

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

**ABORDAGENS DE OTIMIZAÇÃO
PARA TRANSPORTE, ARMAZENAGEM, ESMAGAMENTO E REFINO
EM EMPRESAS DO COMPLEXO AGROINDUSTRIAL DA SOJA NO BRASIL**

MÔNICA DO AMARAL

Orientador: Prof. Dr. Reinaldo Morabito

Co-orientador: Prof. Dr. Maurício Cardoso de Souza

SÃO CARLOS

2012

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

**ABORDAGENS DE OTIMIZAÇÃO
PARA TRANSPORTE, ARMAZENAGEM, ESMAGAMENTO E REFINO
EM EMPRESAS DO COMPLEXO AGROINDUSTRIAL DA SOJA NO BRASIL**

Mônica do Amaral

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Federal de São Carlos como requisito parcial para a obtenção do título de Doutor em Engenharia de Produção.

Orientador: Prof. Dr. Reinaldo Morabito

Co-orientador: Prof. Dr. Maurício Cardoso de Souza

Agências Financiadoras: CNPq, CAPES e FAPESP

SÃO CARLOS

2012



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS

Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção

Folha de Aprovação

Defesa de Tese de Doutorado da candidata Mônica do Amaral, realizada em 19/10/2012.

Comissão Julgadora:

Prof. Dr. Reinaldo Morabito Neto (UFSCar)

Prof. Dr. Maurício Cardoso de Souza (UFMG)

Prof. Dr. Henrique Pacca Loureiro Luna (UFAL)

Prof. Dr. Silvio Alexandre de Araujo (UNESP)

Prof. Dr. Maristela Oliveira dos Santos (USP)

Prof. Dr. Mario Otavio Batalha (UFSCar)

O Relatório de Defesa assinado pelos membros da Comissão Julgadora encontra-se arquivado junto ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção.

*“Mesmo com tantos motivos
pra deixar tudo como está
Nem desistir, nem tentar
Agora tanto faz
Estamos indo de volta pra casa”.*

(Renato Russo)

DEDICATÓRIA

Àquele que me encantou com sua linda história de amor e dedicação à universidade,

Àquele que me apresentou ao maravilhoso mundo da Pesquisa Operacional,

Àquele que me convenceu a mergulhar sem medo na vida acadêmica,

Àquele que transformou meus sonhos em metas e realizações,

A vocês, Adilson, Marcone, Agnaldo e Luiz,

Dedico a minha tese.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus,
Por se fazer sempre presente em minha vida, com seus milagres e provações.

Aos meus orientadores, Reinaldo e Maurício,
Por suas contribuições à minha formação pessoal e profissional, especialmente pelos exemplos de paciência, perseverança, disciplina e compreensão, além do apoio à realização desta tese.

Ao CNPq e à FINEP, pelos meus 5 primeiros meses de bolsa. À CAPES, pelos 3 meses seguintes. À FAPESP, pelos últimos 26 meses.

Ao Prof. Dr. Bernard Gendron, por ter me recebido no CIRRELT, em Montreal.

Aos membros da banca de qualificação e de defesa, pelas valiosas contribuições.

Aos meus “meninos mais velhos”: Pedro e Rafael,
Pelos primeiros passos, de pesquisa e trabalho em equipe, que demos juntos na UFMG.

Aos meus “meninos do meio”: Lena, Rodrigo, Guilherme e João Pedro,
Por todas as horas de boa convivência, aprendizagem e trabalho na UFSCar.

Aos meus “meninos mais novos”: Ademar, Alessandro, Aline, Bruno, Eduardo Henrique, Erick, Fernando Luiz, Jônatan Henrique, Isabella, Leandro, Maísa, Marco Aurélio, Maritha, Marli, Matheus, Paolla, Rodrigo, Rubens, Tayrone, Túlio e Vinícius,
Pelas amizades e pelas oportunidades de continuar “colocando a mão na massa” na UFOP.

À minha família e aos membros da minha matilha – Bidu e Mina,
Pelo amor e apoio a mim dispensados, apesar das minhas crises e tantos momentos de ausência.

Aos meus amigos Lásara, Girlene e Daniel, Thiago Augusto, Luiz Ricardo, Lauro e Laura, Pollyanna, Marcela e Fernando, Leonardo e Wagner – por TUDO, tudo mesmo.

Ao Erick, por cuidar tão bem de mim nos momentos em que eu preciso:
Do seu carinho, do seu apoio e da sua proteção.

À UFOP, por me receber de volta. Foi importante conhecer outras universidades,
Mas me sinto extremamente grata pela oportunidade de retornar à minha origem acadêmica.

RESUMO

A soja é um dos principais produtos agrícolas brasileiros e seu complexo – formado pelo grão, pelo farelo e pelos óleos bruto e refinado – movimentada cerca de 30 bilhões de dólares somente em exportações anualmente. Do total colhido, aproximadamente 40% da soja em grão é exportada, enquanto os 60% restantes passam por processos de industrialização. Após o esmagamento, obtêm-se farelo e óleo bruto, sendo que este último pode ainda ser refinado. Esses produtos derivados podem ser consumidos internamente ou exportados. Nesta tese são propostas abordagens de otimização baseadas em modelos de fluxos em redes para representar, no nível operacional, decisões de transporte intermodal, industrialização e armazenagem ao longo da cadeia. E, no nível estratégico, são propostos modelos de localização de instalações baseados em programação inteira mista para apoiar decisões de investimento em terminais intermodais, esmagadoras e refinarias, além de armazéns. Para melhor representar essa cadeia de suprimentos, que é de grande porte, também foi desenvolvida uma estrutura de rede altamente esparsa, tornando os modelos mais tratáveis sob o ponto de vista computacional. Neste estudo, o foco está no processo de decisão de empresas desse setor, ao invés de ter como objetivo apoiar decisões governamentais na cadeia da soja, como em estudos anteriores da literatura. Foram abordados problemas característicos de empresas especializadas somente na exportação da soja em grão e também empresas atuantes em toda a cadeia agroindustrial da soja e seus derivados. Isso leva a uma subdivisão natural dos modelos de fluxos em redes orientados para problemas monoproduto, como no caso das primeiras empresas, e multiproduto, no caso das últimas empresas. Testes de verificação foram realizados com dados secundários e cenários realistas, para ilustrar a aplicabilidade das abordagens propostas. Para os testes de esforço computacional, foram gerados exemplares com dados aleatórios. Os testes realizados em um *software* de otimização comparam o desempenho computacional desses modelos em diferentes opções de parâmetros de controle, incluindo o uso de relaxações. Adicionalmente, foram propostas e testadas algumas heurísticas de programação matemática – *relax-and-fix* e *fix-and-optimize* – para dois dos modelos de localização de terminais intermodais, armazéns, esmagadoras e refinarias, comparando os resultados obtidos com abordagens exatas e aproximadas.

