação da demanda no horizonte de planejamento e agregação dos produtos em famílias. Vale ressaltar que agregação de produtos em famílias influencia a definição de valores para os parâmetros peso, volume, preço. Estes valores por sua vez influenciam na definição de outros parâmetros, como o custo de transporte fracionado, a capacidade máxima transportada em cada veículo, o valor máximo da carga sem utilização de escolta. Já a agregação de demanda no horizonte de planejamento, que na prática pode estar distribuída em diferentes períodos, pode afetar as decisões relacionadas à escolha de alternativas de transporte. No entanto, a consideração de mais períodos de planejamento e de mais famílias de produtos implica maior complexidade do problema.

O objetivo dos experimentos é analisar a representatividade das soluções obtidas com as diferentes instâncias. Ou seja, pretende-se avaliar até que ponto é válido desagregar a demanda em períodos e as famílias de produtos, de forma que a análise das decisões estratégicas e táticas não sejam significativamente impactadas. Para a

solução de todos os testes apresentados a partir desta sessão em adiante foi utilizada a ACSI e um critério de parada definido foi de *gap* de 1%.

Nas diferentes instâncias testadas foram escolhidos para abertura de CDs os mesmos locais candidatos, a saber, São Paulo e Goiânia (Figura 19), incorrendo nos mesmos custos totais de instalação. Já os custos táticos, resultantes do plano de transporte e armazenamento diferem e são analisados a seguir. A Tabela 9 a seguir sintetiza os resultados de custo obtidos para as instâncias testadas.

Figura 19. Rede de distribuição proposta.



Fonte: Elaboração própria.

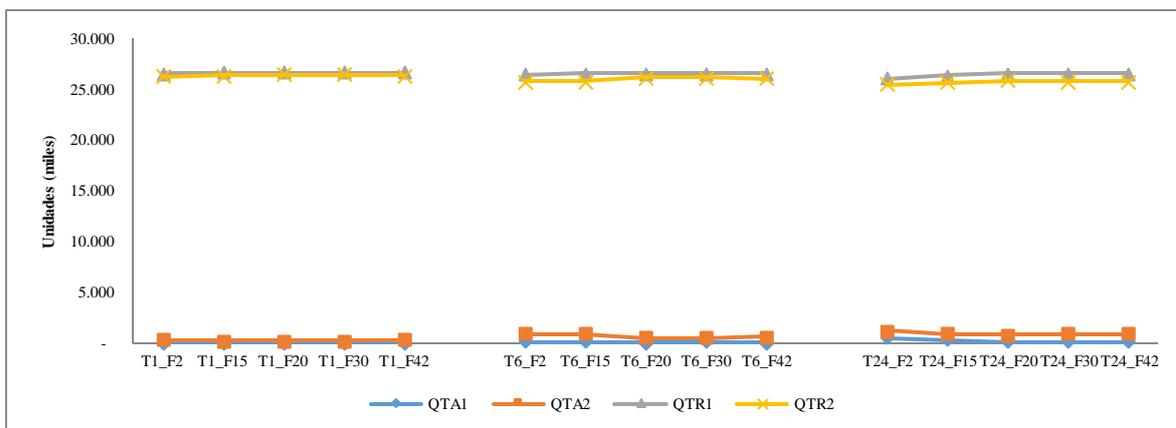
Tabela 9. Parcelas da função objetivo das instâncias testadas.

	Custos (\$)						Total
	Abertura	Estoque CDs	Estoque cliente	Transporte	Escolta	ICMS	
T1_F2	4.651.150	0	0	7.729.804	1.945.383	139.602.247	153.928.584
T1_F15	4.651.150	0	0	8.734.850	2.402.863	181.367.348	197.156.212
T1_F20	4.651.150	0	0	7.102.068	2.260.990	161.132.230	175.146.438
T1_F30	4.651.150	0	0	6.345.626	1.973.240	143.086.431	156.056.446
T1_F42	4.651.150	0	0	6.252.728	1.926.897	139.219.280	152.050.055
T6_F2	4.651.150	3.509	0	7.423.581	1.350.921	139.596.972	153.026.132
T6_F15	4.651.150	3.965	416	8.623.947	1.575.514	181.367.080	196.222.071
T6_F20	4.651.150	102.558	0	7.303.932	1.677.844	161.303.220	175.038.704
T6_F30	4.651.150	2.605	0	6.612.806	1.458.157	143.256.446	155.981.164
T6_F42	4.651.150	1.955	0	6.281.921	1.436.410	139.392.126	151.763.563
T24_F2	4.651.150	35.254	0	7.474.128	793.603	140.018.350	152.972.485
T24_F15	4.651.150	158.628	282	8.038.581	794.736	181.396.298	195.039.675
T24_F20	4.651.150	47.119	931	6.901.112	1.159.061	161.751.650	174.511.021
T24_F30	4.651.150	33.117	893	6.457.285	1.101.851	143.702.783	155.947.079
T24_F42	4.651.150	15.094	0	6.220.134	1.064.002	139.869.418	151.819.798

Note-se na Tabela 9 que nas instâncias com mais períodos, o custo de estoque é maior do que nas instâncias com menos períodos. Por exemplo, em média o custo de estoque nos CDs das instâncias T6 é de cerca de \$23 mil, enquanto a média de custo nas instâncias T24 é de cerca de \$58 mil. Isto pode ser explicado, pois a demanda é mais desagregada, representando melhor a variação de fluxo de material. Neste caso, para melhor aproveitamento das viagens e redução dos custos de transporte é interessante adiantar o volume a ser transportado, mesmo incorrendo em custos de estoque, sobretudo quando se trata de destinos distantes da origem.

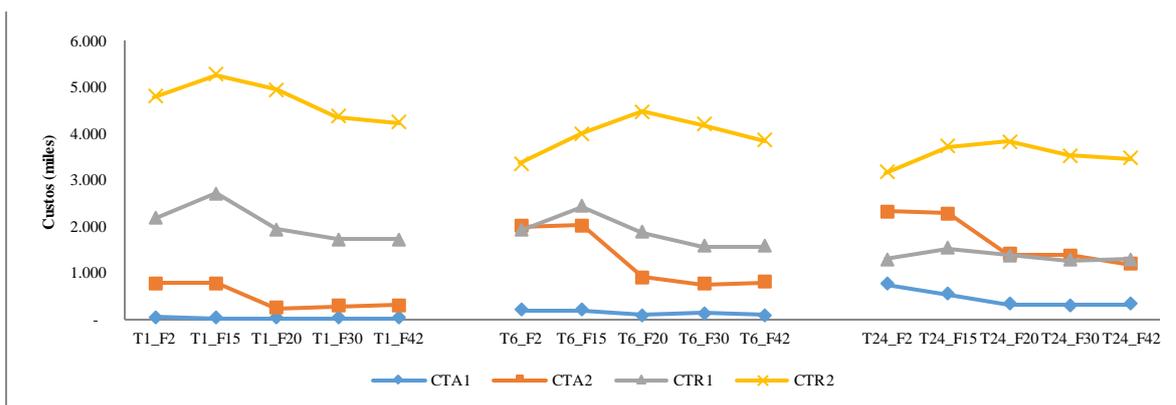
A Figura 20 apresenta o número de unidades transportadas (QT) da planta para o CD (trecho 1) e do CD para o cliente (trecho 2) por tipo de modal, aéreo (A) e rodoviário (R). Assim, por exemplo, QTA1 representa a quantidade de unidades transportadas por modal aéreo da planta para o CD. A Figura 21 mostra os respectivos custos de transporte (CT) de cada trecho por cada modal.

Figura 20. Quantidades transportadas por cada tipo de modal nas instâncias testadas.



Fonte: Elaboração própria.

Figura 21. Custos de transporte de cada tipo de modal nas instâncias testadas.

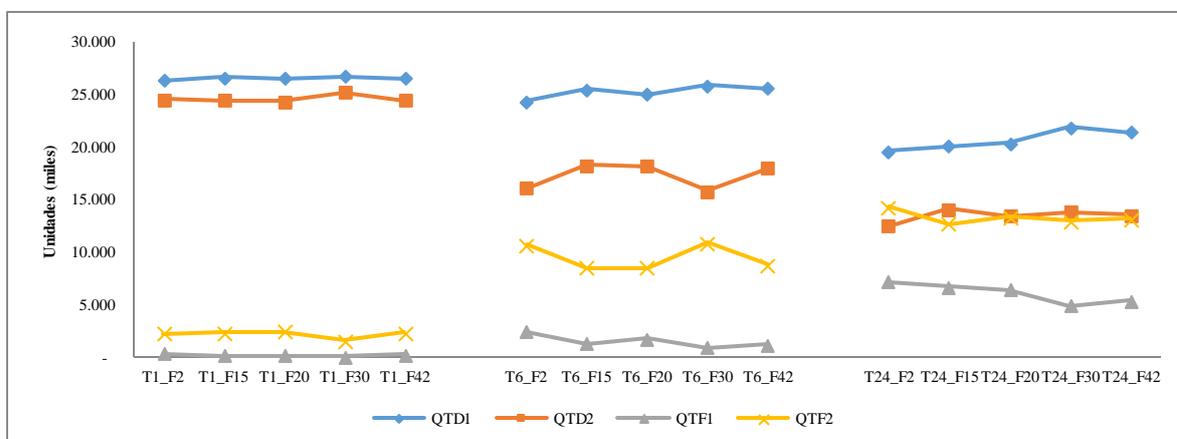


Fonte: Elaboração própria.

Note-se na Figura 20 que as decisões de escolha de modal de transporte não são impactadas significativamente pela forma de agregação dos produtos e da demanda. Porém, os custos mostram um desempenho diferente, como pode ser observado na Figura 21. Conforme o número de períodos aumenta, os custos de modal aéreo e rodoviário aproximam-se, sendo que o custo total com modal rodoviário diminui enquanto o custo total do modal aéreo aumenta. Com isso pode-se inferir que em cada modal, aéreo e rodoviário, podem ocorrer alterações nos tipos de frete e alternativas de transporte utilizadas.

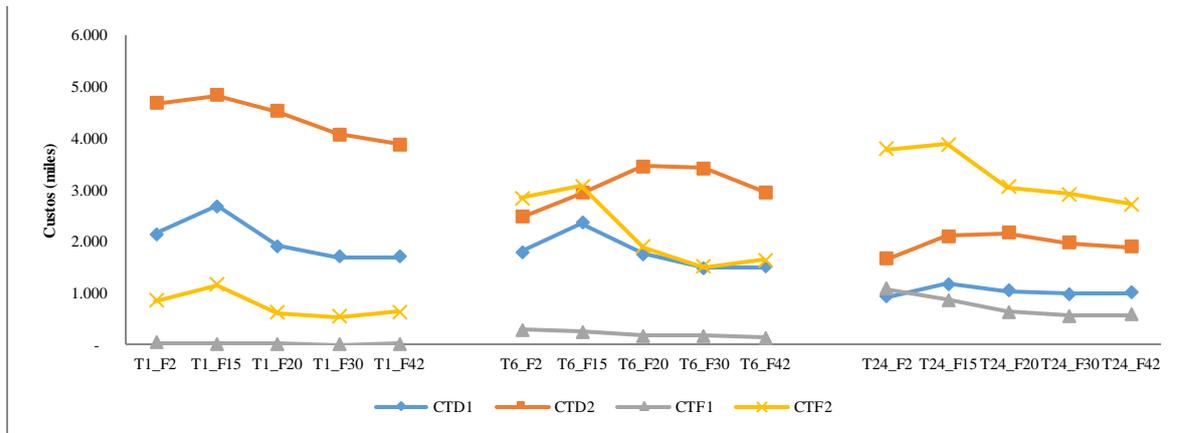
Ainda na Figura 21, observe-se que o comportamento dos custos para as diferentes formas de agregação de produtos em famílias difere bastante, principalmente considerando que a escala está em milhares. A agregação em 2, 15 e 20 famílias de produtos implica em maiores diferenças em relação aos custos dos diferentes modais, quando comparados com os resultados de custo da agregação em famílias com 30 e 42 produtos. Este resultado sugere que um maior número de famílias (produtos menos agregados) apresentam soluções mais consistentes. A Figura 22 apresenta o número de unidades transportadas (QT) da planta para o CD (trecho 1) e do CD para o cliente (trecho 2) para cada tipo de frete, dedicado (D) e fracionado (F). Por exemplo, QTD1 representa a quantidade de unidades transportadas por frete dedicado da planta para o CD. A Figura 23 mostra os respectivos custos de transporte (CT) de cada trecho por cada modal.

Figura 22. Quantidades transportadas por cada tipo de frete nas instâncias testadas.



Fonte: Elaboração própria.

Figura 23. Custos de transporte de cada tipo de frete nas instâncias testadas.



Fonte: Elaboração própria.

Note-se nas figuras 22 e 23 que a forma de agregação da demanda no horizonte de planejamento influencia as decisões de tipo de frete. As instâncias com a mesma forma de agregação da demanda mantêm proporções aproximadas da quantidade de unidades transportadas em cada trecho e em cada tipo de frete e as instâncias com diferente agregação de demanda mostram diferenças. É possível notar na Figura 22 uma simetria entre as curvas de frete dedicado e fracionado por trecho. O frete dedicado é o mais utilizado em ambos os trechos quando o horizonte considera um único período de tempo. Existe uma convergência dos fretes, dedicado e fracionado. Conforme a demanda é desagregada em períodos de tempo menores (meses e semanas), a utilização do frete fracionado vai aumentando em detrimento do frete dedicado. Porém, a utilização do transporte dedicado no trecho 1 é maior e implica maior custo. Já no trecho 2 a utilização do frete dedicado é superada pelo frete fracionado, sendo que, quando o horizonte de planejamento é dividido em semanas, a utilização das duas alternativas é equivalente em termos de quantidade transportada. Este comportamento é esperado, já que a desagregação de demanda em períodos implica em menor quantidade transportada em cada período, de forma que o frete fracionado mostra-se mais vantajoso em termos de custo, especialmente para o trecho 2, onde a demanda é especialmente mais distribuída entre os clientes.

Este resultado corrobora a hipótese de que as quantidades transportadas por modal não são significativamente alteradas nos testes com diferentes formas de agregação dos dados, mas que ocorrem mudanças nas alternativas de transporte usadas. De fato, ocorre uma transferência progressiva de unidades transportadas por frete dedicado para unidades transportadas por frete fracionado dentro do mesmo modal.

Em relação às alternativas de frete para o transporte de carga fria, estão disponíveis duas alternativas de transporte, *truck* refrigerado (dedicado e terrestre) e aéreo refrigerado (fracionado), nos testes com 24 períodos de tempo (T24), para a maioria das formas de agregação das famílias de produtos, 67% do volume dos produtos refrigerados são transportados por modal rodoviário, *truck* refrigerado. Apenas nos testes T24_F2 e T24_F15 a proporção é alterada para 34% e 57%, respectivamente. Novamente, estes resultados mostram soluções mais próximas em relação à utilização de tipo de frete e modal para as instâncias com 20, 30 e 42 famílias de produtos.

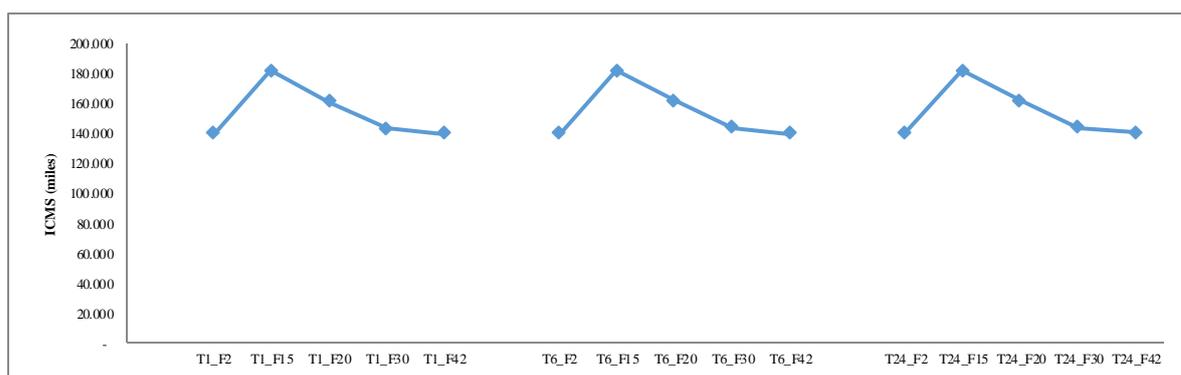
Mais especificamente em relação aos custos de transporte, note-se na Figura 23 que existem tendências de aumento e redução das curvas no gráfico para as diferentes formas de agregação em períodos de tempo. Porém não se observa uma simetria, como no gráfico das quantidades transportadas (Figura 22). Isto pode ser explicado pelo fato dos custos de transporte envolver muitos fatores além do tipo de frete ou modal, por exemplo: tipo de veículo, capacidade dos veículos, distância percorrida, limite de valor de carga e limite de valor para escolta.

Nos testes com um único período de tempo (T1), o custo de transporte dedicado predomina, sendo que o segundo trecho é maior que o primeiro. Isto porque a demanda no trecho 1 é concentrada em dois locais (CDs) e com os dados agregados, a capacidade dos veículos pode ser mais bem aproveitada. Já no trecho 2, os destinos (clientes) estão geograficamente distribuídos, o que implica em maior uso de veículos com menor capacidade. Nos testes com 6 períodos de tempo, as curvas de custo de frete dedicado e

fracionado se aproximam. Finalmente, quando o horizonte de planejamento é dividido em 24 semanas (T24), o frete fracionado no segundo trecho passa a ser o maior entre todos, inclusive maior que o frete dedicado no trecho 1, que diminui consideravelmente sua participação nos custos. Entretanto, as curvas de frete dedicado e fracionado do primeiro trecho se aproximam (parte inferior do gráfico – Figura 23), indicando que são menos representativas no custo. Os custos com escolta diminuem com maior número de períodos, pois as cargas são menos consolidadas, o que reduz número de viagens.

A Figura 24 compara o valor do ICMS total em cada instância. Observe-se que o ICMS é influenciado pela agregação dos produtos em famílias, e não pela agregação da demanda em períodos. Isto é esperado, já que o ICMS pago pela movimentação dos produtos não depende do horizonte de planejamento, mas dos custos e preços dos produtos, que é alterado pela agregação de produtos em diferentes famílias. O valor do ICMS nos testes com agregação de produtos em 30 famílias está mais próximo do valor médio do ICMS gerado em todos os diferentes testes.

Figura 24. ICMS pago nas diferentes instâncias testadas.