Palavras chave: Fluxos em Redes. Programação inteira mista. Cadeia agroindustrial da soja. Transporte Intermodal. Dimensionamento de Lotes de Produção. Localização de Instalações.

ABSTRACT

Soybean is one of the most important Brazilian agricultural products and its complex - composed by grain, meal and by crude and refined oils - yields about \$ 30 billion only in exports annually. Approximately 40% of soybeans harvested is exported, while the remaining 60% go through industries. After processing the soy grain, meal and crude oil are obtained, and crude oil can be further refined. These products can be domestically consumed or exported. This thesis propose optimization approaches based on network flow models to represent, at the operational level, decisions on intermodal transport, processing and storage along the chain. And, at the strategic level, we propose facility location models based on mixed integer programming to support investment decisions in intermodal terminals, in processing and refining facilities, besides in warehouses. To better represent this supply chain, which is a large scale system, it is also developed a highly sparse network structure, making the models more tractable computationally. In this study, the focus is on the decision-making process of companies in this sector, rather than aiming to support government decisions in the soybean chain, as in previous studies in the literature. Typical problems of companies are specialized only in the export of soybeans and also companies operating throughout the agribusiness chain of soybean and its byproducts. This assumption deals with a natural subdivision of the network flow models in problems oriented by single product, as in the case of the first companies, and by multiproducts in the case of other enterprises. Verification tests were conducted using secondary data and realistic scenarios to illustrate the applicability of the proposed approaches. For computational effort tests, instances were randomly generated. Tests conducted in an optimization software compares the computational performance of these models in different tests of control parameters, including the use of relaxations. Additionally, some mathematical programming based heuristics were proposed and tested - relax-and-fix and fix-and-optimize - for two location models of intermodal terminals, warehouses, refineries and overwhelming, comparing the results obtained with exact and approximate approaches.

Key Words: *Network flows. Mixed integer programming. Agrindustrial soybean chain. Intermodal transport planning. Lot sizing. Facility location.*

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1	Fases de pesquisas baseadas em modelagem e simulação	9
Figura 2.1	Níveis de decisão do modelo de Apaiah e Hendrix	19
Figura 2.2	Representação de terminais intermodais interligando duas redes de transporte	25
Figura 2.3	Níveis de decisão do modelo de Dubke e Pizzolato	28
Figura 3.1	Sistema agroindustrial da soja	33
Figura 3.2	Áreas de cultivo da soja no Brasil	35
Figura 3.3	Mapa do sistema rodoviário brasileiro	39
Figura 3.4	Mapa do sistema ferroviário brasileiro	40
Figura 3.5	Mapa do sistema hidroviário brasileiro	41
Figura 3.6	Mapa do sistema multimodal brasileiro	42
Figura 3.7	Fluxos da soja e derivados ao longo da cadeia agroindustrial	47
Figura 3.8	Subprodutos da soja em grão	49
Figura 3.9	Processo de esmagamento da soja	51
Figura 3.10	Evolução dos custos de frete rodoviário da soja em 2004	55
Figura 4.1	Estrutura intermodal formada por várias redes de transporte	58
Figura 4.2	Exemplo de rede com $ O = 4$, $ D = 2$, $ V_1 = 5$, $ V_2 = 3$ e $ V_3 = 4$	60
Figura 4.3	Matriz de adjacências associada ao exemplo de rede	61
Figura 4.4	Arcos que ligam os vértices de oferta à rede de transporte (A'_o)	62
Figura 4.5	Representação do transporte de carga a um ponto de demanda (A'_d)	64
Figura 4.6	Arcos que representam os terminais intermodais (A_I)	65
Figura 4.7	Arcos que representam as redes de transporte em cada modal (A)	66
Figura 4.8	Terminal rodo-hidroviário no ponto geográfico “4”	67
Figura 4.9	Linhas e colunas suprimidas nulas suprimidas em f1 , f2 e h3	67
Figura 4.10	Ligações possíveis a partir dos vértices de oferta de soja	68
Figura 4.11	Ligações possíveis até os pontos de demanda	68
Figura 4.12	Ligação dos armazéns à rede rodoviária	70
Figura 4.13	Matriz de adjacências da rede acrescida de 3 armazéns	70