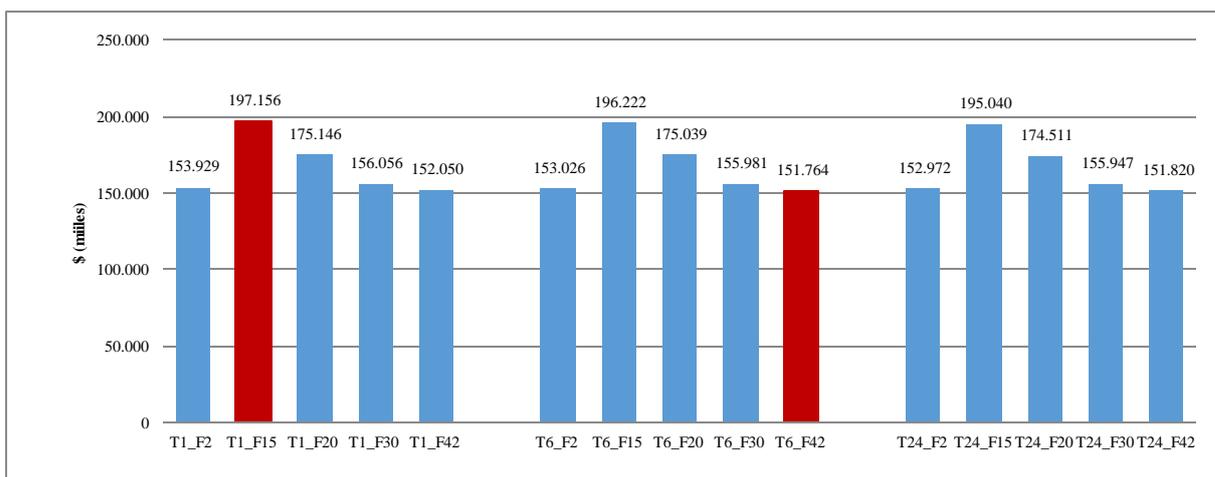


Fonte: Elaboração própria.

Nos experimentos realizados foi observada uma diferença máxima de 23% nos valores da função objetivo obtidos, veja-se a Figura 25. Como os locais para abertura dos CDs foram os mesmos, as diferenças de custos correspondem aos custos associados às decisões táticas de distribuição. Para analisar o efeito do planejamento com famílias

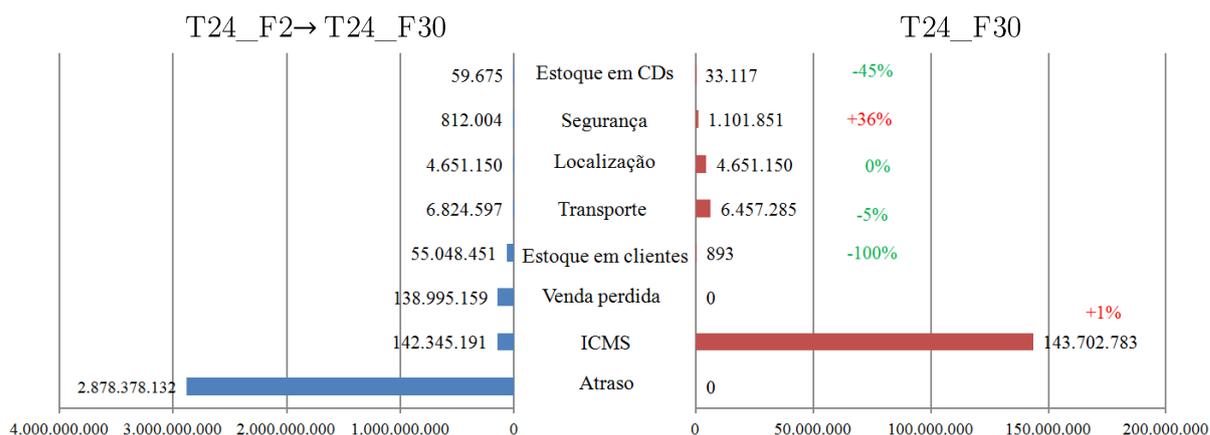
de produtos mais agregadas nas operações táticas, foi realizado um teste fixando-se os resultados de fluxo e o plano de transporte obtidos no teste T24_F2 no experimento T24_F30. A Figura 26 apresenta o resultado deste teste.

Figura 25. Valor da função objetivo das instâncias testadas.



Fonte: Elaboração própria.

Figura 26. Resultado de utilizar o plano de transporte da solução da instância T24_F2 para distribuir na instância T24_F30.



Fonte: Elaboração própria.

Note-se na figura 26 que a maior diferença está nos custos de estoque no cliente por entrega antecipada e nos valores das penalidades por atraso e venda perdida (vale a pena ressaltar que estas penalidades foram consideradas muito altas). Uma vez que a

utilização das alternativas de transporte é previamente definida (T24_F2), a estratégia do MILDT é aproveitar ao máximo a capacidade de transporte. Estes resultados mostram que a agregação dos produtos em famílias é um aspecto que deve ser cuidadosamente estudado para gerar soluções adequadas para o problema do ponto de vista do planejamento tático. O mesmo impacto é observado ao utilizar o plano de transporte gerado com dados de demanda agregada em um período (T1) para decidir sobre o tipo de frete e transporte para a distribuição de produtos agregados em semanas (T24).

6.3 Detalhamento dos resultados de instância representativa

Os resultados dos testes com diferentes formas de agregação dos dados em termos de períodos de tempo e de agrupamento de produtos mostram que a preparação dos dados interfere nas decisões táticas, particularmente na definição do plano de transporte. Neste sentido, a instância com 30 famílias de produtos e horizonte de planejamento dividido em 24 semanas parece representar bem o problema, sendo que a agregação de produtos em 30 famílias reporta uma variabilidade intraclasse muito baixa (menos de 2%) e a consideração de períodos de planejamento semanais mostrou-se adequada para avaliar as decisões relacionadas ao planejamento de transportes.

A instância T24_F30 foi resolvida em 5.618 segundos, com *gap* de 1%, utilizando a ACSI apresentada na seção 4.4. Como mencionado anteriormente, a decisão de localização implica na instalação de CDs em São Paulo e Goiânia. A Tabela 10 apresenta os resultados das parcelas de custo obtidas e a proporção destes em relação ao custo total.

Tabela 10. Parcelas de custo da solução com a instância T24_F30.

	Custos da rede logística (\$)	Porcentagem de participação
Custos de abertura	4.651.150	2,983%
Custo de estocar nos CDs	33.117	0,021%
Custo de estocar nos clientes	893	0,001%
Custo de transporte	6.457.285	4,141%
Custo com escoltas	1.101.851	0,707%
ICMS	143.702.783	92,148%
TOTAL	155.947.079	100,000%

A maior participação no custo total da rede é o valor do ICMS, que corresponde a 92% do custo total, seguido pelo custo de transporte, que corresponde a 4% do total. O custo da instalação de CDs inclui os custos fixos de contrato com o operador logístico e um valor de seguro pela descentralização dos estoques por \$4 milhões, já que são abertos dois CDs. Do total de produtos distribuídos, 77% saem do CD de São Paulo e 23% a partir do CD de Goiânia. Essa distribuição é influenciada pelo valor de ICMS a pagar em cada CD, como detalhado na Tabela 11.

Tabela 11. ICMS a pagar por cada CD com a instância T24_F30.

	ICMS por transferência Planta – CD (\$)	ICMS por venda CD - Cliente ou Saldo (\$)	Total ICMS a pagar por CD (\$)	Participação em ICMS (%)	Volume distribuído (%)
São Paulo	79.822.430	4.634.851	84.457.281	89%	77%
Goiânia	10.335.751	0	10.335.751	11%	23%
Total	90.158.181	4.634.851	94.793.032	100%	100%

Como a ordem de grandeza do ICMS é superior aos outros custos da rede, o ICMS domina a solução. Isso é refletido na existência de fluxo de produtos do CD de Goiânia para clientes do Estado de São Paulo, mesmo com a planta localizada neste Estado.

Na maioria dos casos em que o CD de Goiânia atende clientes de São Paulo o custo de transporte é mais alto, exceto quando o atendimento é feito pela alternativa

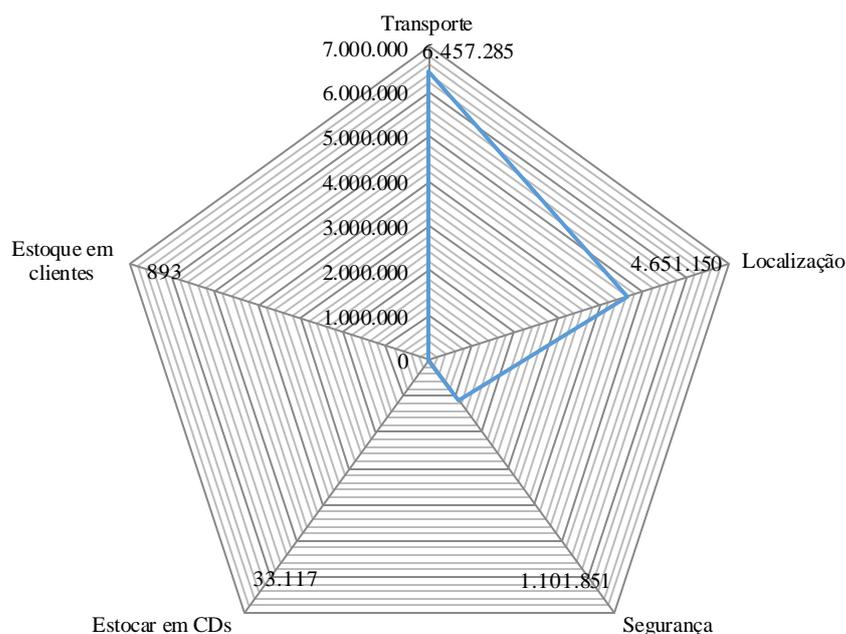
de transporte fracionado aéreo. Pois quando a demanda do cliente no período é de poucas unidades de produto e preço do produto é muito alto (de forma que o valor monetário do pedido supera em muito o limite estabelecido para o valor de carga em frete) o uso de alternativas de transporte dedicado é menos indicado. Uma vez que, além de pagar o custo do veículo dedicado, é necessário incorrer em custo com escolta para o transporte. Porém, quando se trata de produtos que requerem transporte refrigerado, a única alternativa de transporte fracionado disponível é por modal aéreo, o que não é possível dentro do mesmo Estado. Assim, no caso de clientes localizados no Estado de São Paulo que demandam produtos de cadeia fria, seja de poucas unidades e/ou produtos muito caros, é mais econômico atender a partir do CD de Goiânia.

Em outros casos sempre será mais custoso atender clientes em São Paulo a partir do CD de Goiânia. Porém esse atendimento resulta vantajoso em termos do montante de ICMS a pagar, já que a alíquota interna de ICMS no estado de São Paulo é maior (18%) que alíquotas interestaduais entre São Paulo e Goiânia (SP-GO: 7% e GO-SP: 12%). Assim, em ambas as operações de transferência (da planta em SP para CD em Goiânia) e de venda (do CD em GO para cliente em SP) o ICMS gerado é menor.

Este resultado mostra que o MILDT verifica o *trade-off* entre os custos de transporte e o valor do imposto pago por circulação de mercadorias, aproveitando as vantagens em termos de custos. Ainda, este teste evidencia a importância da consideração de ICMS na decisão de localização em cadeias de suprimento brasileiras, e quão importante este imposto é na estrutura de custo das redes. No entanto, na otimização dos fluxos de produtos, a magnitude do valor do ICMS pode fazer com que os outros *trade-offs* e decisões envolvidas sejam menos relevantes. Também, se confirma a afirmação de Shah (2004) de que a consideração das implicações fiscais na configuração de rede muitas vezes mostra que estas tem precedência sobre questões logísticas, resultando em cadeias de suprimento mais complicadas para planejar.

A Figura 27 mostra a importância dos custos logísticos, evidenciando-se que o custo de transporte, é o que apresenta maior participação e, portanto, a consideração deste custo na tomada de decisões de localização de CDs.

Figura 27. Diagrama polar dos custos logísticos na rede.



Fonte: Elaboração própria.

A Tabela 12 detalha os resultados para a instância T24_F30 em relação ao número de viagens feitas com cada tipo de veículo em cada trecho. Para realizar o transporte com frete dedicado são necessárias 349 viagens da planta até o CD, das quais 346 devem ser escoltadas; e 308 viagens da planta até o CD, das quais 298 devem ser escoltadas.

Tabela 12. Viagens realizadas por tipo de veículo (modal rodoviário) com a instância T24_F30.

Tipo de veículo	# Viagens trecho 1	# Viagens trecho 2	Total
<i>Fiorino</i>	0	18	18
<i>Toco</i>	171	68	239
<i>Truck</i>	3	2	5
<i>Carreta</i>	6	10	16
<i>Truck refrigerado</i>	169	210	210
Total	349	308	488

No trecho 1, a maioria as viagens atingem o limite máximo do valor de carga que é possível transportar. Já no trecho 2, o valor da carga oscila entre \$150 mil (valor a partir do qual se requer escolta) e \$3 milhões (valor máximo). Este resultado mostra que a capacidade de carga em valor monetário é bem explorada na solução, mesmo que a capacidade em volume não seja totalmente aproveitada. Isso ocorre, pois neste problema o valor da carga representa uma limitação mais restrita.

A Tabela 13 apresenta de forma detalhada o volume transportado em cada alternativa de transporte e seu respectivo custo para cada trecho. Observa-se que para realizar o transporte da planta para os CDs é usado principalmente o modal rodoviário (99,7% do volume), o que corresponde a 80% dos custos de transporte. Já na distribuição dos CDs para os clientes, o modal rodoviário transporta 97% do volume, o que implica em 71% dos custos de transporte. Isso porque o custo unitário das alternativas de transporte aéreo é muito maior, de forma que estas alternativas são escolhidas por restrições de distância ou quando valor da carga fracionada inviabiliza o modal rodoviário. Em geral, o modal aéreo é utilizado para produtos com pouca demanda e alto valor agregado.

Tabela 13. Plano de transporte para cada trecho com a instância T24_F30.

Alternativa de transporte	Quantidade Trecho 1	(%)	Quantidade Trecho 2	(%)	Custo Trecho 1	(%)	Custo Trecho 2	(%)
<i>TL Fiorino</i>		0%	349.359	1%	-	0%	156.483	3%
<i>TL Toco</i>	16.001.463	60%	5.100.916	19%	275.013	18%	518.092	11%
<i>TL Truck</i>	535.890	2%	187.692	1%	11.494	1%	12.166	0%
<i>TL Carreta</i>	4.127.269	15%	7.684.900	29%	13.161	1%	92.281	2%
<i>TL Truck refrigerado</i>	1.119.023	4,2%	459.865	1,7%	697.430	45%	1.197.872	24%
Subtotal	21.783.645	82%	13.782.731	52%	997.097	64%	1.976.894	40%
<i>LTL Rodoviário</i>	4.793.347	18%	12.036.677	45%	255.957	16%	1.546.205	32%
<i>LTL Aéreo</i>	-	0%	98.426	0,4%	-	0%	95.840	2%
<i>LTL Aéreo refrigerado</i>	73.826	0,3%	732.984	2,8%	303.737	20%	1.281.554	26%
Subtotal	4.867.173	18%	12.868.087	48%	559.694	36%	2.923.599	60%
Total	26.650.818	100%	26.650.818	100%	1.556.791	100%	4.900.494	100%

O transporte no trecho 1 utiliza principalmente o frete dedicado (TL) para 82% da quantidade total transportada, sendo que são usados os tipos de veículos com maior capacidade. O custo total do frete dedicado corresponde a 58% do custo total de transporte do primeiro trecho. Os veículos tipo *toco* e *carreta* transportam a maior quantidade (75% do total), porém a utilização destes veículos representa apenas 48% do custo de transporte no trecho 1. Isto porque o custo de veículos tipo *truck* refrigerado é muito maior devido ao acondicionamento que possui para transporte de produtos em cadeia fria.

Vale mencionar que 12 das 30 famílias de produtos da instância T24_F30 requerem conservação em cadeia fria, sendo que a demanda destes produtos representa 4,5% da demanda total. O custo de transporte no trecho 1 do veículo *truck* refrigerado tem uma participação de 45% no valor total, mesmo transportando apenas 4,2% da quantidade total de produtos. Apenas 0,3% dos produtos refrigerados são transportados utilizando o modal aéreo.

Os produtos refrigerados transportados por modal aéreo caracterizam-se pelo alto valor (preços entre \$2.000 e \$10.000), pois poucas unidades atingem o limite

máximo para o valor de carga transportada em um veículo, sendo necessário várias viagens em veículos do tipo *truck* refrigerado escoltadas. Outros produtos refrigerados transportados pelo modal aéreo, caracterizam-se pela baixa demanda por cliente (entre 5 e 70 unidades), sendo mais vantajoso em termos de custo o transporte fracionado aéreo que o transporte dedicado rodoviário.

No trecho 2 o uso de alternativas de transporte é mais diversificado. O frete dedicado corresponde a 52% da quantidade total transportada, sendo que são utilizados todos os tipos de veículos, principalmente carreta (29%). O total transportado por frete fracionado corresponde majoritariamente ao modal rodoviário. Em termos de custo, o frete dedicado responde por 40% do custo total de transporte no trecho 2, enquanto o frete fracionado resulta em 60% do custo total. Da mesma forma que no trecho 1, o veículo tipo *truck* refrigerado transporta 1,7% da quantidade total, sendo o restante transportado por modal aéreo.

Nos CDs são armazenadas mais de 1.515.241 unidades de produtos, distribuídas conforme mostra a Tabela 14 Vale a pena ressaltar que estas unidades não correspondem ao dimensionamento do estoque que deve ser armazenado nos CDs, e sim a quantidade de unidades enviadas de forma antecipada para atender a demanda de períodos futuros, aproveitando-se a capacidade excedente nos veículos para otimizar a utilização das alternativas de transporte dedicado. Todos os produtos enviados aos clientes são despachados a partir dos CDs e, portanto, os custos totais de armazenagem são muito maiores. No entanto, estes custos não dependem da localização dos CDs, não interferem nos *trade-offs* e não foram considerados no MILDT.

Tabela 14. Quantidade armazenada por CD e condição de temperatura com a instância T24_F30.

	Quantidade temperatura ambiente	Quantidade em cadeia fria	Total	%
GO	206.529	1.073.537	1.280.065	84%
SP	98.060	137.116	235.175	16%
Total	304.588	1.210.652	1.515.241	100%

Observa-se na Tabela 14 que, o armazenamento de produtos em cadeia fria no CD de Goiânia corresponde a 1.073.537 unidades, o que representa mais de 70% do total armazenado. O maior número de unidades estocadas corresponde a apenas 3 famílias de produtos e representa cerca de 55% do custo total.