Figura 4.14	Matriz de adjacências da rede acrescida de 1 fábrica	72
Figura 4.15	Fluxos de matéria-prima e produtos derivados nas indústrias	73
Figura 4.16	Estrutura bloco angular para um problema esparsa	76
Figura 5.1	Fluxos da soja e seus derivados no complexo agroindustrial da soja	78
Figura 5.2	Foco das empresas exportadoras da soja em grão	80
Figura 5.3	Fluxo de atendimento das demandas dentro e fora do prazo	85
Figura 5.4	Estrutura dos custos côncavos cobrados nas ferrovias e hidrovias	89
Figura 5.5	Decisões no planejamento operacional do complexo agroindustrial da soja	94
Figura 5.6	Foco do planejamento operacional das empresas atuantes no complexo produtiva da soja	95
Figura 5.7	Fluxo de soja em grão nas indústrias de esmagamento ou esmagamento e refino	101
Figura 5.8	Fluxo de farelo de soja nas unidades de esmagamento ou esmagamento e refino	102
Figura 5.9	Fluxo do óleo bruto nas esmagadoras ($w \in W_1$)	103
Figura 5.10	Fluxo do óleo bruto nas refinarias ($w \in W_2$)	103
Figura 5.11	Fluxo do óleo bruto nas unidades de esmagamento e refino ($w \in W_3$)	104
Figura 6.1	Foco do planejamento estratégico de empresas exportadoras da soja em grão	119
Figura 6.2	Foco do planejamento estratégico das empresas atuantes na cadeia produtiva da soja	130
Figura 7.1	Rede utilizada nos experimentos ilustrativos	144
Figura 7.2	Rede de transporte considerada nos testes com os modelos operacionais	149
Figura 7.3	Passos principais para a construção de exemplares teste	157
Figura 8.1	Pseudocódigo da heurística <i>Relax-and-Fix</i> implementada, adaptada de Furlan (2011)	182
Figura 8.2	Estratégias implementadas para a heurística <i>relax-and-fix</i>	183
Figura 8.3	Fluxo <i>forward</i> com <i>overlapping</i> para a heurística <i>relax-and-fix</i>	184

Figura 8.4	Pseudocódigo da heurística <i>fix-and-optimize</i> , adaptado de Furlan (2011)	185
Figura 8.5	Avanço da otimização dos períodos de planejamento na heurística <i>fix-and-optimize</i>	186
Figura 8.6	Comparação entre as estratégias <i>relax-and-fix</i> implementadas	190

LISTA DE TABELAS

Tabela 1.1	Diferenças entre os modelos de gestão de operações e planejamento de capacidade	4
Tabela 4.1	Estrutura de rede proposta x Estrutura de Arnold et al. (2004)	74
Tabela 5.1	Porte do problema de planejamento do transporte intermodal da soja em grão	85
Tabela 5.2	Porte do problema de planejamento intermodal da soja em grão com economias de escala nos transportes ferroviário e hidroviário fluvial	92
Tabela 5.3	Fluxos de matérias-primas e produtos derivados nas unidades industriais	101
Tabela 5.4	Porte do problema de dimensionamento de lotes de produção e planejamento do transporte intermodal na agroindústria da soja	105
Tabela 5.5	Porte do problema de planejamento operacional na agroindústria da soja com alocação de estoques	113
Tabela 6.1	Porte do problema de localização de terminais intermodais e armazéns gerais	124
Tabela 6.2	Porte do problema de localização de terminais intermodais e armazéns gerais com alternativas discretas de investimento	128
Tabela 6.3	Porte do problema de planejamento do transporte intermodal da soja em grão	134
Tabela 6.4	Porte do problema de planejamento do transporte intermodal da soja em grão	138
Tabela 7.1	Identificação dos modelos matemáticos utilizados nos testes	142
Tabela 7.2	Nomes e siglas das localidades consideradas na cadeia agroindustrial	148
Tabela 7.3	Características dos exemplares do Modelo 3	150
Tabela 7.4	Resultados obtidos para os testes com o Modelo 3	150
Tabela 7.5	Características dos exemplares-base do Modelo 4	151
Tabela 7.6	Resultados obtidos para exemplares-base do Modelo 4	152
Tabela 7.7	Características dos exemplares com o dobro de silos e tanques no Modelo 4	153

Tabela 7.8	Resultados obtidos para exemplares com o dobro de silos e tanques no Modelo 4	153
Tabela 7.9	Características dos exemplares com o triplo de silos e tanques no Modelo 4	154
Tabela 7.10	Resultados obtidos para exemplares com o triplo de silos e tanques no Modelo 4	154
Tabela 7.11	Resultados obtidos para os exemplares do Modelo 5	160
Tabela 7.12	Resultados obtidos para os exemplares do Modelo 6 com 3 alternativas Discretas	161
Tabela 7.13	Resultados obtidos para os exemplares do Modelo 6 com 5 alternativas discretas	162
Tabela 7.14	Características dos exemplares e resultados obtidos com o Modelo 7	164
Tabela 7.15	Relaxação linear dos testes com o Modelo 7	165
Tabela 7.16	Resultados obtidos com o Modelo 8 com 3 alternativas discretas e após 1 hora de processamento	166
Tabela 7.17	Relaxação linear do Modelo 8 com 3 alternativas discretas	167
Tabela 7.18	Resultados obtidos com o Modelo 8 com 5 alternativas discretas e após 1 hora de processamento	168
Tabela 7.19	Relaxação linear dos exemplares do Modelo 8 com 5 alternativas discretas de investimento	169
Tabela 7.20	Características e <i>status</i> retornado pelo <i>software</i> nos testes com o Modelo 5	170
Tabela 7.21	Porte do problema e do arquivo de dados do Modelo 5	171
Tabela 7.22	Resultados obtidos nos testes com o Modelo 5	171
Tabela 7.23	Características dos exemplares e <i>status</i> retornado pelo <i>software</i> nos testes com o Modelo 6	172
Tabela 7.24	Porte do problema e do arquivo de dados do Modelo 6	173
Tabela 7.25	Resultados obtidos nos testes com o Modelo 6	173
Tabela 7.26	Características dos exemplares e <i>status</i> retornado pelo <i>software</i> nos testes com o Modelo 7	174

Tabela 7.27	Porte do problema e do arquivo de dados do Modelo 7	174
Tabela 7.28	Resultados obtidos nos testes com o Modelo 7	175
Tabela 7.29	Características os exemplares e <i>status</i> retornado pelo <i>software</i> nos testes com o Modelo 8	175
Tabela 7.30	Porte do problema e do arquivo de dados do Modelo 8	176
Tabela 7.31	Resultados obtidos nos testes com o Modelo 8	176
Tabela 8.1	Resultados da heurística <i>relax-and-fix</i> para os exemplares ilustrativos .	188
Tabela 8.2	Resultados das estratégias <i>backward</i> com partição anual, com e sem <i>overlapping</i>	191
Tabela 8.3	Comparação entre resultados do CPLEX e da heurística <i>relax-and-fix</i> .	191
Tabela 8.4	Tempos de execução (s) da heurística <i>relax-and-fix</i> com o Modelo 8 . .	192
Tabela 8.5	Resultados obtidos para a função objetivo (R\$) com exemplares de porte aumentado	193