Nos resultados da instância considerada mais representativa para o problema prático (T24_F30), não ocorrem atrasos e vendas perdidas, pois toda a demanda dos clientes é atendida em cada período. Isso ocorre porque as penalidades por atraso consideradas neste estudo foram altas, representando que a política da empresa, cuja estratégia de negócio é pautada em maiores níveis de serviço. Em relação ao estoque nos clientes, os resultados mostram que na semana 23 são transportadas 1900 unidades de produtos a partir do CD de Goiânia para Manaus (AMC), antecipando o atendimento da demanda do cliente. Embora esta não seja uma prática desejável, o impacto é menor do que o não atendimento e os custos de transporte compensam os custos de antecipação.

6.4 Comparação com o planejamento atual da rede

Uma comparação *vis-à-vis* com o cenário atual não é possível pois não temos todos os resultados praticados pela empresa, principalmente aqueles associados ao planejamento tático. Assim, para comparar os resultados obtidos com o cenário atual, foram feitos dois testes. O primeiro teve como intuito avaliar a estrutura física da rede. Assim, o MILDT foi resolvido fixando-se a localização de um único CD no Estado de

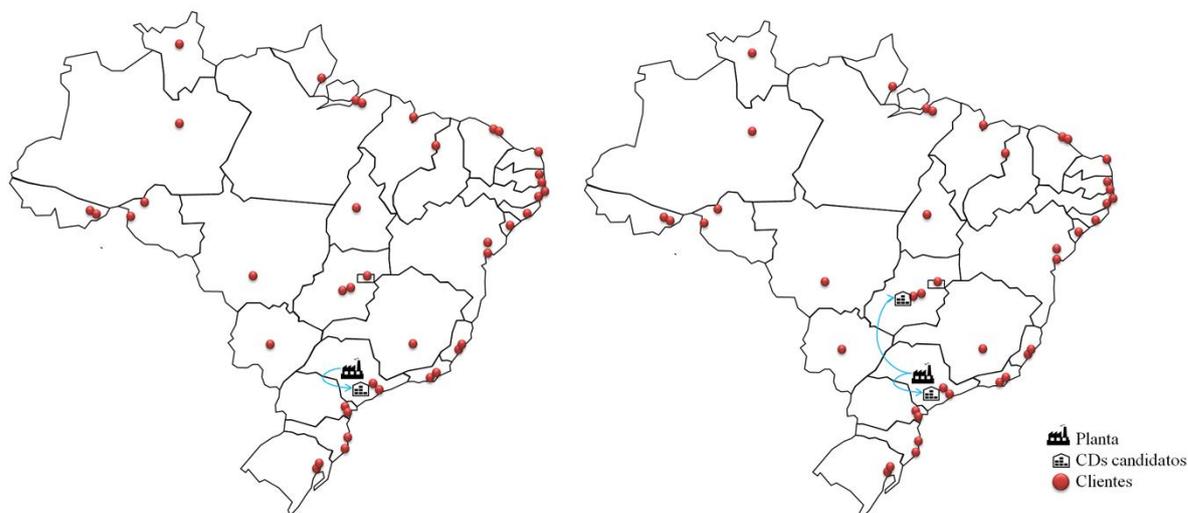
São Paulo, de forma que só as decisões táticas são otimizadas com o MILDT. Em um segundo teste, se resolve primeiro um problema de localização e, a seguir, os locais selecionados são fixados no MILDT, então da mesma forma que no primeiro teste, só as decisões táticas são otimizadas. Os resultados dos testes são contrastados com solução obtida com o MILDT.

6.4.1 Comparação com o planejamento atual da rede

Fixando a localização de um único CD em São Paulo, simulando a rede atual, o problema foi resolvido em 200 segundos com *gap* de 0,5%. A Figura 28 mostra a estrutura da rede, por sua parte a Figura 29 apresenta a comparação percentual de cada parcela de custo entre a rede proposta pela solução do MILDT e a rede atual. A maior participação no custo total da rede atual é o valor de ICMS com 94%, seguido do custo de transporte de 3,3%.

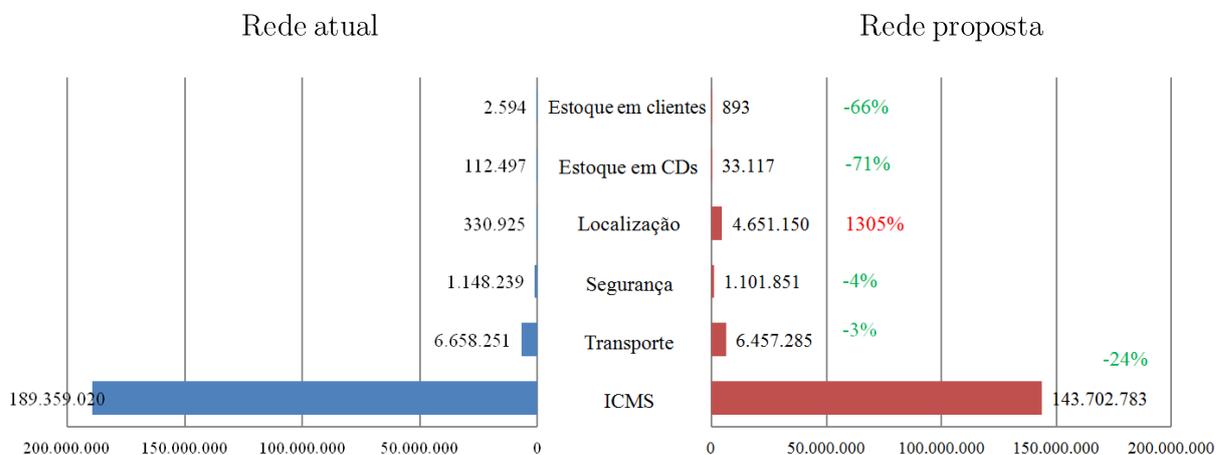
No cenário atual o montante de ICMS a pagar é 23% maior que o valor para a rede proposta pelo MILDT. Isto porque atualmente a distribuição é realizada a partir de um único CD em São Paulo sem aproveitar vantagens de diferentes taxas interestaduais de ICMS quando se tem mais de um CD. Aliás, na distribuição intraestadual incide uma taxa de ICMS alta (18%), e não aproveitando os benefícios fiscais, como crédito presumido de 5,6% que é oferecido pelo Estado de Goiás para operações logísticas de produtos farmacêuticos.

Figura 28. Comparação da rede atual e a rede proposta.



Fonte: Elaboração própria.

Figura 29. Comparação das parcelas de custo da rede atual e a proposta com a instância T24_F30.



Fonte: Elaboração própria.

Nos CDs são armazenadas mais de 6.895.605 unidades de produtos. Como foi mencionado anteriormente, estas unidades correspondem a quantidade de unidades adiantadas, aproveitando capacidade excedente das viagens, para atender a demanda de futuros períodos. A Tabela 15 apresenta as unidades estocadas e transportadas na operação logística das diferentes redes.

Tabela 15. Quantidades estocadas e transportadas da rede atual e a proposta com a instância T24_F30.

	Rede proposta		Rede atual	
	Unidades	Custo (\$)	Unidades	Custo (\$)
Estoque em CD	1.515.241	33.117	6.895.605	112.497
Estoque no cliente	1.900	893	2.561	2.594
Frete dedicado no trecho 1	21.783.645	997.097	25.954.847	1.381.696
Frete dedicado no trecho 2	13.782.731	1.976.894	16.130.879	2.764.736
Frete fracionado no trecho 1	4.867.173	559.694	695.971	42.997
Frete fracionado no trecho 1	12.868.087	2.923.599	10.519.939	2.468.821

Note-se que na solução da rede proposta a quantidade transportada por frete dedicado é menor quando comparada com a solução da rede atual. O frete dedicado tem uma participação de 67% (nos dois trechos) na rede proposta, enquanto que na rede atual a participação deste frete é de 79%. Porém, a redução no custo total de transporte é de apenas 3% em relação à rede atual. Para realizar o transporte na rede atual são necessárias 587 viagens com frete dedicado da planta até o CD, das quais 519 são escoltadas; e 395 viagens da planta até o CD, das quais 365 foram escoltadas. Em total são usadas 325 viagens e 240 escoltas adicionais, quando comparado com a rede proposta. Isto é esperado porque para a distribuição interestadual não está disponível modal aéreo, assim para a demanda de produto refrigerado de clientes localizados em SP, obrigatoriamente tem que ser feita com *truck* refrigerado, se o produto é muito caro serão necessárias várias viagens escoltadas. Para realizar o transporte da planta para os CDs é utilizado 100% de modal rodoviário. Já na distribuição dos CDs para os clientes, o modal rodoviário transporta o 97% da quantidade total.

Na rede proposta pelo MILDT, estocam-se mais produtos nos CDs, porém o custo de estoque não aumenta linearmente, pois o custo unitário de estoque depende da condição de temperatura e volume do produto. Ou seja, não existe uma relação linear relacionada ao número de unidades estocadas.

Em relação ao estoque nos clientes na rede atual, a Tabela 16 mostra as unidades estocadas durante o horizonte de planejamento. Observe-se que apenas dois clientes localizados em Manaus e Porto Velho recebem produtos antecipadamente. As distâncias destes clientes ao CD são superiores a 3.100 km, limite a partir do qual a alternativa de transporte fracionado a temperatura ambiente não está disponível. Assim, os produtos são transportados até estes clientes aproveitando a capacidade excedente de viagens em períodos anteriores. Para o cliente localizado em Manaus (AMC), um veículo tipo *toco* realizou o transporte de 1900 unidades de produto 13 na semana 23, das quais 1600 são destinadas a atender a demanda da mesma semana 23 e 300 unidades são deixadas em estoque em consignação para estarem disponíveis para o cliente na semana 24. Na semana 17 ROC recebe produtos de diferentes famílias em um veículo tipo *toco*, adiantando-se 200 unidades do produto 13 que ficam estocadas durante a semanas 17 e 18 até a semana 19, quando são efetivamente demandadas.

Tabela 16. Estoque em consignação gerado pela rede atual.

Produto	Cliente	Semana 3	Semana 4	Semana 5	Semana 17	Semana 18	Semana 23
1	SPC						60
13	AMC						300
	ROC	900	500	400	200	200	

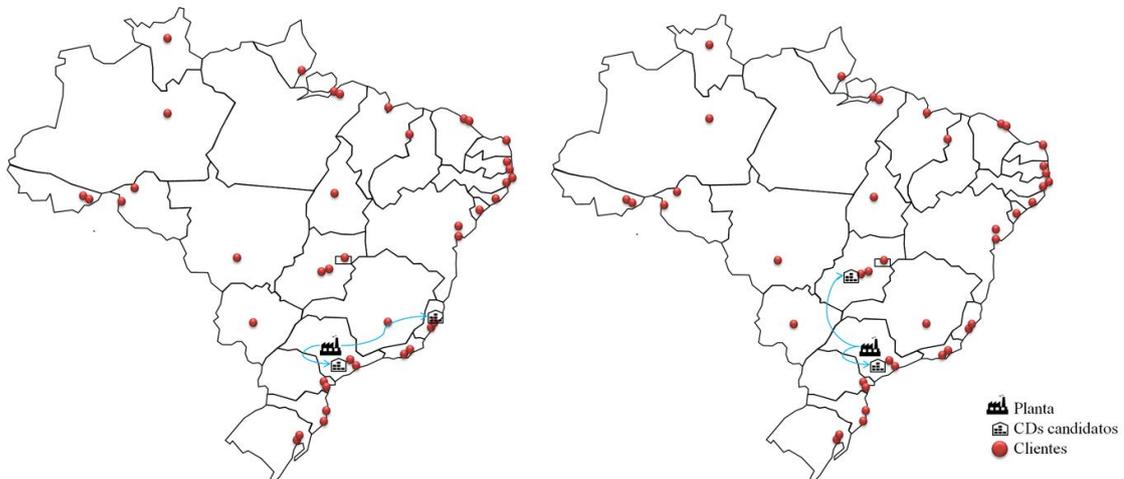
O cliente localizado em Porto Velho, recebe 1200 unidades de produto 13 na semana 3 com um veículo tipo *toco* para atender a demanda de 300 unidades da mesma semana e deixa em consignação 900 unidades para atender a demanda das semanas 4, 5 e 6 de 400, 100 e 400 unidades, respectivamente. No caso de São Paulo, aproveita-se a capacidade extra de um veículo *truck* refrigerado para transportar a demanda das semanas 23 e 24, deixando em consignação a demanda da semana 24.

6.4.2 Comparação com uma abordagem hierárquica

Outra forma de abordar este problema é a tomada de decisões em forma hierárquica: isto é tomar decisões de localização independentemente das decisões de distribuição. Na abordagem não integrada proposta são considerados dois problemas desacoplados, que são resolvidos de forma sequencial em duas fases. Na primeira fase, é resolvido o problema de localização de p -medianas com $P = 2$, que gera a localização dos CDs e fluxo dos produtos. Na segunda fase, a partir da solução associada à localização, determinam-se as decisões de distribuição. Para observar os benefícios de cada abordagem, foram resolvidos os testes T1_F30, T6_F30, T24_F30, com as abordagens hierárquica e integrada.

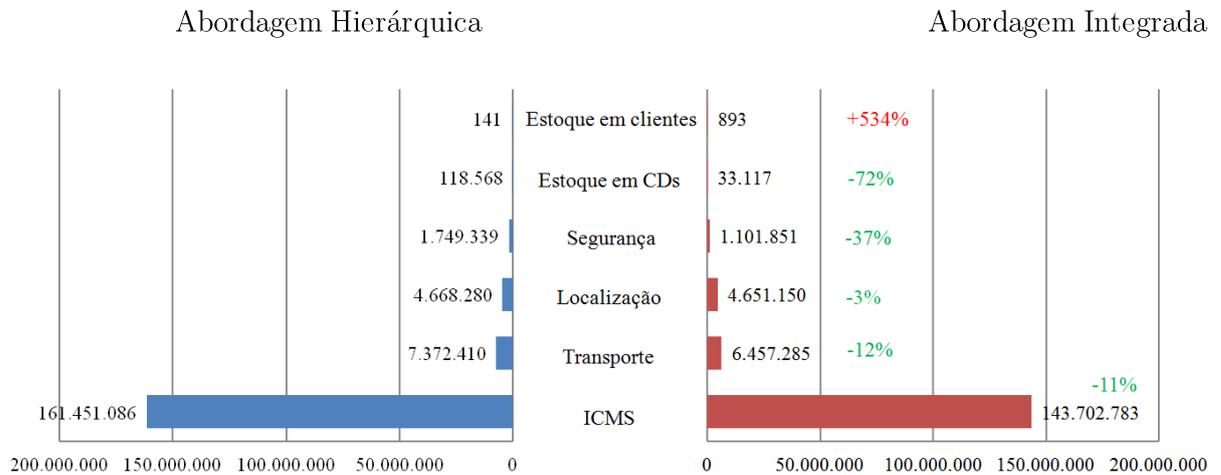
Os testes da abordagem hierárquica foram resolvidos com gap menor do que 1% em menos de 600 segundos. Os testes com o modelo integrado, MILDT, foram resolvidos com gap de 1% em 5.618 segundos. Porém, a abordagem hierárquica reporta, nos diferentes testes, uma solução diferente ao modelo integrado, que indica a localização de CDs em Goiânia e Vitória, como mostra a Figura 30. A Figura 31 apresenta uma comparação entre os resultados da abordagem hierárquica e integrada para a instância T24_F30.

Figura 30. Comparação das redes das abordagens hierárquica e integrada.



Fonte: Elaboração própria.

Figura 31. Comparação das abordagens hierárquica e integrada com a instância T24_F30.



Fonte: Elaboração própria.

A solução do MILDT reporta uma melhor solução, com destaque para o montante de ICMS a pagar que é 11% menor com a rede proposta. Assim, os resultados sugerem que a integração entre as decisões permite, de fato, avaliar maior número de decisões e elementos do problema e, portanto, fornece soluções mais robustas e eficientes para o problema todo. As decisões de localização influenciam nas decisões de transporte. Logo para resolver adequadamente o problema, decisões estratégicas e táticas devem ser analisadas simultaneamente (MOTA et al., 2017).

Quando na primeira fase da abordagem hierárquica, isto é, no modelo de localização de p -medianas são incorporadas questões tributárias associadas a ICMS, a localização dos CDs coincide com Goiânia e São Paulo. Isto sugere que uma boa estratégia para resolver o problema com uma abordagem hierárquica é considerando o ICMS para a tomada de decisões de localização, e fixar as decisões no modelo integrado, para obter as decisões táticas, em na seguinte sessão de testes adicionais será utilizada esta forma de abordagem hierárquica.

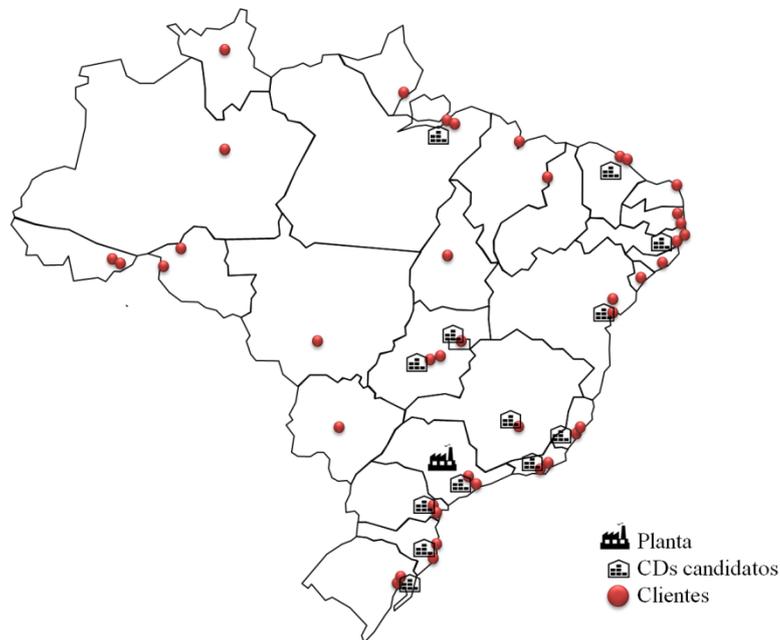
6.5 Testes adicionais

Com o intuito de examinar novas possibilidades de configuração de rede que possam ser vantajosas para a empresa em termos de custo, foi ampliado o número de locais candidatos a instalação de CDs e o número máximo de candidatos que podem ser abertos. Assim, foram consideradas 13 cidades das 5 macrorregiões administrativas do país, escolhidas por serem as capitais dos estados que apresentam maior demanda. A Tabela 17 apresenta as cidades candidatas e sua ordem no *ranking* de demanda, a Figura 32 apresenta uma superestrutura para os testes adicionais. O número máximo de CDs a serem abertos foi aumentado um a um, começando em três, até considerar no máximo cinco CDs. Estes testes foram realizados com as abordagens: hierárquica (localização considerando ICMS, e a seguir decisões táticas) e a abordagem integrada, ou seja, resolvendo o MILDT.

Tabela 17. Novos locais candidatos a instalação de CDs.

Região	Estado	Demanda	Ranking por demanda em unidades	Candidato
Norte	PA	1,2%	13	Belém
Nordeste	CE	2,8%	6	Fortaleza
	BA	2,1%	9	Salvador
	PE	2,1%	10	Recife
Centro-Oeste	GO	48,9%	1	Goiânia
	DF	7,2%	4	Brasília
Sudeste	SP	13,5%	2	São Paulo
	ES	11,4%	3	Vitória
	RJ	2,6%	7	Rio Janeiro
	MG	1,6%	11	Belo Horizonte
Sul	RS	3,2%	5	Porto Alegre
	PR	2,2%	8	Curitiba
	SC	1,2%	12	Florianópolis

Figura 32. Superestrutura da rede para testes adicionais.

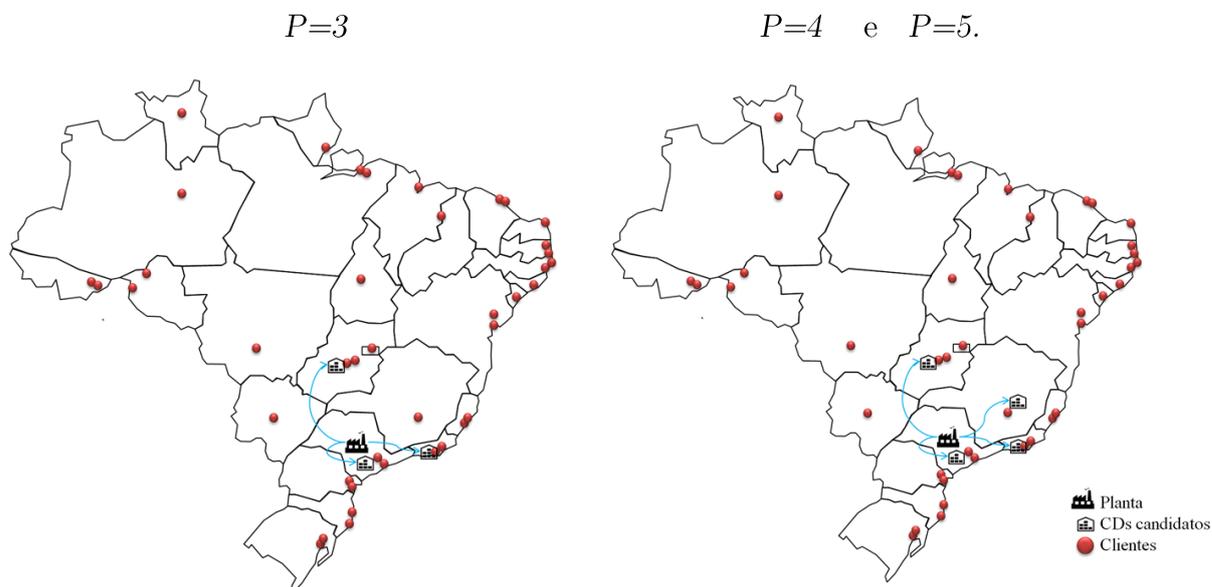


Fonte: Elaboração própria.

A abordagem hierárquica, que considera ICMS na localização, indica a abertura de, além de São Paulo e Goiânia, um terceiro CD no Rio de Janeiro (RJ) quando $P = 3$ e mais um CD em Belo Horizonte (MG) quando $P = 4$. Já com $N = 5$ se mantém a localização dos quatro CDs mencionados (São Paulo, Goiânia, Rio de Janeiro e Belo Horizonte), como o mostra a Figura 33. Estas localizações não coincidem com a ordem da Tabela 17, pois Vitória (ES) está na terceira posição, mas o local definido é no Rio de Janeiro (RJ), que ocupa a posição 7 no ranking, desconsiderando ainda Brasília (DF), cuja demanda está próxima de Goiânia, Porto Alegre (RS) e Fortaleza (CE). Além do mais, se indica a abertura de Belo Horizonte, que está na posição 11, desconsiderando Curitiba (PR), Salvador (BA) e Recife (PE). Este resultado pode ser explicado pelas alíquotas de ICMS, pois os estados RJ e MG oferecem alíquotas de ICMS mais baixas (7%) para envio de produtos para maioria dos estados brasileiros. Porto Alegre (RS) e Curitiba (PR) também oferecem alíquotas de 7% para a maioria dos estados, porém a baixa demanda dos estados da região Sul do país e a extrema

localização no território nacional dos candidatos, fazem com que o custo logístico em que se incorreria não seja compensado com o ganho fiscal.

Figura 33. Resultados da abordagem hierárquica para os testes adicionais.



Fonte: Elaboração própria.

Por sua vez, o MILDT nos diferentes testes continua localizando os mesmos dois CDs em São Paulo e Goiânia, o que indica que esta é a localização recomendada para a rede estudada.

Foi realizado um teste que simula alteração na política fiscal do Estado de Goiás, considerando a retirada do benefício fiscal. Os resultados mostram que neste contexto não seria atrativo localizar um CD em Goiânia, alterando a decisão de abertura de CDs para São Paulo e Belo Horizonte (MG). O Estado de MG, não tem uma participação importante na demanda, mas oferece alíquotas de ICMS de 7% para a maioria dos estados e está localizado na região central do país, próximo a Goiás, São Paulo e Espírito Santo, que são os maiores estados consumidores. De novo, as decisões de localização de CDs são influenciadas mais fortemente pelas alíquotas de ICMS do que pelos custos logísticos.

Com o intuito de analisar o comportamento do MILDT frente a diferentes estruturas de dados, foram geradas 20 novas instâncias de mesmo tamanho da instância F30_T24, com demandas aleatórias. Para a geração destas instâncias foi estabelecido o máximo e mínimo número de unidades demandas de cada produto por períodos de semana, respeitando as características de demanda da empresa em relação ao *mix* de produtos, famílias com baixo preço e alta demanda e outras com alto custo e baixa demanda.

Para as diferentes instâncias aleatórias a decisão foi abrir CDs em Goiânia e São Paulo, lembrando que o número de CDs a serem abertos é no máximo 2. Observa-se mais uma vez a importância do ICMS nos custos totais da rede, que corresponde de 80% a 95% dos custos totais. Assim a otimização em relação ao ICMS determina os locais a serem abertos. Com as alíquotas de ICMS atuais poucos estados são atrativos, apenas os estados São Paulo, Rio de Janeiro, Minas Gerais, Paraná, Santa Catarina, Rio Grande do Sul oferecem taxas baixas de ICMS (7% para a maioria dos estados do país).

Os estados Goiás e Pernambuco oferecem benefício fiscal em forma de crédito presumido para movimentação de produtos. Em Goiás o crédito presumido é de 5.6%, por isso o CD de Goiânia é sempre o primeiro candidato escolhido. Além disso, Goiás é o Estado com maior quantidade demandada e tem uma boa posição geográfica na macrorregião centro-oeste do país. Outras boas opções são: São Paulo (SP), Belo Horizonte (MG), Rio de Janeiro (RJ). No caso de São Paulo, além da alta demanda, a decisão de abertura também é fortemente influenciada pela localização da planta no mesmo Estado.

6.6 Conclusões do estudo de caso

Com as condições atuais de estrutura de custos, localização dos clientes e política fiscal nos diferentes estados brasileiros, a recomendação é localizar os CDs em Goiânia (GO) e São Paulo (SP). Estes estados concentram a maior demanda e permitem reduzir o montante de ICMS a pagar, São Paulo porque oferece alíquotas menores e Goiás oferece crédito presumido de 5.6%.

Caso seja possível repassar o valor do ICMS para os clientes, de forma que as receitas não sejam afetadas, ainda recomenda-se localizar os CDs em São Paulo e Goiás, por serem os estados com maior demanda. Caso a política fiscal em relação ao crédito presumido no Estado de Goiás seja alterada, não é atrativo a abertura de CD neste Estado, sendo mais recomendado localizar CDs em São Paulo e Minas Gerais. Ou seja, deve-se avaliar os incentivos e negociações a longo prazo, com cautela em relação à conhecida ‘Guerra Fiscal’. Neste sentido, a utilização do MILDT permite a avaliação de diferentes cenários para apoiar as decisões relacionadas à estrutura física da rede de distribuição.

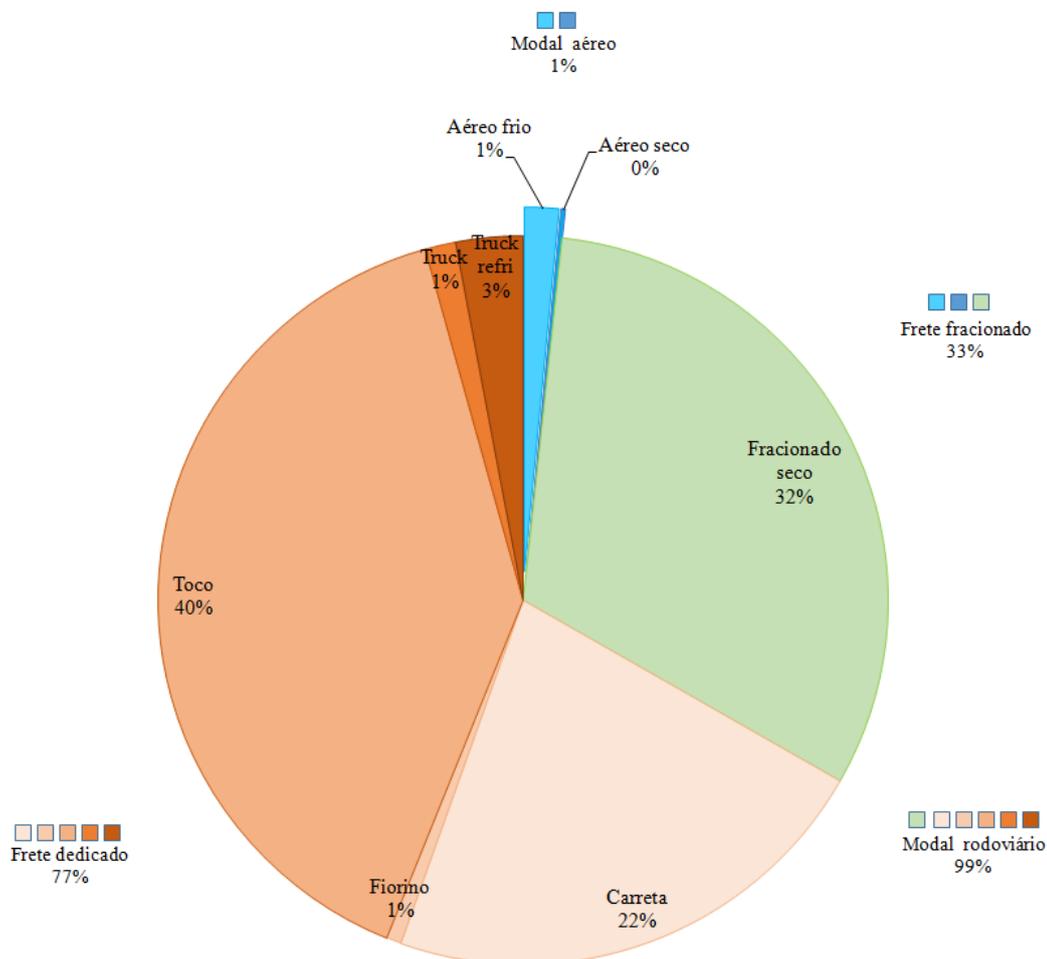
Em relação às decisões táticas do planejamento de transporte, particularmente modais e tipo de frete, a tabela 18 apresenta uma proposta para movimentar os aproximadamente 27 milhões de produtos em todo o território brasileiro, definida em porcentagens de demanda transportada por modal de transporte e tipo de frete. A Figura 34 apresenta um resumo da Tabela 18.

Tabela 18. Porcentagens de demanda transportada por modal de transporte e tipo de frete por macrorregiões administrativas.

Origem	Destino	Modal	Frete	Condição de Temperatura		Total
				Temperatura Ambiente	Cadeia Fria	
Planta São Paulo	CD Goiânia	Aéreo	Fracionado		0,27701%	0,27701%
Planta São Paulo	CD Goiânia	Rodoviário	Dedicado	3,99326%	2,05070%	6,04396%
Planta São Paulo	CD São Paulo	Rodoviário	Dedicado	73,54516%	2,14813%	75,69329%

Origem	Destino	Modal	Frete	Condição de Temperatura		Total
				Temperatura Ambiente	Cadeia Fria	
Planta São Paulo	CD Goiânia	Rodoviário	Fracionado	16,50517%		16,50517%
Planta São Paulo	CD São Paulo	Rodoviário	Fracionado	1,48057%		1,48057%
CD São Paulo	Centro-oeste	Aéreo	Fracionado	0,00699%	0,62931%	0,63630%
CD São Paulo	Nordeste	Aéreo	Fracionado	0,00038%	0,49986%	0,50023%
CD São Paulo	Norte	Aéreo	Fracionado	0,00848%	0,03057%	0,03906%
CD São Paulo	Sudeste	Aéreo	Fracionado		0,24095%	0,24095%
CD São Paulo	Sul	Aéreo	Fracionado		0,14918%	0,14918%
CD Goiânia	Centro-oeste	Aéreo	Fracionado		0,13533%	0,13533%
CD Goiânia	Nordeste	Aéreo	Fracionado	0,00002%	0,06067%	0,06070%
CD Goiânia	Norte	Aéreo	Fracionado	0,35345%	0,02638%	0,37982%
CD Goiânia	Sudeste	Aéreo	Fracionado		0,84254%	0,84254%
CD Goiânia	Sul	Aéreo	Fracionado		0,13554%	0,13554%
CD São Paulo	Centro-oeste	Rodoviário	Dedicado	38,81673%	0,52550%	39,34223%
CD São Paulo	Nordeste	Rodoviário	Dedicado	3,22357%		3,22357%
CD São Paulo	Norte	Rodoviário	Dedicado	0,07728%		0,07728%
CD São Paulo	Sudeste	Rodoviário	Dedicado	4,85996%	0,05110%	4,91106%
CD São Paulo	Sul	Rodoviário	Dedicado	1,28774%	0,02167%	1,30940%
CD Goiânia	Centro-oeste	Rodoviário	Dedicado	0,56453%	0,24050%	0,80502%
CD Goiânia	Nordeste	Rodoviário	Dedicado	0,10502%		0,10502%
CD Goiânia	Sudeste	Rodoviário	Dedicado	0,89902%	0,66238%	1,56140%
CD Goiânia	Sul	Rodoviário	Dedicado	0,15661%	0,22437%	0,38098%
CD São Paulo	Centro-oeste	Rodoviário	Fracionado	14,29464%		14,29464%
CD São Paulo	Nordeste	Rodoviário	Fracionado	4,00863%		4,00863%
CD São Paulo	Norte	Rodoviário	Fracionado	0,82818%		0,82818%
CD São Paulo	Sudeste	Rodoviário	Fracionado	5,90949%		5,90949%
CD São Paulo	Sul	Rodoviário	Fracionado	1,70366%		1,70366%
CD Goiânia	Centro-oeste	Rodoviário	Fracionado	0,06802%		0,06802%
CD Goiânia	Nordeste	Rodoviário	Fracionado	0,29308%		0,29308%
CD Goiânia	Norte	Rodoviário	Fracionado	0,47117%		0,47117%
CD Goiânia	Sudeste	Rodoviário	Fracionado	14,76107%		14,76107%
CD Goiânia	Sul	Rodoviário	Fracionado	2,82644%		2,82644%

Figura 34. Porcentagens de demanda transportada por modal de transporte e tipo de frete



Recomenda-se que produtos refrigerados com elevado preço e/ou demanda por cliente baixa em cada semana sejam transportados por modal aéreo. Também é recomendada a negociação de entrega antecipada (estoque em consignação) para clientes em regiões mais distantes dos CDs, para aproveitar a capacidade dos veículos dedicados em todas as viagens.

7 CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS

Este estudo aborda o problema de planejamento da rede de distribuição de medicamentos. Primeiramente, foi proposto um modelo de programação linear inteira mista, para integrar decisões estratégicas de localização e decisões táticas de dimensionamento de estoque, demanda não atendida, fluxos entre facilidades, número de viagens, seleção de modais de transporte e tipos de carga, em um contexto multiperíodo e multiproduto. Este modelo, denominado MILDT, considera características particulares da logística farmacêutica, como armazenamento e transporte de produtos em cadeia fria e medidas de segurança da carga transportada e questões tributárias que incidem sobre as operações logísticas brasileiras, o ICMS e o benefício fiscal chamado crédito presumido de ICMS. O modelo foi testado com dados reais, levantados em um estudo de caso de uma multinacional da indústria farmacêutica, que possui operações de produção e distribuição no Brasil.

A empresa tem um amplo portfólio de produtos com diferentes características, sendo necessária a agregação dos produtos em famílias para conseguir resolver o problema eficientemente. Assim, para testar o impacto da agregação dos produtos em família sobre a representatividade e tratabilidade do problema, foi realizada a agregação de produtos em diferentes números de famílias usando técnica de agrupamento de dados *K-means*. Por outro lado, dado que se consideram decisões estratégicas e táticas é necessário fazer uma escolha adequada do grau de agregação da demanda no horizonte de planejamento, já que pode impactar as decisões do problema. Assim, foi analisada a divisão do horizonte de planejamento em períodos de tempo de diferente extensão (semestre, meses e semanas). Foi proposto um plano de experimentos combinando ambas as questões, agrupamento de produtos em famílias e agregação da demanda no horizonte de planejamento.

Os resultados mostraram que a agregação de dados tem pouco impacto na decisão de localização para a rede logística estudada. Para todas as instâncias testadas, os locais para abertura de CDs foram os mesmos. No entanto, o plano de transporte muda significativamente com as diferentes formas de agrupamento dos dados. Baseados nestes testes, definiu-se os dados de demanda agrupados em semanas e os produtos agrupados em 30 famílias que representam adequadamente o problema. Porém, a solução da instância com 30 famílias e 24 semanas implica em maior complexidade para resolução computacional. Neste sentido, foi proposta uma estratégia de solução, denominada Abordagem de Construção de uma Solução Inicial (ACSI), que consiste em resolver um modelo relaxado para estabelecer uma solução inicial melhor para o problema, reduzindo assim o tempo para encontrar soluções de boa qualidade.