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Objetivos	6
1.2	Justificativa	7
1.3	Método de Pesquisa	8
1.4	Organização do Texto	12
 2	 REVISÃO DE LITERATURA	 16
2.1	Modelagem de Complexos de Suprimento Agroindustriais de Produtos Não Percíveis	17
2.1.1	O Modelo de Apaiah e Hendrix	18
2.2	Modelagem de Problemas de Transporte Intermodal	22
2.2.1	O Modelo de Arnold et al.	24
2.3	Modelagem do Complexo Agroindustrial da Soja no Brasil	27
2.3.1	O Modelo de Dubke e Pizzolato	27
2.4	Considerações Gerais	31
 3	 O COMPLEXO AGROINDUSTRIAL DA SOJA NO BRASIL	 33
3.1	A Estrutura Física do Complexo Agroindustrial da Soja no Brasil	34
3.1.1	As áreas de cultivo da soja	35
3.1.2	A rede de transporte intermodal	37
3.1.3	Os terminais intermodais	44
3.1.4	A infraestrutura de armazenagem	45
3.2	As Empresas Atuantes no Complexo Agroindustrial da Soja no Brasil	46
3.2.1	Os produtos derivados da soja	49
3.2.2	Processos de transformação	51
3.2.3	Os mercados de consumo	52
3.3	Os Níveis de Planejamento das Empresas do Complexo Agroindustrial da	

	Soja no Brasil	54
3.4	Considerações Gerais	55
4	REPRESENTAÇÃO EM REDE DO COMPLEXO AGROINDUSTRIAL DA	
	SOJA	57
4.1	A Estrutura Básica da Rede	58
4.2	Elementos da Rede Específicos do Complexo Agroindustrial da Soja	69
	4.2.1 Os armazéns	69
	4.2.2 As indústrias de esmagamento e refino	71
4.3	Considerações Gerais	73
5	GESTÃO DE OPERAÇÕES DE CURTO PRAZO NO COMPLEXO	
	AGROINDUSTRIAL DA SOJA	77
5.1	Empresas Exportadoras de Soja em Grão	79
	5.1.1 Planejamento do transporte intermodal da soja em grão (Modelo 1)	81
	5.1.2 Planejamento do transporte intermodal da soja em grão com economias de escala nos modais ferroviário e hidroviário fluvial (Modelo 2)	88
5.2	Empresas Atuantes no Complexo da Soja	92
	5.2.1 Dimensionamento de lotes de produção e planejamento do transporte intermodal na agroindústria da soja (Modelo 3)	96
	5.2.2 Gestão de operações de curto prazo no complexo agroindustrial da soja com alocação de estoques	106
5.3	Considerações Gerais	113
6	PLANEJAMENTO DE CAPACIDADE NO COMPLEXO	
	AGROINDUSTRIAL DA SOJA	116
6.1	Empresas Exportadoras de Soja em Grão	118
	6.1.1 Localização de terminais intermodais e armazéns gerais (Modelo 5)	120
	6.1.2 Localização de terminais intermodais e armazéns gerais com	

	alternativas discretas de investimentos (Modelo 6)	124
6.2	Empresas Atuantes no Complexo Produtivo da Soja	129
6.2.1	Localização de terminais intermodais, armazéns, esmagadoras e Refinarias (Modelo 7)	129
6.2.2	Localização de terminais intermodais, armazéns, esmagadoras e refinarias com alternativas discretas de investimentos (Modelo 8) .	134
6.3	Considerações Gerais	137
7	EXPERIMENTOS COMPUTACIONAIS COM OS MODELOS	142
7.1	Experimentos com Exemplos Ilustrativos para Verificação dos Modelos .	143
7.1.1	Modelos 5 e 6	144
7.1.2	Modelos 7 e 8	145
7.2	Resultados Obtidos com os Modelos de Planejamento de Curto Prazo . .	145
7.2.1	Características dos exemplares utilizados nos testes dos modelos de curto prazo	146
7.2.2	Resultados dos experimentos com o Modelo 3	147
7.2.3	Resultados dos experimentos com o Modelo 4	150
7.3	Experimentos com os Modelos de Planejamento de Capacidade	155
7.3.1	O gerador automático de exemplares	156
7.3.2	Características dos exemplares utilizados nos testes dos modelos de planejamento estratégico	156
7.3.3	Resultados dos experimentos com o Modelo 5	159
7.3.4	Resultados dos experimentos com o Modelo 6	161
7.3.5	Resultados dos experimentos com o Modelo 7	163
7.3.6	Resultados dos experimentos com o Modelo 8	165
7.3.7	Resultados com exemplares de porte aumentado	168
7.4	Considerações Gerais	177
8	MÉTODOS DE RESOLUÇÃO	179
8.1	Métodos de Resolução para Problemas na Cadeia Agroindustrial da Soja no	

	Brasil	180
8.2	A Heurística <i>Relax-and-Fix</i>	181
8.3	A Heurística <i>Fix-and-Optimize</i>	184
8.4	Resultados dos Experimentos	186
	8.4.1 Experimentos com Exemplos Ilustrativos	187
	8.4.2 Experimentos com Exemplos de Porte Realista	188
	8.4.3 Experimentos com Exemplos de Porte Aumentado	192
8.5	Considerações Gerais	193
9	CONCLUSÃO	196
9.1	Conclusão	196
9.2	Perspectivas para o Desenvolvimento de Pesquisas Futuras	202
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	204
	APÊNDICE 1 – Procedimento Gerador de Exemplos para o Modelo 8	227

1 INTRODUÇÃO

A soja é um dos principais produtos do agronegócio brasileiro. Com uma produção anual de aproximadamente 65 milhões de toneladas, o Brasil ocupa a posição de segundo maior produtor mundial dessa oleaginosa e movimentou mais de 30 bilhões de dólares em exportações somente em 2011 (ABIOVE, 2012). Quando comparado aos seus principais concorrentes diretos no mercado mundial, os EUA e a Argentina, o país apresenta como importante vantagem competitiva a possibilidade de expansão das suas áreas atuais de cultivo (USDA, 2008).

Porém, ao mesmo tempo em que essa possibilidade representa um fator positivo para o Brasil, também impõe ao agronegócio da soja uma lógica complexa de produção, transporte, industrialização e consumo. Atualmente, as plantações de soja se estendem por todas as regiões do país e ocupam cerca de 40% das áreas agriculturáveis disponíveis (MENDES e PADILHA JÚNIOR, 2008). Depois de colhida, essa soja precisa passar por diversas atividades ao longo de um extenso percurso através do complexo antes de chegar à sua destinação final.

A partir das áreas de plantio, depois de colhida, a soja precisa passar por uma etapa de limpeza e secagem, que serve para retirar impurezas e reduzir a taxa de umidade dos grãos para cerca de 14%. A partir desse momento, a soja pode ser transportada e armazenada. A etapa de transporte, que pode corresponder a 25% dos custos totais da soja, está relacionada a problemas causados não só pelas longas distâncias a serem percorridas entre as áreas de colheita e destinação, mas também a ineficiências do sistema intermodal disponível (OJIMA, 2006b).

Considerando todo o complexo agroindustrial da soja, que é formado principalmente pela soja em grão, pelo farelo de soja e pelos óleos bruto e refinado, as próximas etapas correspondem à exportação da soja em grão ou à sua transformação em produtos derivados. Em um primeiro processo industrial, denominado esmagamento, o grão gera farelo de soja e óleo bruto. Esses dois produtos atendem tanto ao mercado interno quanto à exportação. O farelo é utilizado principalmente como fonte de proteínas em indústrias de rações para consumo animal. O óleo bruto pode ser exportado ou destinado a outras indústrias, como as de refino, consideradas como o segundo principal processo industrial do complexo, e utilizado como matéria-prima na indústria alimentícia, servindo de base para a produção de óleos comestíveis, margarinas, maionese e sorvetes, dentre outros produtos.

No mercado doméstico, o consumo interno da soja *in natura* é pouco expressivo. O farelo é absorvido principalmente por indústrias de rações, enquanto o consumo de óleo é dividido pelas indústrias alimentícias e a produção de biodiesel. No que diz respeito à exportação, os principais clientes da soja brasileira são a União Europeia e a Ásia. A União Europeia é a principal consumidora do farelo, especialmente em virtude de restrições ao uso de proteína animal para fabricação de rações, que foram motivadas pela ocorrência do “*mal da vaca louca*” (*Spongiform Encephalopathy* – BSE). A China, por sua vez, é a maior importadora da soja em grão, por possuir um grande parque industrial para produção e refino do óleo (SILVEIRA, 2005).

A etapa de armazenagem pode ter vários propósitos, como o de permitir a integração entre dois trechos de transporte intermodal ou de atender às necessidades de matéria-prima e regular os níveis de produção com a demanda pelos produtos derivados. Devido ao fato da soja apresentar produção sazonal, com a colheita concentrada nos meses de março e abril, a armazenagem também é utilizada para evitar os problemas de congestionamento nos principais portos durante o pico da safra. Mas, de acordo com Kussano e Batalha (2009), há uma carência de armazéns no Brasil para possibilitar essa prática.

A coordenação das diversas atividades descritas, compreendidas entre a colheita da soja e a sua destinação final, tanto nos casos da exportação direta ou da sua transformação em produtos derivados, geralmente é realizada por grandes empresas do setor agroindustrial. Muitas dessas empresas são detentoras de vários elos ao longo das cadeias de suprimentos em que atuam, controlando as indústrias esmagadoras e de refino, além de armazéns, terminais intermodais e de exportação (ADM, 2012; BUNGE, 2012; CARAMURU, 2012; CARGILL, 2012; DREYFUS, 2012).

Algumas dessas empresas atuam somente no transporte, armazenagem e exportação da soja em grão. O foco de atuação, nesse caso, está voltado à negociação da soja com os fazendeiros, a realização do transporte até os portos – incluindo a possibilidade de uso da intermodalidade – e o embarque alfandegário da soja, que segue para o cliente final. Outras empresas atuam em todo o complexo agroindustrial, realizando também a transformação da soja em derivados, e negociando, nesse caso, todos os produtos, incluindo o grão, nos mercados internacionais e atendendo às demandas de consumo interno.

Em ambos os casos, a gestão de operações de curto prazo, ou planejamento operacional de atividades, pode se tornar bastante complicada, principalmente pela necessidade

de coordenação simultânea das atividades de transporte e armazenagem em diferentes locais bastante dispersos geograficamente. No caso da realização de um ou mais processos de industrialização, o problema envolve ainda decisões relativas a múltiplos produtos, que também devem ser tomadas de forma conjunta. Como as durações das etapas de transporte e industrialização são significativas e não podem ser desprezadas, a necessidade de se cumprir os prazos para atendimento das demandas podem levar ao aumento dos custos de fluxo ao longo da rede e à necessidade de manutenção de estoques reguladores.

No planejamento de capacidade a médio e longo prazos, considerando um horizonte mais estratégico, no qual é possível investir em aumento da capacidade na estrutura existente e em novas instalações, as empresas podem optar por investir na construção ou na expansão de instalações. Tais investimentos podem ocorrer em unidades industriais, tanto de esmagamento quanto de refino, em estruturas de armazenagem ou ainda em terminais intermodais ou de exportação. Essas decisões dizem respeito apenas aos investimentos internos da empresa, não considerando investimentos governamentais, como, por exemplo, construção ou ampliação de ferrovias, duplicação de trechos rodoviários ou construção de novos portos.