Na solução do modelo matemático, destaca-se a importante participação do ICMS no custo total da rede, ao ponto que a otimização da rede é dominada pela otimização dos fluxos de produtos para reduzir o custo de ICMS a pagar. De forma que as empresas do setor farmacêutico, e em geral todas as empresas que realizam distribuição de produtos no Brasil, devem-se manter atentas à política fiscal dos estados, porque esta tem potencial de impactar significativamente os custos da rede.

A integração das decisões de localização e transporte através do MILDT foi comparada com uma abordagem hierárquica, que consistiu em resolver o problema em duas fases, primeiro a localização dos CDs e, a seguir, resolver o modelo fixando os locais selecionados. O MILDT apresenta melhores resultados, em termos de custo logístico e montante de ICMS a pagar, mesmo quando o ICMS (que domina a solução) é considerado na primeira fase desta abordagem hierárquica. Por outro lado, a rede proposta em comparação com a estrutura física atual da rede logística do estudo de caso mostra que é possível reduzir o custo total, alterando a malha logística atual. De forma geral, o modelo proposto mostrou-se como uma ferramenta apropriada para auxiliar nas decisões no planejamento da rede de distribuição farmacêutica.

Diferente dos trabalhos encontrados na literatura, o modelo proposto neste trabalho considera o problema de distribuição de produtos com diferentes características, particularmente produtos que requerem armazenamento e transporte em cadeia fria. Adicionalmente, o modelo considera diferenças entre produtos, aqueles que podem ter entrega antecipada ou mesmo que possam ser entregues com atraso, o que é importante para o gerenciamento de nível de serviço. Também são consideradas diferentes alternativas de transporte diferenciadas por tipos de frete, dedicado e fracionado.

Uma proposta futura é abordar o problema em um nível tático e operacional, detalhando as decisões de transporte e incorporando questões como tempos de viagem de cada alternativa de transporte, tempos de atendimento da demanda, penalização (em forma de redução do valor da nota fiscal) por não cumprimento das datas de entrega. Estes pontos foram levantados durante o estudo de caso, porém não foram abordados no escopo deste trabalho, que abordou o planejamento estratégico-tático. Ainda, a formulação matemática proposta considera a demanda dos clientes por produtos, uma proposta futura é reformular o modelo matemático para considerar a demanda por pedido. Também podem ser tratadas questões de políticas de estoque. Em geral, a incorporação de decisões mais operacionais implica em um maior número de variáveis e restrições, resultando em modelos mais difíceis de resolver em tempo computacional razoável, o que estimula o estudo de métodos de solução apropriados.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AHMADI-JAVID, A.; HOSEINPOUR, P. Incorporating location, inventory and price decisions into a supply chain distribution network design problem. *Computers and Operations Research*, v. 56, p. 110–119, 2015.
- AHMADI-JAVID, A.; SEDDIGHI, A. H. A location-routing-inventory model for designing multisource distribution networks. *Engineering Optimization*, v. 44, n. 6, p. 637–656, 2012.
- AHMADI, G.; TORABI, S. A.; TAVAKKOLI-MOGHADDAM, R. A bi-objective location-inventory model with capacitated transportation and lateral transshipments. *International Journal of Production Research*, v. 54, n. 7, p. 2035–2056, 2016.
- AMARO, A.; PÓVOA, A. P. B. Planning and scheduling of industrial supply chains with reverse flows: A real pharmaceutical case study. *Computers and Chemical Engineering*, v. 32, n. 11, p. 2606–2625, nov. 2008.
- AGENCIA NACIONAL DE VIGILANCIA SANITARIA - ANVISA. Resolução da diretoria colegiada. RDC N° 44 de 2009. 2009.
- ARABZAD, S. M.; GHORBANI, M.; TAVAKKOLI-MOGHADDAM, R. An evolutionary algorithm for a new multi-objective location-inventory model in a distribution network with transportation modes and third-party logistics providers. *International Journal of Production Research*, v. 53, n. 4, p. 1038–1050, 2014.
- AVITTATHUR, B.; SHAH, J.; GUPTA, O. K. Distribution centre location modelling for differential sales tax structure. *European Journal of Operational Research*, v. 162, n. 1, p. 191–205, 2005.
- BADRI, H.; BASHIRI, M.; HOSSEIN, T. Integrated strategic and tactical planning in a supply chain network design with a heuristic solution method. *Computers and Operations Research*, v. 40, n. 4, p. 1143–1154, 2013.
- BALAJI, K.; VISWANADHAM, N. A Tax Integrated Approach for Global Supply Chain Network Planning. *IEEE Transactions on Automation Science & Engineering*, v. 5, n. 4, p. 587–596, 2008.
- BALLOU, R. H.; MASTERS, J. M. Commercial Software for Locating Warehouses and Other Facilities. *Journal of Business Logistics*, v. 14, n. 2, p. 71–108, 1993.
- BASHIRI, M.; BADRI, H.; TALEBI, J. A new approach to tactical and strategic planning in production – distribution networks. *Applied Mathematical Modelling*, v. 36, n. 4, p. 1703–1717, 2012.
- BASSETT, M.; GARDNER, L. Designing optimal global supply chains at Dow AgroSciences. *Annals of Operations Research*, v. 203, p. 187–216, 2013.
- BERNARDO, F. A.; LEITE, L. S. B. D. S. Formulação inteira Mista para o problema de redes de distribuição considerando ICMS. In: CONGRESSO LATINO-IBEROAMERICANO DE INVESTIGACIÓN OPERATIVA - SIMPÓSIO BRASILEIRO DE PESQUISA OPERACIONAL, 2012, Rio de Janeiro. Anais, Sociedade Brasileira de Pesquisa Operacional,

2012. p. 562–571.

BERTRAND, J. W. M.; FRANSOO, J. C. Operations management research methodologies using quantitative modeling. *International Journal of Operations & Production Management*, v. 22, n. 2, p. 241–264, 2002.

BRAHIMI, N.; KHAN, S. A. Warehouse location with production, inventory, and distribution decisions: a case study in the lube oil. *Journal of the Operational Research Society*, v. 12, n. 2, p. 175–197, 2014.

BRASIL, Conselho Federal de Farmácia. Resolução n. 357 de 20 de abril de 2001. Aprova o regulamento técnico das Boas Práticas de Farmácia. Brasília: Diário Oficial da União 27 (2001).

BRASIL, Ministério da Saúde. Secretaria de Vigilância Sanitária. Portaria n.802 de 8 de outubro de 1998.

BRASIL, Presidência da República. Lei Complementar 87 de 1996, art.87, 1996.

CANDAS, M. F.; KUTANOGLU, E. Benefits of considering inventory in service parts logistics network design problems with time-based service constraints. *IIE Transactions*, v. 39, n. 2, p. 159–176, 2007.

CARRARO, P. R.; YOSHIKAZI, H. T. Y. Avaliação da influência de aspectos logísticos, fiscais e ambientais no projeto de redes de distribuição física. In: ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, 2009, Salvador. Anais, Associação Brasileira de Engenharia de Produção, 2009. p. 1 – 14.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DE TRANSPORTE. Rodoviário. Disponível em: <<http://www.cnt.org.br/Modal/modal-rodoviario-cnt>>.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE. Pesquisa CNT de rodovias 2016: Relatório gerencial. v. 1, p. 399, 2016a.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE. Agência CNT de Notícias. Roubo de cargas cresce 10% no Brasil, 2016. Disponível em: <<http://www.cnt.org.br/Imprensa/Noticia/roubo-de-cargas-cresce-10-no-brasil-cnt>>. Acesso em: 07 abr. 2017.

CORRÊA, G. B.; AGUIAR, M. M. G. Distribuição e transporte de medicamentos. *Revista do Centro Universitário Newton Paiva*, v. 2, p. 210–216, 2012.

DA SILVA, M. B. Otimização de redes de distribuição física considerando incentivo fiscal baseado no crédito presumido de ICMS. 2007. 115 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Departamento de Engenharia de Transportes, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.

DASKIN, M. S. Network and discrete location: Models and applications. 1. ed. John Wiley & Sons. New York: 1995.

DE LA VEGA, D. S. et al. A decision on the truckload and less-than-truckload problem: An approach based on MCDA. *International Journal of Production Economics*, 2017.

- MELO, Vinicius Veloso de. Clustering de artigos científicos em uma ferramenta inteligente de apoio à pesquisa. Tesis Doctoral. Universidade de São Paulo, 2005.
- DIABAT, A.; BATAÏA, O.; NAZZAL, D. An improved Lagrangian relaxation-based heuristic for a joint location-inventory problem. *Computers and Operations Research*, v. 61, p. 170–178, 2015.
- DIABAT, A.; THEODOROU, E. A location – inventory supply chain problem : Reformulation and piecewise linearization. *Computers & Industrial Engineering*, v. 90, p. 381–389, 2015.
- ENCIMA, G. D. S. L. Avaliação da qualidade no transporte de medicamentos no Brasil. 2012. 27f. Trabalho de Conclusão de Curso (Especialização em Tecnologias Industriais Farmacêuticas)- Instituto De Tecnologia Em Fármacos, Farmanguinhos, Rio de Janeiro, 2012.
- ESCALONA, P.; ORDÓÑEZ, F.; MARIANOV, V. Joint location-inventory problem with differentiated service levels using critical level policy. *Transportation Research Part E*, v. 83, p. 141–157, 2015.
- FARAHANI, R. Z. et al. Location-inventory problem in supply chains: a modelling review. *International Journal of Production Research*, v. 53, n. 12, p. 3769–3788, 2014.
- FATTAHI, M.; MAHOOTCHI, M.; HUSSEINI, S. M. Integrated strategic and tactical supply chain planning with price-sensitive demands. *Annals of Operations Research*, v. 242, n. 2, p. 423–456, 2016.
- FLEISCHMANN, B.; MEYR, H. Supply Chain Management: Design, Coordination and Operation. In: Handbooks in Operations Research and Management Science. Amsterdam: Elsevier. v. 11p. 455–523.
- GEBENNINI, E.; GAMBERINI, R.; MANZINI, R. An integrated production– distribution model for the dynamic location and allocation problem with safety stock optimization. *International Journal of Production Economics*, v. 122, n. 1, p. 286–304, 2009.
- GHEZAVATI, V. R.; MAKUI, A. A new heuristic method for distribution networks considering service level constraint and coverage radius. *Expert Systems With Applications*, v. 36, n. 3, p. 5620–5629, 2009.
- GIL, A. C. Como elaborar projetos de pesquisa. 3. ed. São Paulo: Editora Atlas S.A., 2002. v. 3.
- GOVERNO DO ESTADO DE SÃO PAULO, SECRETARIA DE FAZENDA DO ESTADO DE SÃO PAULO. Sobre o ICMS. Disponível em: <<http://portal.fazenda.sp.gov.br/servicos/isencao-icms-veiculos/Paginas/Sobre.aspx>>. Acesso em: 07 abr. 2017.
- GRACIANI, F. S.; FERREIRA, G. B. V. Descarte de medicamentos: Panorama da logística reversa no Brasil. *Espacios*, v. 35, n. 5, p. 14, 2014.
- GZARA, F.; NEMATOLLAHI, E.; DASCI, A. Linear location-inventory models for service parts logistics network. *Computers & Industrial Engineering*, v. 69, p. 53–63, 2014.
- HAMMAMI, R.; FREIN, Y. Redesign of global supply chains with integration of transfer pricing: Mathematical modeling and managerial insights. *International Journal of Production*

Economics, v. 158, p. 267–277, 2014.

HIRATUKA, C., VARGAS, M., FRACALANZA, P., ROSADISNKI, E., CORAZZA, R., OLIVEIRA, A., & LUNA, I. Logística reversa para o setor de medicamentos. Brasília: ABDI, 2013.

INTERFARMA, Associação Da Indústria Farmacêutica De Pesquisa. Guia Interfarma 2016. Disponível em: <https://www.interfarma.org.br/guia/guia_2016/dados_de_mercado>. Acesso em: 19 nov. 2016.

JAIN, A. K. Data clustering: 50 years beyond K-means. *Pattern Recognition Letters*, v. 31, p. 651–666, 2010.

JEET, V.; KUTANOGLU, E.; PARTANI, A. Logistics Network Design with Inventory Stocking for Low-Demand Parts. *IIE Transactions*, v. 41, p. 389–407, 2009.

JUNQUEIRA, D. E. Á. R.; MORABITO, R. Um modelo de otimização linear para o planejamento agregado da produção e logística de sementes de milho. *Production*, v. 16, n. 3, p. 510–525, 2006.

KAYA, O.; UREK, B. A mixed integer nonlinear programming model and heuristic solutions for location, inventory and pricing decisions in a closed loop supply chain. *Computers and Operations Research*, v. 65, p. 93–103, 2016.

KODINARIYA, T. M.; MAKWANA, P. R. Review on determining number of Cluster in K-Means Clustering. *International Journal of Advance Research in Computer Science Management Studies*, v. 1, n. 6, p. 90–95, 2013.

LEVIS, A. A.; PAPAGEORGIU, L. G. A hierarchical solution approach for multi-site capacity planning under uncertainty in the pharmaceutical industry. *Computers and Chemical Engineering*, v. 28, n. 5, p. 707–725, 2004.

LIAO, S.; HSIEH, C.; LAI, P. An evolutionary approach for multi-objective optimization of the integrated location – inventory distribution network problem in vendor-managed inventory. *Expert Systems With Applications*, v. 38, p. 6768–6776, 2011.

LINDEN, R. Técnicas de Agrupamento. *Revista de Sistemas de Informação da FSMA*, v. 4, p. 18–36, 2009.

MANATKAR, R. P. et al. An integrated inventory optimization model for facility location-allocation problem. *International Journal of production research*, p. 1–19, 2015.

MEDEIROS, M. S.; MOREIRA, L. M. F.; LOPES, C. C. G. O. Descarte de medicamentos: programas de recolhimento e novos desafios. *Revista de Ciências Farmacêuticas Básica e Aplicada*, v. 35, n. 4, p. 651–662, 2014.

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.

MIRANDA, P. A.; GARRIDO, R. A. Inventory service-level optimization within distribution network design problem. *International Journal of Production Economics*, v. 122, p. 276–285, 2009.

- MIRANDA, P.; GARRIDO, R. Incorporating inventory control decisions into a strategic distribution network design model with stochastic demand. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, v. 40, n. 3, p. 183–207, 2004.
- MORABITO, R.; PUREZA, V. *Modelagem e simulação*. In: Metodologia de pesquisa em engenharia de produção e gestão de operações. 2 edição ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2012. p. 165–194.
- MOTA, B. et al. Sustainable supply chains: An integrated modeling approach under uncertainty. *Omega*, p. 1–45, 2017.
- MOUSAVI, S. et al. Optimizing a location allocation-inventory problem in a two-echelon supply chain network: A modified fruit fly optimization algorithm. *Computers & Industrial Engineering*, v. 87, p. 543–560, 2015.
- MOUSAZADEH, M.; TORABI, S. A.; ZAHIRI, B. A robust possibilistic programming approach for pharmaceutical supply chain network design. *Computers and Chemical Engineering*, v. 82, p. 115–128, 2015.
- PANTALENA, B. G. Otimização da malha logística de uma indústria química. 2004. 184 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Formatura em Engenharia de Produção) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2004.
- PARK, S.; LEE, T.; SUNG, C. S. A three-level supply chain network design model with risk-pooling and lead times. *Transportation Research Part E*, v. 46, p. 563–581, 2010.
- SADJADY, H.; DAVOUDPOUR, H. Two-echelon, multi-commodity supply chain network design with mode selection, lead-times and inventory costs. *Computers and Operations Research*, v. 39, n. 7, p. 1345–1354, 2012.
- SAIF, A.; ELHEDHLI, S. Cold supply chain design with environmental considerations: A simulation-optimization approach. *European Journal Industrial Engineering*, v. 251, n. 1, p. 274–287, 2016.
- SALEMA, M. I. G.; BARBOSA-POVOA, A. P.; NOVAIS, A. Q. Simultaneous design and planning of supply chains with reverse flows: A generic modelling framework. *European Journal of Operational Research*, v. 203, n. 2, p. 336–349, 2010.
- SALEMA, M. I. G.; PÓVOA, A. P. B.; NOVAIS, A. Q. A strategic and tactical model for closed-loop supply chains. *OR Spectrum*, v. 31, n. 3, p. 573–599, 2009.
- SHAH, N. Pharmaceutical supply chains: Key issues and strategies for optimisation. *Computers and Chemical Engineering*, v. 28, n. 6–7, p. 929–941, 2004.
- SHAHABI, M. et al. Integrated Inventory Control and Facility Location Decisions in a Multi-Echelon Supply Chain Network with Hubs. *Networks and Spatial Economics*, 2013.
- SHEN, Z. J.-M.; QI, L. Incorporating inventory and routing costs in strategic location models. *European Journal of Operational Research*, v. 179, n. 2, p. 372–389, 2007.
- SHU, J.; MA, Q.; LI, S. Integrated location and two-echelon inventory network design under uncertainty. *Annals of Operations Research*, v. 181, n. 1, p. 233–247, 2010.
- SHU, J.; WANG, G.; ZHANG, K. Logistics distribution network design with two commodity

- categories. *Journal of the Operational Research Society*, v. 64, n. 9, p. 1400–1408, 2013.
- SHU, J.; WU, T.; ZHANG, K. Warehouse location and two-echelon inventory management with concave operating cost. *International Journal of Production Research*, 2014.
- SOUSA, R. R. T.; SHAH, N.; PAPAGEORGIOU, L. L. G. Global supply chain network optimisation for pharmaceuticals. *European Symposium on Computer Aided Process Engineering*, p. 1189–1194, 2005.
- SOUSA, R.; SHAH, N.; PAPAGEORGIOU, L. G. Supply chain design and multilevel planning-An industrial case. *Computers and Chemical Engineering*, v. 32, p. 2643–2663, 2008.
- SOUSA, R. T. et al. Global supply chain planning for pharmaceuticals. *Chemical Engineering Research and Design*, v. 89, n. 11, p. 2396–2409, 2011.
- SUSARLA, N.; KARIMI, I. A. Integrated supply chain planning for multinational pharmaceutical enterprises. *Computers and Chemical Engineering*, v. 42, p. 168–177, 2012.
- TIWARI, M. K. et al. A Hybrid Taguchi – Immune approach to optimize an integrated supply chain design problem with multiple shipping. *European Journal of Operational Research*, v. 203, n. 1, p. 95–106, 2010.
- UTHAYAKUMAR, R.; PRIYAN, S. Pharmaceutical supply chain and inventory management strategies: Optimization for a pharmaceutical company and a hospital. *Operations Research for Health Care*, v. 2, n. 3, p. 52–64, 2013.
- YAO, Z. et al. Multi-source facility location – allocation and inventory problem. *European Journal of Operational Research*, v. 207, p. 750–762, 2010.
- YIN, R. K. Case Study: planning and methods. 2. ed. Porto Alegre: Bookman: Sage Publications, Inc. Armed Editora Ltda., 2001.
- ZADEH, A. S.; SAHRAEIAN, R.; HOMAYOUNI, S. M. A dynamic multi-commodity inventory and facility location problem in steel supply chain network design. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, p. 1267–1282, 2014.
- ZHANG, L. L.; LEE, C.; ZHANG, S. An integrated model for strategic supply chain design: Formulation and ABC-based solution approach. *Expert Systems With Applications*, v. 52, p. 39–49, 2016.

APÊNDICE A. Modelos matemáticos propostos

Modelo integrado de localização e distribuição (MILD)

$$\begin{aligned}
\min \bar{Z} = & \sum_{j \in J} o_j Y_j + \varphi W + \sum_{t \in T} \sum_{j \in J} \sum_{p \in P} h_{pj} I_{pjt} \\
& + \sum_{t \in T} \sum_{k \in K} \left[\sum_{p \in P_\Delta} r_{pk}^A A_{pkt} + \sum_{p \in P_\Delta} r_{pk}^B B_{pkt} + \sum_{p \in P \setminus P_\Delta} r_{kp}^U U_{pkt} \right] \\
& + \sum_{t \in T} \sum_{p \in P} \sum_{l \in L_{LTL}} \left[\sum_{i \in I} \sum_{j \in J} c_{ijl} \omega_p X_{pijlt} + \sum_{j \in J} \sum_{k \in K} c'_{jkl} \omega_p X'_{pjkl} \right] \\
& + \sum_{t \in T} \sum_{l \in L_{FTL}} \left[\sum_{i \in I} \sum_{j \in J} c_{ijl} Z_{ijlt} + \sum_{j \in J} \sum_{k \in K} c'_{jkl} Z'_{jkl} \right] \\
& + \sum_{t \in T} \sum_{l \in L_{FTL}} \left[\sum_{i \in I} \sum_{j \in J} G_{ijlt} + \sum_{j \in J} \sum_{k \in K} G'_{jkl} \right]
\end{aligned}$$

Sujeito às restrições:

(A1)

$$\sum_{i \in I} \sum_{l \in L} X'_{pjkl} + A_{pk(t-1)} - B_{pk(t-1)} = d_{pkt} + A_{pkt} - B_{pkt}, \quad p \in P_\Delta, k \in K, t \in T \quad (A2)$$

$$\sum_{i \in I} \sum_{l \in L} X'_{pjkl} + U_{pkt} = d_{pkt}, \quad p \in P \setminus P_\Delta, k \in K, t \in T \quad (A3)$$

$$\sum_{i \in I} \sum_{l \in L} X_{pijlt} + I_{pj(t-1)} = \sum_{k \in K} \sum_{l \in L} X'_{pjkl} + I_{pj}, \quad j \in J, p \in P, t \in T \quad (A4)$$

$$\sum_{i \in I} \sum_{p \in P} \sum_{l \in L} \sum_{t \in T} X_{pijlt} \leq MY_j, \quad j \in J \quad (A5)$$

$$\sum_{j \in J} Y_j \leq N, \quad (A6)$$

$$|J| W \geq \sum_{j \in J} Y_j - 1 \quad (A7)$$

$$\sum_{p \in P_l} v_p X_{pijlt} \leq q_l Z_{ijlt}, \quad i \in I, j \in J, l \in L_{FTL}, t \in T \quad (A8)$$

$$\sum_{p \in P_l} v_p X'_{pjkl} \leq q_l Z'_{jkl}, \quad j \in J, k \in K, l \in L_{FTL}, t \in T \quad (A9)$$

$$\sum_{p \in P_l} \rho_p X_{pijlt} \leq \gamma_l Z_{ijlt}, \quad i \in I, j \in J, l \in L_{FTL}, t \in T \quad (A10)$$

$$\sum_{p \in P_l} \rho_p X'_{pjkl} \leq \gamma_l Z'_{jkl}, \quad j \in J, k \in K, l \in L_{FTL}, t \in T \quad (A11)$$

$$\sum_{p \in P_l} \rho_p X_{pijlt} - \sigma Z_{ijlt} \leq ME_{ijlt}, \quad i \in I, j \in J, l \in L_{FTL}, t \in T \quad (A12)$$

$$\sum_{p \in P_l} \rho_p X'_{pjkl} - \sigma Z'_{jkl} \leq ME'_{jkl}, \quad j \in J, k \in K, l \in L_{FTL}, t \in T \quad (A13)$$

$$E_{ijlt} \leq Z_{ijlt}, \quad i \in I, j \in J, l \in L_{FTL}, t \in T \quad (A14)$$

$$E'_{jkl t} \leq Z'_{jkl t}, \quad j \in J, k \in K, l \in L_{FTL}, t \in T \quad (\text{A15})$$

$$G_{ijlt} \geq \varepsilon_{ij} Z_{ijlt} - (1 - E_{ijlt})M, \quad i \in I, j \in J, l \in L_{FTL}, t \in T \quad (\text{A16})$$

$$G'_{jkl t} \geq \varepsilon_{jk} Z'_{jkl t} - (1 - E'_{jkl t})M, \quad j \in J, k \in K, l \in L_{FTL}, t \in T \quad (\text{A17})$$

$$\sum_{p \in P_l} \rho_p X_{pijlt} \leq \gamma_l, \quad \forall i \in I, j \in J, l \in L_{LTL}, t \in T \quad (\text{A18})$$

$$\sum_{p \in P_l} \rho_p X'_{pjkl t} \leq \gamma_l, \quad \forall j \in J, k \in K, l \in L_{LTL}, t \in T \quad (\text{A19})$$

$$Y_j, W, E_{ijlt}, E'_{jkl t} \in \{0, 1\}, \quad i \in I, j \in J, k \in K, p \in P, l \in L_{FTL}, t \in T \quad (\text{A20})$$

$$Z_{ijlt}, Z'_{jkl t} \in Z^+, \quad i \in I, j \in J, k \in K, p \in P, l \in L_{FTL}, t \in T \quad (\text{A21})$$

$$X_{pijlt}, X'_{pjkl t}, A_{pkt}, B_{pkt}, U_{kpt}, I_{jpt} \geq 0, \quad i \in I, j \in J, k \in K, p \in P, l \in L, t \in T \quad (\text{A22})$$

$$G_{ijlt}, G'_{jkl t} \geq 0, \quad i \in I, j \in J, k \in K, l \in L, t \in T \quad (\text{A23})$$

Modelo integrado de localização e distribuição considerando tributação, especificamente ICMS e benefícios fiscais por crédito presumido (MILDT).

$$\begin{aligned} \min \bar{Z} = & \sum_{j \in J} o_j Y_j + \varphi W + \sum_{t \in T} \sum_{j \in J} \sum_{p \in P} h_{pj} I_{pjt} \\ & + \sum_{t \in T} \sum_{k \in K} \left[\sum_{p \in P_\Delta} r_{pk}^A A_{pkt} + \sum_{p \in P_\Delta} r_{pk}^B B_{pkt} + \sum_{p \in P \setminus P_\Delta} r_{kp}^U U_{pkt} \right] \\ & + \sum_{t \in T} \sum_{p \in P} \sum_{l \in L_{LTL}} \left[\sum_{i \in I} \sum_{j \in J} c_{ijl} \omega_p X_{pijlt} + \sum_{j \in J} \sum_{k \in K} c'_{jkl} \omega_p X'_{pjkl t} \right] \\ & + \sum_{t \in T} \sum_{l \in L_{FTL}} \left[\sum_{i \in I} \sum_{j \in J} c_{ijl} Z_{ijlt} + \sum_{j \in J} \sum_{k \in K} c'_{jkl} Z'_{jkl t} \right] \\ & + \sum_{t \in T} \sum_{l \in L_{FTL}} \left[\sum_{i \in I} \sum_{j \in J} G_{ijlt} + \sum_{j \in J} \sum_{k \in K} G'_{jkl t} \right] \\ & + \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \sum_{p \in P} \sum_{l \in L} \sum_{t \in T} \left(\frac{\theta_p X_{pijlt}}{1 - \alpha_{ij}} - \frac{\theta_p X_{pijlt}}{1 - \delta} \right) + \sum_{j \in J} Q_j^+ + \sum_{j \in J} Q_j^- \end{aligned}$$

Sujeito a: às restrições (A2) –(A23).

(A24)

$$\sum_{p \in P} \sum_{l \in L} \sum_{t \in T} \left[\sum_{k \in K} \left(\frac{\rho_p X'_{pjkl t}}{1 - \alpha'_{jk}} - \frac{\rho_p X'_{pjkl t}}{1 - \beta_j} \right) - \sum_{i \in I} \left(\frac{\theta_p X_{pijlt}}{1 - \alpha_{ij}} - \frac{\theta_p X_{pijlt}}{1 - \delta} \right) \right] \leq Q_j^+, \quad \forall j \in J \quad (\text{A25})$$

$$\sum_{p \in P} \sum_{l \in L} \sum_{t \in T} \left[\sum_{i \in I} \left(\frac{\theta_p X_{pijlt}}{1 - \alpha_{ij}} - \frac{\theta_p X_{pijlt}}{1 - \delta} \right) - \sum_{k \in K} \left(\frac{\rho_p X'_{pjkl t}}{1 - \alpha'_{jk}} - \frac{\rho_p X'_{pjkl t}}{1 - \beta_j} \right) \right] \leq Q_j^-, \quad \forall j \in J \quad (\text{A26})$$

$$Q_j^+, Q_j^- \geq 0, \quad i \in I, j \in J, k \in K, l \in L, t \in T \quad (\text{A27})$$

APÊNDICE B. Dados da rede de distribuição de medicamentos

Descrição da instância de tamanho real

- Planta: São Paulo.
- CDs: São Paulo, Recife, Salvador, Goiânia e Vitoria.
- Clientes: 36 clientes entre capital e interior de cada estado brasileiro.
- Períodos: 1 semestres, 6 meses e 24 semanas.

Parâmetros

- Demanda
- Custos de localização
- Custos de estoque
- Custos de transporte
- Custo de Escolta
- Capacidade dos veículos
- Distâncias
- Alíquotas de ICMS
- Alíquotas de crédito presumido

Os dados dos parâmetros encontram-se no site:

<https://aurajalal0808ufscar.wordpress.com/>

APÊNDICE C. Descrição dos métodos empregados para agregação dos produtos em famílias

Procedimento de agregação de dados.

Entrada: 252 produtos e suas respectivas características de peso, volume, preço e demanda, que correspondem a variáveis quantitativas contínuas; e condição de temperatura, característica qualitativa nominal.

- 1: Usar a condição de temperatura para separar os produtos em duas grandes categorias: produtos refrigerados e não refrigerados, e para cada categoria faça:
- 2: Analisar as características de todos os produtos e identificar valores atípicos
 →16 produtos em total.
- 3: Separar produtos com valores atípicos de cada categoria.
- 4: Agrupar os produtos restantes em intervalos de classes, para cada categoria faça:
 - Calcular a amplitude dos dados para cada característica:
 valor máximo – valor mínimo;
 - Calcular a quantidade de intervalos aplicando a fórmula de *Sturges*:
 $k = 1 + 3,332 \log(n)$, onde k é número de classes e n é o tamanho da amostra,
 →9 classes.
 - Calcular a amplitude de cada classe.
 amplitude dos dados / número de classes
 - Construir os intervalos das classes, iniciando pelo mínimo valor de cada característica, que representa o extremo inferior do primeiro intervalo. Soma-se a este valor a amplitude para obter o extremo superior. O extremo superior da primeira classe coincide com o extremo inferior da seguinte, e o procedimento continua até alcançar a última classe, cujo limite superior coincide com o máximo valor para cada característica.
 - Alocar cada produto em uma das classes segundo seu valor de peso, volume, preço e demanda.
 - Realizar todas as possíveis combinações entre as classes de diferentes características, que serão as famílias → 32 famílias de produtos.
- 5: Analisar dados retirados, se existe semelhanças de características entre eles, agrupar
 →10 famílias.
- 6: Calcular o valor de cada característica para cada família, faça:
 - (Valor da característica do produto * Número de unidades vendidas do produto Y)
 / demanda total de produtos pertencentes à família.

Saída: 42 famílias, ou seja, $|P| = 42$. Veja-se Apêndice D, tabela 23.

APÊNDICE D. Agregação dos produtos em famílias

Tabela 19. Agregação de produtos em 2 famílias

FAMILÍA	PREÇO (\$)	VOLUME (cm ³)	PESO (DG)	CONDIÇÃO DE TEMPERATURA	ATRASO/ ADIANTO
1	40	164	293	Temp. ambiente	SIM
2	691	64	305	Cadeia fria	NÃO

* Esta agregação resultou do uso da separação por condição de temperatura.

Tabela 20. Agregação de produtos em 15 famílias

FAMILÍA	PREÇO (\$)	VOLUME (cm ³)	PESO (dg)	CONDIÇÃO DE TEMPERATURA	ATRASO/ ADIANTO
1	2	83	160	Temp. ambiente	SIM
2	41	166	261	Temp. ambiente	SIM
3	132	234	351	Temp. ambiente	SIM
4	0	120	200	Temp. ambiente	SIM
5	2.393	236	542	Temp. ambiente	SIM
6	11.618	211	407	Temp. ambiente	SIM
7	548	2.058	10.400	Temp. ambiente	NÃO
8	1.238	7.500	10.000	Temp. ambiente	SIM
9	880	7.567	24.500	Temp. ambiente	SIM
10	1.872	15.815	43.167	Temp. ambiente	SIM
11	111	61	100	Cadeia fria	SIM
12	1.612	21	450	Cadeia fria	SIM
13	419	189	617	Cadeia fria	SIM
14	4.193	1	950	Cadeia fria	SIM
15	7.447	3.776	12.000	Cadeia fria	NÃO

* Esta agregação resultou do uso do método *K-means*.

Tabela 21. Agregação de produtos em 20 famílias

FAMILÍA	PREÇO (\$)	VOLUME (cm ³)	PESO (dg)	CONDIÇÃO DE TEMPERATURA	ATRASO/ ADIANTO
1	37	151	246	Temp. ambiente	SIM
2	99	210	334	Temp. ambiente	SIM
3	0	93	200	Temp. ambiente	SIM
4	1.379	272	604	Temp. ambiente	SIM
5	13.785	204	410	Temp. ambiente	NÃO
6	4.747	226	412	Temp. ambiente	SIM
7	901	3.520	1.300	Temp. ambiente	SIM
8	86	864	9.300	Temp. ambiente	SIM
9	1.238	7.500	10.000	Temp. ambiente	SIM
10	1.241	3.850	12.050	Temp. ambiente	SIM
11	880	7.567	24.500	Temp. ambiente	SIM
12	1.872	15.815	43.167	Temp. ambiente	SIM
13	111	61	100	Cadeia fria	SIM
14	125	31	235	Cadeia fria	SIM
15	4.587	1	880	Cadeia fria	SIM
16	419	189	617	Cadeia fria	SIM
17	5.585	1	900	Cadeia fria	NÃO
18	2.801	1	1.000	Cadeia fria	SIM
19	5.627	3.776	12.000	Cadeia fria	NÃO
20	9.267	3.776	12.000	Cadeia fria	NÃO

* Esta agregação resultou do uso do uso do método *K-means*.

Tabela 22. Agregação de produtos em 30 famílias

FAMILÍA	PREÇO (\$)	VOLUME (cm ³)	PESO (dg)	CONDIÇÃO DE TEMPERATURA	ATRASSO/ ADIANTO
1	111	61	100	Cadeia fria	SIM
2	125	31	235	Cadeia fria	SIM
3	4.587	1	880	Cadeia fria	SIM
4	172	183	330	Cadeia fria	SIM
5	162	178	498	Cadeia fria	SIM
6	722	323	950	Cadeia fria	SIM
7	671	1	1.600	Cadeia fria	SIM
8	5.585	1	900	Cadeia fria	NÃO
9	380	129	306	Cadeia fria	SIM
10	2.801	1	1.000	Cadeia fria	SIM
11	5.627	3.776	12.000	Cadeia fria	NÃO
12	9.267	3.776	12.000	Cadeia fria	NÃO
13	2	83	160	Temp. ambiente	SIM
14	40	156	257	Temp. ambiente	SIM
15	45	168	240	Temp. ambiente	SIM
16	64	177	298	Temp. ambiente	SIM
17	567	294	483	Temp. ambiente	SIM
18	0	120	200	Temp. ambiente	SIM
19	1.517	231	552	Temp. ambiente	SIM
20	195	437	677	Temp. ambiente	SIM
21	13.785	204	410	Temp. ambiente	NÃO
22	4.747	226	412	Temp. ambiente	SIM
23	901	3.520	1.300	Temp. ambiente	SIM
24	86	864	9.300	Temp. ambiente	SIM
25	1.238	7.500	10.000	Temp. ambiente	SIM
26	1.241	3.850	12.050	Temp. ambiente	SIM
27	814	7.838	24.300	Temp. ambiente	SIM
28	947	7.296	24.700	Temp. ambiente	SIM
29	2.073	14.945	42.500	Temp. ambiente	SIM
30	1.468	17.556	44.500	Temp. ambiente	SIM

* Esta agregação resultou do uso do método *K-means*.