Diante do contexto exposto, é possível afirmar que a utilização de modelos e aplicação de técnicas de Pesquisa Operacional para a construção de ferramentas gerenciais e de apoio à tomada de decisão no agronegócio da soja podem ser benéficas para as empresas que atuam no setor. As motivações para isso não se devem apenas ao aspecto econômico envolvido nas atividades citadas, mas estão relacionadas principalmente à complexidade desses problemas práticos. Sendo assim, o presente trabalho propõe abordagens de otimização baseadas em modelos de programação matemática para esses problemas, úteis especialmente para a gestão de operações de curto prazo e planejamento de capacidade no médio e longo prazo de empresas que atuam no agronegócio da soja no Brasil.

Esses modelos se baseiam na teoria de fluxos em redes e em programação linear inteira mista, podendo considerar um único produto ou múltiplos produtos em redes multiestágios e multiperíodos. Com relação à modelagem, uma diferença importante entre esses modelos está no fato dos modelos de gestão de operações de curto prazo serem considerados modelos de fluxos, isto é, prescrevem o fluxo da soja e seus derivados, quando for o caso, por uma rede física dada. Em contrapartida, os modelos utilizados para apoiar decisões de planejamento de capacidade a médio e longo prazos estão relacionados ao projeto da rede, permitindo a inserção

de novos vértices e arcos, de forma a minimizar não somente os custos desses investimentos realizados, mas também os custos de fluxos de produtos durante o uso da nova configuração de rede resultante. As principais diferenças entre esses dois grupos são sumarizadas pela Tabela 1.1.

Tabela 1.1 – Diferenças entre os modelos de gestão de operações e planejamento de capacidade

Aspectos Principais	Gestão de operações	Planejamento de capacidade
Tipo de modelo	Fluxos em redes	Localização de instalações
Horizonte considerado	Curto prazo	Médio a longo prazos
Representação dos dados	Pulverizados	Agregados
Períodos de planejamento	Dias e semanas	Meses e anos
Principais atividades	Roteirizar fluxos e dimensionar lotes de produção	Expandir capacidade e localizar novas instalações

Em relação ao horizonte de planejamento, esses modelos apoiam, no nível operacional, decisões de roteirização de fluxos na rede física disponível, dimensionamento e alocação de lotes de produção às instalações disponíveis e alocação de produtos aos estoques. Os modelos de gestão de operações de curto prazo, dessa forma, são modelos voltados às atividades diárias e semanais dessas empresas, fornecendo programações de curto prazo relativas à realização do transporte intermodal da soja e seus derivados, prescrevem as movimentações de entrada e saída de estoques desses produtos das estruturas de armazenagem disponíveis e fornecem o dimensionamento dos lotes de produção nas indústrias de esmagamento e refino, caso a empresa atue sobre todo o complexo e não apenas na exportação da soja em grão. O horizonte de planejamento, dessa forma, é discreto e deve ser dividido em períodos curtos, como em horas ou dias, dependendo da duração das operações envolvidas.

Nesse contexto, os dados a serem utilizados precisam ser bastante detalhados, contendo informações de oferta de soja, de pedidos firmes para atendimento da demanda por cada produto, além dos custos relativos a todos os serviços a serem realizados ao longo do complexo durante o período de planejamento desejado. O conhecimento preciso dos sistemas logístico e produtivos disponíveis também é essencial. Dados sobre as distâncias a serem percorridas, com boas estimativas de tempos de viagem, capacidades de escoamento da soja e seus derivados em cada um dos modais são imprescindíveis. Capacidades e tempos de transbordo nos terminais intermodais e portos, capacidades de estoque, capacidades e tempos necessários para esmagamento da soja e refino do óleo bruto também devem ser conhecidos para garantir a

qualidade dos planos de curto prazo obtidos pelos modelos e para garantir que esses possam ser executados na prática.

Nos modelos relacionados ao planejamento de capacidade, que envolvem decisões a serem implantadas em alguns anos, as decisões apoiadas dizem respeito à localização e dimensionamento de instalações, sendo possível alocar unidades industriais, quando se aplicar ao escopo de atuação da empresa, unidades de armazenagem e terminais intermodais. O horizonte de planejamento, nesse caso, também é discreto, mas dividido em meses, para apoiar decisões em períodos de alguns anos de investimento. Os dados, dessa forma, são considerados de forma mais agregada, podendo-se desprezar os tempos de transporte e industrialização, desde que haja capacidade suficiente para comportar os fluxos mensais. Além dos dados agregados relativos às capacidades e custos de utilização das vias de transporte, dos terminais intermodais, armazéns e indústrias, é preciso levantar dados relativos aos investimentos que podem ser realizados. Esses custos, em geral, são de grande magnitude quando comparados aos custos de uso das estruturas existentes e dependem não só do tipo de instalação a ser aberta, mas também da sua localização, do tipo de tecnologia utilizada e da capacidade a ser instalada.

No caso das empresas transportadoras e exportadoras de soja em grão, existe o fluxo de um único produto. Ao se inserir o contexto industrial, outros três produtos passam a ser considerados pelas empresas processadoras de soja: o farelo, o óleo bruto e o óleo refinado. Tanto no contexto de decisões de curto quanto de médio a longo prazos dessas empresas, o objetivo é a minimização dos custos de produção e logística, estando o sistema sujeito a restrições que envolvem o atendimento das demandas, o balanço de massa dos produtos considerados e limitações de capacidade. Também são considerados os tempos de transporte, transbordo e industrialização nos modelos operacionais. Nos modelos de planejamento de capacidade, por sua vez, a discretização do horizonte de planejamento em períodos permite, por exemplo, a indicação do momento em que uma nova instalação deve entrar em operação para garantir a minimização dos custos de acordo com a demanda projetada.