Tabela 23. Agregação de produtos em 42 famílias

FAMÍLIA	PREÇO (\$)	VOLUME (cm ³)	PESO (dg)	CONDIÇÃO DE TEMPERATURA	ATRASO/ ADIANTO
1	921	7.403	24.621	Temp. ambiente	SIM
2	898	3.850	11.900	Temp. ambiente	SIM
3	1.583	3.850	12.200	Temp. ambiente	SIM
4	2.247	14.945	42.500	Temp. ambiente	SIM
5	1.238	7.500	10.000	Temp. ambiente	SIM
6	68	886	9.300	Temp. ambiente	SIM
7	126	819	9.300	Temp. ambiente	SIM
8	901	3.520	1.300	Temp. ambiente	SIM
9	907	990	1.600	Temp. ambiente	SIM
10	26	203	453	Temp. ambiente	SIM
11	6	71	100	Temp. ambiente	SIM
12	26	162	241	Temp. ambiente	SIM
13	19	195	360	Temp. ambiente	SIM
14	64	175	287	Temp. ambiente	SIM
15	22	123	170	Temp. ambiente	SIM
16	38	228	300	Temp. ambiente	SIM
17	1.462	16.230	41.139	Temp. ambiente	SIM
18	58	162	230	Temp. ambiente	SIM
19	5.423	225	400	Temp. ambiente	NÃO
20	4.112	254	400	Temp. ambiente	SIM
21	3.532	209	418	Temp. ambiente	SIM
22	2.711	203	400	Temp. ambiente	SIM
23	1.562	249	596	Temp. ambiente	SIM
24	1.044	211	668	Temp. ambiente	SIM
25	100	227	357	Temp. ambiente	SIM
26	5	50	100	Temp. ambiente	SIM
27	13.005	225	420	Temp. ambiente	NÃO
28	7.283	225	400	Temp. ambiente	NÃO
29	14.565	182	400	Temp. ambiente	NÃO
30	0	50	100	Temp. ambiente	SIM
31	0	50	100	Temp. ambiente	SIM
32	3	48	64	Temp. ambiente	SIM
33	9.267	3.776	12.000	Cadeia fria	NÃO
34	4.587	1	880	Cadeia fria	SIM
35	5.627	3.776	12.000	Cadeia fria	NÃO
36	111	61	100	Cadeia fria	SIM
37	125	61	100	Cadeia fria	SIM
38	125	1	370	Cadeia fria	SIM
39	5.654	1	900	Cadeia fria	NÃO
40	2.822	1	1.093	Cadeia fria	SIM
41	898	177	943	Cadeia fria	SIM
42	170	182	429	Cadeia fria	SIM

* Esta agregação resultou do uso do algoritmo proposto no Apêndice C.

APÊNDICE E. Validação de modelos matemáticos propostos

A partir dos dados reais, foi feito um recorte para construir uma instância ilustrativa, com o objetivo de validar os modelos matemáticos (MILD) e (MILDT) propostos. Assim, foram selecionadas quatro entre as famílias de produtos de maior faturamento ($|P| = 4$); seis entre os clientes com maior demanda ($|K| = 6$); e quatro semanas com valores de demanda médios ($|T| = 4$). A Tabela 24 a seguir apresentam as características da instância ilustrativa, em comparação com a instância de dados reais e as tabelas seguintes apresentam os parâmetros da instância ilustrativa e os dados utilizados.

Tabela 24. Características da instância ilustrativa.

Instância	I	J	K	L	P	T
Real	1	5	36	8	42	4
Ilustrativa	1	3	6	8	4	4

Tabela 25. Demanda em unidades para instância ilustrativa.

Produto	Cliente	Semana 7	Semana 11	Semana 14	Semana 24
25	GOI	12.696	13.715	9.810	32.114
25	ESI	37.624	22.179	9.593	30.810
25	GOC	9.975	8.598	1.804	19.368
25	DFC	4.806	22.560	402	3.356
25	SPC	15.421	4.869	3.792	26.738
25	SPI	22.462	15.771	5.621	22.521
14	GOI	11.063	13.968	8.502	26.860
14	ESI	43.894	35.126	34.512	34.815
14	GOC	14.020	5.076	109	10.189
14	DFC	2.642	3.391	0	4.643
14	SPC	25.336	3.003	9.605	6.354
14	SPI	13.402	13.066	1.139	31.704
33	SPC	0	0	0	3
34	DFC	0	68.444	50	192

Tabela 26. Custo de instalação dos CDs e custos de transporte entre planta e CDs.

	Custo de instalação de CD (\$)	Distância a planta SP-CD (Km)	Alternativas de transporte (\$/Kg)							
			Rodoviário Seco	Aéreo Seco	Aéreo Frio	Fiorino	Toco	Truck	Carreta	Truckrefri
SãoPaulo	55.154	15,0	1,4	NA	NA	987	1.316	1.426	2.194	3.251
Vitória	58.009	943,4	3,8	34	42	3.658	4.877	5.283	8.128	9.093
Goiânia	53.371	929,3	1,8	37	47	3.485	4.647	5.034	7.744	8.539

Tabela 27. Custo de transporte e capacidade das alternativas de transporte.

Origem-Destino	Distância (Km)	Alternativas de transporte (\$/Kg)								
		Rodoviário Seco	Aéreo Seco	Aéreo Frio	Fiorino	Toco	Truck	Carreta	Truckrefri	
São Paulo GOI	911,4	2,5	49,7	63,1	4.705	6.273	6.796	10.455	11.528	
São Paulo ESI	968,8	5,1	46,1	56,1	4.938	6.584	7.132	10.973	12.275	
São Paulo GOC	929,3	1,8	36,8	46,7	3.485	4.647	5.034	7.744	8.539	
São Paulo DFC	1.010,0	2,0	36,4	44,5	3.786	5.048	5.469	8.414	8.505	
São Paulo SPC	15,0	1,4	NA	NA	987	1.316	1.426	2.194	3.251	
São Paulo SPI	25,0	1,9	NA	NA	1.333	1.777	1.925	2.961	4.388	
Vitória GOI	1.408,6	3,7	75,0	95,3	7.106	9.475	10.265	15.792	17.412	
Vitória ESI	18,0	0,1	0,6	0,8	68	91	98	151	169	
Vitória GOC	1.403,60	2,8	55,6	70,6	5.264	7.019	7.604	11.698	12.898	
Vitória DFC	1.251,60	2,4	45,1	55,1	4.692	6.256	6.778	10.427	10.540	
Vitória SPC	943,4	3,8	34,2	41,6	3.658	4.877	5.283	8.128	9.093	
Vitória SPI	948,4	5,1	46,2	56,2	4.938	6.584	7.132	10.973	12.275	
Goiânia GOI	17,9	0,1	NA	NA	103	137	148	228	338	
Goiânia ESI	1.428,40	7,6	68,7	83,5	7.347	9.796	10.612	16.326	18.264	
Goiânia GOC	15,0	0,1	NA	NA	76	101	110	169	250	
Goiânia DFC	209,3	0,4	7,5	9,2	784	1.046	1.133	1.743	1.762	
Goiânia SPC	901,7	0,7	36,8	46,7	3.485	4.647	5.034	7.744	8.539	
Goiânia SPI	897,4	1,0	49,7	63,0	4.705	6.273	6.796	10.455	11.528	
Capacidade (m ³)		∞	∞	∞	4,32	40,32	48,6	93,96	48,6	

Tabela 28. Dados do produto para instância ilustrativa.

Produto	Volume (cm ³)	Peso (kg)	Preço (\$)	Custo prod. (\$)	Custo estoque em CD (\$)	Custo estoque em cliente (\$)	Penalidade por atraso (\$)	Penalidade por venda perdida (\$)
25	227	0,036	99,91	40	0,0405	20	500	NA
14	175	0,029	64,19	26	0,0311	13	321	NA
33*	3776	1,200	9.266,52	3707	1,2014	1.853	22.935	NA
34*	1	0,088	4.587,00	1835	0,0003	NA	NA	92.665

*Produto que requer cadeia fria. O produto 33 não pode ser entregue com atraso.

Tabela 29. Custo de escolta por destino para instância ilustrativa.

Destino	Custo do escolta (\$)
São Paulo	514
Vitória	3.430
Goiânia	3.225
GOI	3.225
ESI	3.430
GOC	3.225
DFC	3.430
SPC	514
SPI	514

Para resolução dos modelos foi utilizada a linguagem de programação algébrica GAMS 24.1.3 e o solver CPLEX 12.5.1, em um computador com 8 GB de memória RAM, processador Intel Core i7 e sistema operacional Windows 7. Foram utilizados os seguintes critérios de parada: *gap* relativo menor ou igual a 0,3% ou tempo limite de 3600 segundos.

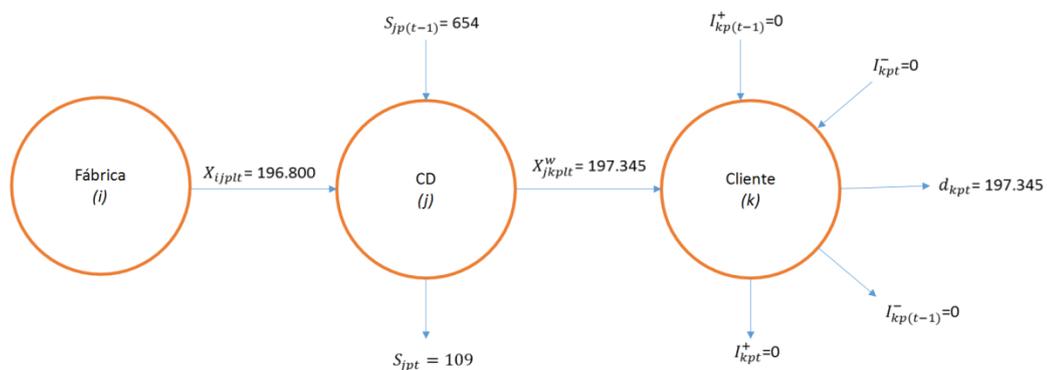
Resultados do MILD com instância ilustrativa.

O MILD com dados ilustrativos foi resolvido em 1336 segundos de processamento computacional. O resultado obtido indica a abertura de dois CDs, em São Paulo e Goiânia, que correspondem aos estados que concentram a maior demanda. O fluxo total de produtos das plantas para os CDs foi de 777.713 unidades, dos quais 84% foram enviados para São Paulo, pois é o centro mais próximo à planta.

O CD de São Paulo atende a maior parte da demanda de São Paulo, Espírito Santo e Goiás. Foi feito o transporte de 3 unidades do produto P33 de Goiânia para SPC que é justificado porque o produto requer transporte refrigerado, que só pode ser realizado por um veículo *truck* refrigerado ou por envio fracionado pelo modal aéreo em cadeia fria. Dado que o custo de usar um veículo *truck* refrigerado é alto e que o transporte aéreo não existe dentro do mesmo estado, a demanda de SPC é atendida a partir do centro localizado em Goiânia. Por outro lado, os 37.253 produtos da família 25 transportados de Goiânia para ESI são usados para suprir parte da demanda que não pode ser suprida por São Paulo em um dos períodos devido ao limite no valor da carga fracionada que pode ser enviado.

O MILD respeita a conservação dos fluxos entre facilidades. A Figura 35 mostra a conservação de fluxo da planta para o CD de São Paulo no período 2. A planta tem capacidade suficiente para produzir todas as unidades demandadas, porém é necessário gerenciar o fluxo de produtos da planta para o CD e o estoque no mesmo para atender a demanda dos clientes. Todas as entradas coincidem com as saídas no caso apresentado, o que também ocorre em todos os períodos e instalações.

Figura 35. Conservação de fluxo da planta para o CD de São Paulo no período 2 no teste com instância ilustrativa.



Fonte: Elaboração própria.

O MILD também permite a definição de fluxos que respeitem as restrições de segurança da rede. Por exemplo, entre a planta e o CD de São Paulo no período 1 existe um fluxo de 86.329 unidades do produto P25 e 99.294 unidades do produto P14 com preço de \$99,91 e \$64,19 respectivamente, em 5 viagens usando carga dedicada com veículo do tipo toco. Logo, o valor da carga transportada foi de \$14.998.812, valor que não ultrapassa o limite do seguro que de fato é de 3.000.000 para cada viagem, ou seja, \$15.000.000 em total. Porém, excede o limite estabelecido para que o veículo possa circular sem ser escoltado, assim são usadas cinco escoltas armadas, uma para cada viagem. Considerando todos os percursos resultantes, foram necessárias 227 viagens, todas com escoltas armadas. A capacidade utilizada em termos de volume é, em média, de 19% para veículos que transportam produtos a temperatura ambiente e de 0.0013% no caso dos veículos de cadeia fria (*truck* refrigerado), isto porque todas as viagens estão no limite do valor do seguro (\$3 milhões).

A Tabela 30 apresenta os resultados do teste com a instância ilustrativa, em relação às parcelas de custos da rede de distribuição e a participação de cada uma no custo total. Note-se que, a maior participação no custo total da rede é a do custo de transporte com 70,8%, seguido do custo de segurança por escolta armada com 23,3%. Não foram utilizadas as estratégias de atrasar a entrega e não houve venda perdida. Foram estocadas mais de 10.000 unidades de produtos, dos quais 92% foram em temperatura ambiente. O custo localização foi menor que 6% do custo total da rede.

A qualidade dos resultados do modelo matemático depende da acurácia das informações/ dados de entrada. Como os dados inicialmente fornecidos pela empresa foram agregados e manipulados, e algumas informações foram estimadas, as soluções obtidas ainda são preliminares e precisam da avaliação dos gestores do problema. A Tabela 30 também apresenta os resultados das parcelas de custo obtidas neste teste e os valores calculados para a rede atual.

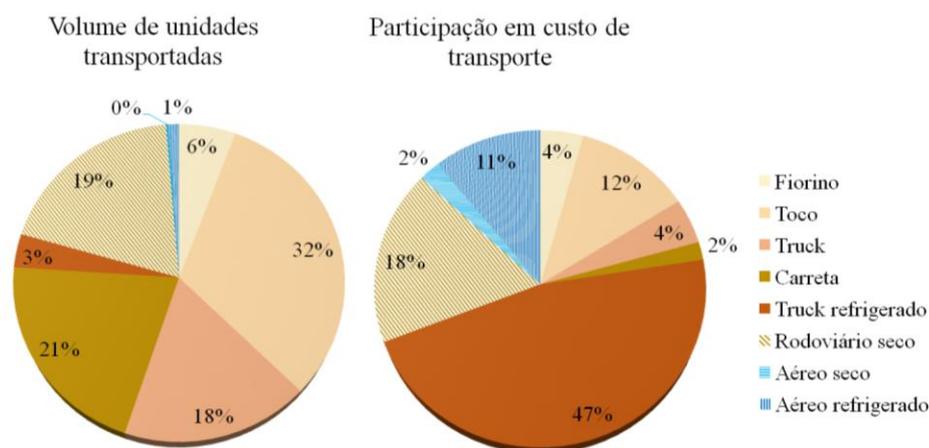
Tabela 30. Parcelas de custos da rede proposta com a instância ilustrativa.

	Resultado MILD	%	Rede atual	%	Varição
Custo de 'Abertura' de CDs	651.150,00	8%	330.925	2,0%	97%
Custo de antecipar demanda	53.121,00	1%	5.255	0,0%	911%
Custo de transporte	5.676.553	71%	11.508.868	70,4%	-51%
Custo de escolta	1.622.995	20%	4.510.428	27,6%	-64%
CUSTO TOTAL	8.003.819	100%	16.355.476	100%	-51%

- A maior participação no custo total da rede é o custo de transporte com 71%.
- Para fazer uma comparação, foi fixada a localização de um único CD em São Paulo, resolvendo o modelo para calcular os custos da rede atual.

A Figura 36 a seguir apresenta os resultados de transporte e de custos discriminados para cada alternativa de transporte. Esta informação pode auxiliar aos gestores, por exemplo, em negociações para contratação de transporte.

Figura 36. Utilização das alternativas de transporte disponíveis na instância ilustrativa.



Fonte: Elaboração própria.

- Apesar de que um pouco mais do 1% do volume transportado utiliza o modal aéreo, os custos com esta alternativa representam 13% do custo total de transporte.
- O frete dedicado transporta 80% do volume frente, com uma participação de 69% de participação no custo total.

Testes com variação de parâmetros com instância ilustrativa.

Para validação e análise do MILD foram realizados testes com variação dos seguintes parâmetros: demanda; custos de penalidade por atraso e venda perdida; custos fixos de instalação; custo de armazenamento nos CDs; custos de transporte; ampliação do horizonte de planejamento, conforme plano de experimentos apresentado na Tabela 31.

A variação da demanda tem por objetivo observar o impacto da quantidade transportada na configuração da rede e a determinação de fluxos de produtos. A variação nos custos de transporte tem por objetivo a análise do impacto no custo total da rede e o comportamento na escolha de modais de transporte e no uso de escoltas, também visa identificar se os custos de transporte têm potencial para mudar as decisões estratégicas. A variação nas penalidades por não atendimento tem por objetivo avaliar como estes valores podem ser ajustados, para atender às estratégias da empresa. A variação nos custos de instalação busca avaliar como o MILD se comporta e qual é o impacto das mudanças neste valor para a configuração da rede. Finalmente, a variação dos custos de estoque visa avaliar o impacto deste custo nas decisões de fluxo e estoque.

Tabela 31. Testes de variação de parâmetros com a instância ilustrativa.

Testes	Variações	
Demanda	T1	Diminuição de 20%
	T2	Aumento de 20%
Custos de transporte	T3	Diminuição de 20% no custo total
	T4	Aumento de 20% no custo total
	T5	Aumento de 100% no custo total
	T6	Diminuição de 20% no custo fracionado
	T7	Aumento de 20% no custo fracionado
	T8	Diminuição de 20% no custo dedicado
	T9	Aumento de 20% no custo dedicado
	T10	Diminuição de 20% no custo transporte aéreo
	T11	Aumento de 20% no custo transporte aéreo
	T12	Diminuição de 20% no custo transporte rodoviário
	T13	Aumento de 20% no custo transporte rodoviário
Custos de penalidade por atraso e venda perdida	T14	Diminuição de 20% na penalidade de atraso
	T15	Diminuição de 80% na penalidade de atraso
	T16	Diminuição de 20% na penalidade de venda perdida
	T17	Diminuição de 80% na penalidade de venda perdida
	T18	Penalidade de atraso igual ao preço de venda do produto
	T19	Penalidade de venda perdida igual ao preço de venda do produto
	T20	Penalidade de atraso igual ao 0.4% do preço de venda do produto
T21	Penalidade de venda perdida igual ao 0.4% do preço de venda do produto	
Custos de instalação	T22	Diminuição de 20%
	T23	Aumento de 20%
	T24	Igual a 50 vezes o custo original
Custo de estoque em CDs	T25	Diminuição de 20%
	T26	Aumento de 20%
	T27	Aumento de 40%

Variação na demanda

Os resultados dos testes com variação na demanda (T1 e T2) mostram o impacto da estrutura da demanda na configuração da rede proposta pelo MILD. Note-se na Tabela 32 que, quando a demanda diminui em 20% a decisão de localização muda para abrir apenas o CD de São Paulo.

Tabela 32. Parcelas de custo dos testes de variação de demanda e outros resultados da instância ilustrativa.

	-20%	Ilustrativa	+20%
CDs instalados	São Paulo	São Paulo e Goiânia	São Paulo e Goiânia
Número viagens	188	227	283
Unidades estocadas em CD	291	10.434	40.979
Custos de localizar	55.154	108.525	108.525
Custo de estocar em CD	0,0927	397	1.636
Custo de transporte	1.067.836	1.309.118	1.542.712
Custo de escolta	349.118	431.024	580.216
TOTAL	1.472.108	1.849.064	2.233.089

Como era esperado, o aumento da demanda implica no aumento do número de viagens e do custo de transporte. Além disso, com o aumento da demanda mais unidades são estocadas nos CDs, pois a capacidade das viagens dos veículos dedicados das plantas até os CDs são mais bem aproveitadas.

No teste com redução de 20% da demanda, os fluxos da planta para os CDs são muito similares às quantidades demandadas em cada período. Já no teste com um aumento de 20%, ocorre fluxo de produtos superior às demandas nos três primeiros períodos, sendo que os produtos excedentes são estocados nos CDs para atender a demanda dos períodos seguintes.

As capacidades utilizadas dos veículos no teste com redução da demanda são 18% e 0,01% para veículos que transportam produtos a temperatura ambiente e em refrigeração, respectivamente. No teste com aumento da demanda, a capacidade dos veículos é aproveitada até o limite de valor do seguro, e a utilização da capacidade dos veículos (em volume) que transportam produtos a temperatura ambiente aumenta a cerca de 30%.

Variação nos custos de transporte

Para verificação nos *trade-offs* entre os custos de transporte (c_{ijl} , c'_{jkl}) e os demais custos da função objetivo, foram realizados testes com redução de 20% nos valores destes parâmetros (T3), e aumentos de 20 e 100% (T4 e T5, respectivamente). Os resultados mostram que estas variações não interferem na decisão de abertura dos CDs, a decisão de localização em todos os testes é localizar São Paulo e Goiânia. A Tabela 33 sintetiza os resultados obtidos.

Tabela 33. Parcelas de custo do teste de variação de custo de transporte da instância ilustrativa.

	-20%	Ilustrativa	20%	100%
Número de viagens	227	227	228	229
Custos de localizar	108.525	108.525	108.525	108.525
Custo de estoque em CDs	397	397	397	94
Custo de transporte dedicado	997.985	1.247.481	1.504.878	2.228.614
Custo de transporte fracionado	49.309	61.637	62.048	100.454
Custo de escolta	431.024	431.024	434.454	697.935
CUSTO TOTAL	1.587.240	1.849.064	2.110.302	3.135.622

Note-se na Tabela 33 que reduzir o custo de transporte em 20% (T3) não afeta as decisões de número de viagens, uso de escoltas e estoque, de fato não afeta nenhuma decisão do MILD. Quando o custo de transporte aumenta (T3 e T4), o total de viagens usando frete dedicado aumenta, ou seja, em alguns trechos passa a ser mais vantajoso usar veículos. O aumento em 20% do custo de transporte (T4) implica no aumento de uma viagem escoltada, com acréscimo de 0,4% no custo de transporte e 0,8% no custo de escolta. Já uma variação de 100% (T5) implica em um aumento de 2 viagens escoltadas, que representam um aumento de 0,88% no custo de transporte e um significativo aumento de 62% nos custos de escolta. Esta mudança é explicada pelo fato de que, com o aumento de 100% no custo de transporte, o modelo mudou a decisão de atender a demanda de DFC de produto refrigerado com 100 viagens em um *truck* refrigerado a partir do CD de São Paulo, para atender a partir de Goiânia, incorrendo

em um custo mais elevado de escolta já que o custo de escolta para destino Goiânia é de \$3.225, substancialmente mais alto que para São Paulo, que é de \$514. Porém, este custo não é mais alto que o custo de atender o cliente a partir do CD de São Paulo, porque a distância é 5 vezes maior que a distância Goiânia – DFC (conforme pode ser observado nas tabelas de distância).

Para avaliar o comportamento do MILD em relação à alteração nos custos de cada tipo de frete, foram realizados testes variando os custos de transporte dedicado (T6 e T7) e os custos de frete fracionado (T8 e T9). As tabelas 34 e 35 sintetizam os principais resultados destes testes em termos das parcelas de custo da função objetivo e número de viagens com veículos dedicados.

Note-se na Tabela 34 que, a redução do custo do frete dedicado (T6 e T7) implica uma maior utilização deste frete, como esperado.

Tabela 34. Resultados dos testes de variação de custos de transporte dedicado da instância ilustrativa.

	-40%	-20%	Ilustrativa	20%	40%
Número viagens	230	230	227	225	224
Custos de localizar	108.525	108.525	108.525	108.525	108.525
Custo de estocar em CD	88	88	397	397	397
Custo de escolta	435.482	434.968	431.024	429.997	429.483
Custo total transporte	802.777	1.054.537	1.309.118	1.559.230	1.808.403
Custo de transporte dedicado	754.295	1.004.305	1.247.482	1.493.267	1.740.302
% no custo total de transporte	94%	95%	95%	96%	96%
Custo de transporte fracionado	48.482	50.232	61.637	65.963	68.101
% no custo total de transporte	6%	5%	5%	4%	4%
%Volume total transportado com frete dedicado	0,64	0,62	0,58	0,53	0,51
%Volume total transportado com frete fracionado	0,36	0,38	0,42	0,47	0,49
CUSTO TOTAL	1.346.872	1.598.118	1.849.064	2.098.149	2.346.808

Por exemplo, a redução em 20% faz com que o número de viagens feitas com veículos dedicados aumente em 3 viagens, reduzindo o custo total de transporte em 19,9%. Da mesma forma, o aumento no frete dedicado também implica diretamente em

um aumento nos custos totais de transporte, em 19,1% e 38,1% para os aumentos de 20% e 40%, respectivamente. Um resultado interessante neste teste é a redução nos custos com armazenamento, quando os custos de frete dedicado são reduzidos. O que mostra que, a estratégia de antecipar o envio de produtos para os CDs, aproveitando a utilização dos veículos, pode não compensar os custos de armazenamento.

Tabela 35. Resultados dos testes de variação de custos de transporte fracionado da instância ilustrativa.

	-40%	-20%	Ilustrativa	20%	40%
Número viagens	224	225	227	229	232
Custos de localizar	108.525	108.525	108.525	108.525	108.525
Custo de estocar em CD	346	389	397	88	194
Custo de escolta	429.483	429.997	431.024	434.968	442.343
Custo total transporte	1.283.928	1.297.166	1.309.118	1.315.660	1.317.700
Custo de transporte dedicado	1.242.415	1.244.389	1.247.482	1.255.381	1.270.326
% no custo total de transporte	97%	96%	95%	95%	96%
Custo de transporte fracionado	41.513	52.777	61.637	60.279	47.374
% no custo total de transporte	3%	4%	5%	5%	4%
%Volume total transportado com frete dedicado	47%	53%	58%	62%	69%
%Volume total transportado com frete fracionado	53%	47%	42%	38%	31%
CUSTO TOTAL	1.822.282	1.836.077	1.849.064	1.859.241	1.868.762

A Tabela 35 apresenta a síntese dos resultados dos testes com redução nos custos do frete fracionado (T8 e T9). Estes testes mostram um comportamento consistente com os testes anteriores, ou seja, quando aumenta o custo do transporte fracionado, aumenta o número de unidades enviadas a partir das alternativas de transporte dedicado e, conseqüentemente, aumenta o número de viagens e o custo de transporte dedicado. O aumento do custo de transporte fracionado de 20% e 40% origina um aumento do custo total em 0,6% e 1,1%, respectivamente. Ressalte-se que o impacto das alterações nos custos do frete fracionado é menor do que o impacto nas variações nos custos do frete dedicado.

Também foram realizados testes variando os custos de transporte dos modais de transporte aéreo e rodoviário. A Tabela 36 sintetiza os principais resultados em relação às parcelas de custo. A variação nos custos do modal aéreo (T10 e T11) não resulta em mudanças nas decisões estratégicas ou táticas. Porém, as variações nos custos de transporte rodoviário (T12 e T13) incentivam o uso de veículos dedicado em detrimento do transporte rodoviário fracionado, de forma que se mantém a proporção de unidades transportadas em cada tipo de modal. Foram realizados outros testes aumentando e diminuído drasticamente o custo de transporte ($\pm 500\%$), foi encontrado que não existem mudanças na configuração da rede.

Tabela 36. Resultados dos testes de variação de custos de modais de transporte da instância ilustrativa.

	Ilustrativa	Aéreo -20%	Aéreo 20%	Rodoviário -20%	Rodoviário 20%
Número viagens	227	227	227	226	228
Custos de localizar	108.525	108.525	108.525	108.525	108.525
Custo de estocar em CD	397	397	397	397	397
Custo de escolta	431.024	431.024	431.024	430.510	434.454
Custo de transporte	1.309.118	1.307.911	1.310.326	1.048.929	1.565.718
Custo de transporte aéreo	6.039	4.831	7.247	6.039	6.039
Custo de transporte rodoviário	1.303.079	1.303.080	1.303.079	1.042.890	1.559.679
Volume total transportado pelo modal aéreo	0,1285%	0,1285%	0,1285%	0,1285%	0,1285%
Volume total transportado pelo modal rodoviário	99,87%	99,87%	99,87%	99,87%	99,87%
TOTAL	1.849.064	1.847.857	1.850.272	1.588.361	2.109.094

Variação nas penalidades por não atendimento da demanda

Para avaliar como o MILD responde às variações na estrutura de custos da função objetivo, foram realizados testes com alterações nos valores das penalidades por atraso (T15 e T16) e não atendimento da demanda (T17 e T18).

O custo de atraso ou não atendimento da demanda foi estimado a partir do preço de venda do produto. Através de testes preliminares, definiu-se o custo de atraso

como cinco vezes o preço de venda do produto e o custo de venda perdida de um produto como dez vezes o preço de venda do mesmo. A partir destes valores, foram realizados testes diminuindo gradativamente o custo de não atender a demanda (atraso e venda perdida). Em todos os testes, a demanda foi atendida completamente, ou seja, nenhuma decisão foi alterada em relação ao cenário-base da instância ilustrativa. Tampouco mudou quando o custo de não atendimento da demanda foi igualado ao custo de estoque em cliente, isto porque o custo logístico ainda é menor do que o custo de não atender ou de estocar no cliente (antecipação da entrega).

Finalmente, quando a penalidade de não atendimento da demanda é considerada como 1% do preço do produto (T18 e T19) o MILD escolhe atrasar 98 unidades do produto 34 para o cliente DFC. Quando o custo de não atender a demanda é 0.4% do preço do produto o MILD (T20 e T21), adicionalmente, escolhe perder a venda de 3 unidades do produto 33. Os custos são apresentados na Tabela 37. Nestas condições o custo de estocar nos clientes (20% do preço do produto) é maior do que o custo de não atender a demanda, portanto, o MILD opta por não atender, como era esperado.

Tabela 37. Parcelas de custo do teste de variação de penalidade de não atendimento da demanda da instância ilustrativa.

	0.4% do preço produto	Ilustrativa
Demanda não atendida	43.699	0
Custos de localizar	108.525	108.525
Custo de estocar em deposito	81	390
Custo de estocar em o cliente	1.811	0
Custo de atrasar	11.254	2.263
Custo de venda perdida	111	139
Custo transporte	1.295.450	1.303.076
Custo de escolta	424.369	427.799
TOTAL	1.841.600	1.842.191

Variação nos custos fixos de abertura de CDs

Os resultados de todas as variações nos custos, apresentados nas subseções anteriores, não mostraram alterações no local ou no número de CDs abertos. Neste sentido, para observar o comportamento do MILD, foram executados testes com variações nos custos de instalação (T22, T23 e T24). O resultado destes testes mostra que, aumentando ou reduzindo os custos fixos de instalação em 20%, a decisão de localização não é alterada. Apenas quando o custo de instalação é 50 vezes o custo de instalação original, ou seja, com um aumento de 4900%, o modelo abre só o CD de São Paulo. Neste contexto, são estocadas unidades no cliente a fim de não incorrer em não atendimento da demanda. A Tabela 38 apresenta a síntese dos resultados em relação às parcelas de custo.

Tabela 38. Resultados dos testes de variação de custos de instalação de CDs da instância ilustrativa.

	-20%	Ilustrativa	20%	4900%
CDs instalados	São Paulo e Goiânia	São Paulo e Goiânia	São Paulo e Goiânia	São Paulo
Unidades estocadas em cliente	0	0	0	2.496
Custos de localizar	86.820	108.525	130.230	2.757.708
Custo de estocar em CD	397	397	397	0
Custo de estocar em cliente	0	0	0	2.290.526
Custo de transporte	1.305.772	1.309.118	1.309.118	1.328.036
Custo de escolta	434.454	431.024	431.024	438.976
TOTAL	1.827.443	1.849.064	1.870.769	6.815.246

Variação nos custos de armazenamento

Finalmente, foram realizados testes variando o custo de estoque em CDs (T25, T26 e T27). No teste original são estocadas 10.434 unidades nos CDs, a diminuição do custo de estoque não estimula o estoque de mais produtos, porém com o aumento deste custo diminui substancialmente o número de unidades estocadas, como pode ser observado na Tabela 39.

Tabela 39. Parcelas de custo dos testes de variação de custos de estoque em CDs da instância ilustrativa.

	-20%	Ilustrativa	20%	40%
Unidades estocadas em CD	10.434	10.434	2.012	1.051
Custos de localizar	108.525	108.525	108.525	108.525
Custo de estocar em CD	317	397	105	23
Custo de transporte	1.309.118	1.309.118	1.308.960	1.309.056
Custo de escolta	431.024	431.024	431.538	431.538
TOTAL	1.848.985	1.849.064	1.849.128	1.849.142

Resultados do MILDT

Para validar o MILDT, que incorpora as decisões relacionadas à tributação, foram utilizados os dados da instância ilustrativa apresentada acima, considerando-se os alíquotas de ICMS são mostradas na Tabela 40. Os testes foram feitos utilizando a mesma configuração de computador, *software* e com os mesmos critérios de parada.

Tabela 40. Alíquotas de ICMS da planta para os CDs para a instância ilustrativa.

	São Paulo	Goiânia	Vitória	Distrito Federal	Espírito Santo
São Paulo	18%	7%	7%	7%	7%
Goiânia*	12%	17%	12%	12%	12%
Vitoria	12%	12%	17%	12%	17%

*Goiânia tem taxa de crédito presumido de 5,6%.

A Tabela 41 mostra as parcelas de custo da rede para os testes.

Tabela 41. Parcelas de custo do teste do MILDT com ICMS com a instância ilustrativa.

	Instância ilustrativa com ICMS	
Custos de localizar	108.525	0,37%
Custo de estocar em CD	1.211	0,00%
Custo de transporte	1.245.415	4,29%
Custo de escolta	738.869	2,55%
ICMS na transferência	12.856.926	44,33%
Saldo de ICMS	13.700.159	47,24%
Crédito morto	351.205	1,21%
TOTAL	29.002.310	100,00%

O resultado deste teste também indicou a abertura dos CDs de São Paulo e de Goiânia. Toda a demanda dos clientes é atendida sem atrasos, para isso são necessárias 121 viagens das plantas até os CDs, todas escoltadas; e 114 viagens dos CDs até os clientes, das quais 113 foram escoltadas, além do transporte utilizando frete fracionado. O custo de ICMS resultante é de \$26.557.085, que representa aproximadamente 92% do custo total da rede, destacando a importante participação do ICMS total e saldo no custo geral. Desta forma, nota-se que a otimização da rede pode ser dominada pela otimização dos fluxos de produtos para reduzir o custo de ICMS.

O estado de São Paulo concentra uma demanda elevada, de fato corresponde a 99,64% do total demandado. Assim existem muitas operações de transferência e venda dentro do mesmo estado de São Paulo, lembrando que a alíquota interna é alta (18%), o ICMS a pagar em cada trecho é alto e ao final das operações geram crédito morto de \$351.205

A Tabela 42 apresenta os resultados de fluxo para os dois modelos (MILD e MILDT), para mostrar como a operação de distribuição é afetada. Percebe-se que aumenta o número de unidades transferidas da planta para o CD de Goiânia, em detrimento das unidades transferidas para o CD de São Paulo devido a alíquota interna. Da mesma forma nas operações de venda diminui o número de unidades

movimentadas dentro do mesmo estado, assim a demanda de São Paulo é atendida principalmente pelo CD de Goiânia e a demanda de Goiânia é atendida totalmente pelo CD de São Paulo. Este resultado mostra que o MILDT verifica o *trade-off* entre os custos de transporte e o valor do imposto pago por circulação de mercadorias, aproveitando as vantagens em termos de custos. Este teste evidencia a importância da consideração de ICMS na decisão de localização em cadeias de suprimento brasileiras, e quão importante este imposto é na estrutura de custo das redes. No entanto, na otimização dos fluxos de produtos, a magnitude do valor do ICMS pode fazer com que os outros *trade-off* e decisões envolvidas sejam menos relevantes.

Tabela 42. Fluxo de produtos nos testes com e sem ICMS na instância ilustrativa.

Origem	Destino	Produto	Sem ICMS	Com ICMS		
Planta São Paulo	CD São Paulo	25	292.902	108.080		
		14	361.852	89.787		
		34	0	2.497		
	CD Goiânia	CD Goiânia	25	63.703	248.525	
			14	56.623	248.525	
			33	3	3	
			34	2.630	66.189	
			DFC	34	2.630	66.189
			ESI	25	37.253	100.206
			GOC	25	3.002	0
CD Goiânia	GOI	14	56.623	0		
		25	23.448	0		
	DFC	14	0	10.676		
		25	0	31.124		
	SPC	SPC	ESI	14	0	148.347
			14	0	44.298	
			25	0	50.820	
			33	3	3	

Origem	Destino	Produto	Sem ICMS	Com ICMS
CD São Paulo	SPI	14	0	59.311
		25	0	66.375
	DFC	14	10.676	0
		25	31.124	0
		34	66.056	2.497
	ESI	14	148.347	0
		25	62.953	0
	GOC	14	29.394	29.394
		25	36.743	39.745
	GOI	14	3.770	60.393
		25	44.887	68.335
	SPC	14	44.298	0
		25	50.820	0
	SPI	14	59.311	0
		25	66.375	0

- Neste teste o MILDT indica movimentação de carga do CD de São Paulo para clientes de Goiânia e do CD de Goiânia para clientes em São Paulo, como consequência de que as taxas de ICMS interestaduais são menores que as taxas internas, mostrando que o modelo verifica o *trade-off* entre custos de transporte e a geração de ICMS.
- Existem mudanças na alocação da demanda dos clientes aos CDs, porque o imposto a pagar se sobrepõe ao custo logístico, como o mostra a Figura 37.

Figura 37. Fluxos dos CDs para as diferentes macrorregiões administrativas do Brasil com a instância ilustrativa.