Pretende-se contribuir, dessa forma, para suprir as necessidades reais por modelos de planejamento para as empresas atuantes no agronegócio da soja no Brasil. Para tanto, considera-se que o foco de decisão recai sobre a administração da empresa, para administração e investimento privado, de acordo com o ramo de atuação e o horizonte de tempo que se deseja planejar. São apresentados testes computacionais com exemplares baseados em dados

secundários, ou seja, coletados indiretamente, para todos os modelos, além da aplicação de métodos de resolução e testes para os modelos de gestão de operações de curto prazo e de planejamento de capacidade no complexo agroindustrial da soja com alocação de estoques.

1.1 Objetivos

Têm-se como objetivo estudar e desenvolver abordagens de otimização baseadas em dois conjuntos de modelos de programação matemática para auxílio à gestão de operações de curto prazo e de planejamento de capacidade, respectivamente, de empresas atuantes no agronegócio da soja no Brasil. As abordagens de otimização desenvolvidas devem suprir lacunas teóricas e práticas no que diz respeito ao gerenciamento de atividades de transporte, armazenagem e industrialização da soja. Em contextos de curto prazo, é necessário encontrar os fluxos de produtos entre essas operações que forneçam o custo mínimo. Em contextos de médio e longo prazos, é preciso prever a necessidade de expansão e a criação de novas instalações da empresa, dimensionando suas capacidades e indicando quando estas devem entrar em operação.

As empresas representadas nos modelos podem ser diferenciadas de acordo com o escopo de atuação, que pode estar voltado apenas ao mercado da soja em grão ou incluir os seus produtos derivados, resultando em modelos de fluxos em rede monoproduto e multiproduto, respectivamente. A formulação desses modelos foi apoiada em uma estrutura de representação em redes, altamente esparsa, desenvolvida para melhor representar o sistema estudado, sendo possível representar várias características específicas do complexo agroindustrial da soja, como a intermodalidade do transporte e a formação de fluxos multiproduto a partir das indústrias de esmagamento e refino.

Devido à indisponibilidade de dados diretamente coletados ou fornecidos pelas empresas, todos os modelos foram testados utilizando exemplares baseados em dados secundários obtidos de outros estudos da literatura, além de instituições governamentais e de empresas ou cooperativas, e também outros exemplares, que foram gerados aleatoriamente ou adaptados de problemas realistas disponíveis na literatura. Além disso, aprofundaram-se os estudos computacionais e o desenvolvimento e aplicação de métodos de resolução para dois dos modelos de planejamento de capacidade no complexo agroindustrial da soja. Para a realização

dos experimentos computacionais, foi utilizado um *software* de otimização de última geração. Para os experimentos com os modelos, esse *software* dispõe de um poderoso algoritmo *branch-and-cut*, tornando os resultados obtidos extremamente confiáveis em relação aos tempos e limites de resolução reportados. Para o desenvolvimento de métodos aproximados de resolução, investiu-se em duas heurísticas baseadas em teoria de programação inteira, *relax-and-fix* e *fix-and-optimize*, que foram implementadas dentro de um ambiente de programação de *scripts* do próprio *software* de otimização utilizado.

1.2 Justificativa

No Brasil, devido à sua extensão territorial e à necessidade de se transportar grandes quantidades de produtos por longas distâncias, há grande interesse na realização de estudos relacionados ao transporte de cargas. O interesse em estudos relativos ao uso de redes de transporte intermodal para a exportação de diversos produtos é crescente e o tema tem sido pesquisado em diversos programas de pós-graduação, incluindo os de Engenharia de Produção.

No entanto, quase não há trabalhos na literatura explorando a modelagem de problemas de otimização para apoiar decisões de empresas que atuam nessas cadeias, quer seja com foco operacional, quer seja com foco estratégico. Os modelos encontrados na literatura, em geral auxiliam a tomada de decisão com foco governamental neste setor, notadamente com o desenvolvimento de modelos de planejamento de longo prazo, baseados em modelos de localização de instalações. No contexto do agronegócio da soja, podem ser encontrados, por exemplo, trabalhos relacionados à localização de armazéns de soja (FERRARI, 2006) e de localização de terminais especializados em exportação de soja e derivados (DUBKE, 2006). Mais recentemente, foi apresentado um modelo de localização de terminais intermodais para a exportação da soja em grão no Brasil (ALMEIDA, 2010), que utiliza uma representação do sistema intermodal usando uma rede altamente esparsa (AMARAL et al., 2012).

Assim, o estudo proposto nesta tese possibilita um melhor aproveitamento, no curto prazo, da estrutura logística disponível das empresas que atuam na agroindústria da soja no Brasil. Como pode ser visto adiante, no planejamento de capacidade, um dos diferenciais deste estudo em relação aos modelos disponíveis na literatura está no caráter dinâmico do horizonte de

planejamento. Essa característica é necessária à modelagem da sazonalidade do ciclo de plantio, colheita, industrialização e comercialização da soja e para a previsão dos momentos adequados para a inserção de novos terminais intermodais, estruturas de armazenagem e unidades industriais na rede física para uma empresa que for submetida a essas análises.

Além disso, essa pesquisa contribui com a criação de um conjunto de ferramentas – formada por modelos matemáticos e métodos de resolução – com ferramental teórico consolidado, por estar baseado na conhecida teoria de fluxos em redes e na programação linear inteira mista. Esses modelos e métodos de resolução, uma vez desenvolvidos e testados, podem ser diretamente aplicados ou facilmente adaptados para aplicações, inclusive para uso em outros tipos de cadeias de suprimento, não necessariamente agroindustriais. Por exemplo, no Brasil, vários segmentos da mineração, como o de ferro e o de alumínio, também possuem lógicas de extração, transporte, industrialização e distribuição semelhantes à da soja (PIMENTEL, 2011). Outro argumento é o de que a realização dessa pesquisa pode servir de motivação à realização de projetos de pesquisa e desenvolvimento tecnológico com maior foco empírico e em coleta de dados de empresas do setor, uma vez que torna possível a visualização da importância e da aplicabilidade de dados mais acurados e detalhados que aqueles disponibilizados atualmente por órgãos governamentais e de associações industriais.

1.3 Método de Pesquisa

Esta tese utiliza abordagem de pesquisa quantitativa, pois está voltada à criação de modelos matemáticos e à aplicação de métodos de resolução para auxílio aos planejamentos operacional e estratégico de empresas que atuam no complexo agroindustrial da soja no Brasil. Devido a essas características e objetivos, a mesma foi conduzida segundo métodos de desenvolvimento de modelagem e simulação, em que modelos matemáticos foram desenvolvidos para representar situações encontradas em sistemas reais (MORABITO e PUREZA, 2009).

A metodologia adotada no desenvolvimento dessa pesquisa, mais especificamente a Pesquisa Operacional, tem sido utilizada para a análise e resolução de problemas complexos, sendo realizada por um ciclo de melhorias, em que se parte de problemas idealizados para, em seguida, realizar adaptações até que o problema possa ser aplicado à realidade (BERTRAND e

FRANSOO, 2002). A Figura 1.1 mostra um esquema para o desenvolvimento dessas pesquisas, composta de quatro fases. Na primeira fase, é desenvolvido um modelo conceitual para o problema a ser solucionado, em que a oportunidade de pesquisa a ser explorada é descrita com o suporte de estudos prévios, consultados na literatura pertinente. A seguir, os modelos matemáticos passam por um ciclo de adequação e melhorias, em que se parte de um ou mais modelos de referência, até o grau desejado de captura da realidade. Na terceira fase, esses modelos devem ser implementados e resolvidos com o auxílio de algum método computacional, neste caso. Na quarta e última fase, esses modelos devem ser testados, verificados e, quando possível, validados na prática.

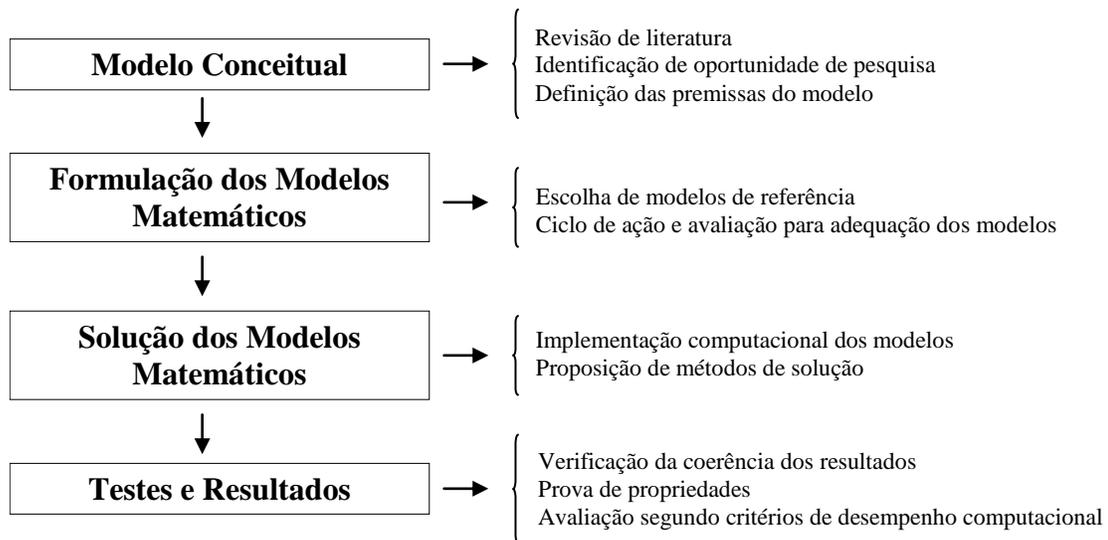


Figura 1.1 – Fases de pesquisas baseadas em modelagem e simulação

Para o desenvolvimento desta tese, foi utilizado o protocolo de pesquisa proposto por Law e Kelton (2000), que consiste nas seguintes atividades:

- **Conceitualização:** Essa primeira atividade consiste na representação da realidade, ou de partes dela, formalizando um modelo conceitual. Nessa etapa, foi feita uma revisão de literatura bastante abrangente, englobando problemas de planejamento em cadeias de suprimento agroindustriais, transporte intermodal e diversos temas relacionados ao agronegócio da soja no Brasil. O material pesquisado é composto de artigos, teses e

dissertações já publicados, *sites* de órgãos governamentais e entidades privadas. Além disso, a participação em grupos de discussão, seminários e reuniões do Projeto ALOGTRANS possibilitou o contato com professores e alunos de pós-graduação envolvidos com outras universidades, como a UFMS, a UnB e a PUC Rio. Esse projeto foi financiado pela FINEP entre 2008 e 2010 e tinha como objetivo desenvolver modelos matemáticos e de simulação que auxiliassem no escoamento da safra de soja brasileira que é destinada à exportação. As informações colhidas foram utilizadas para caracterização da cadeia logística, das empresas atuantes no setor e para a geração de dados e cenários com características realistas;

- **Coleta de Dados:** Consiste na obtenção de dados históricos e parâmetros para alimentação dos modelos. Como os dados quantitativos a que se teve acesso não foram suficientes para a formação de um banco de dados completo para testes dos modelos, os dados coletados foram organizados e utilizados para dois propósitos. O primeiro, de construir cenários realistas, a serem utilizados em testes de verificação e aplicabilidade dos modelos matemáticos. E o segundo, de gerar embasamento para a construção de exemplares gerados aleatoriamente, que pudessem formar um banco de dados com maior variabilidade em termos de tamanho da rede e perturbação dos parâmetros, e possibilitando a análise de diferentes *trade-offs* envolvidos;
- **Modelagem:** Consiste na tradução de um modelo conceitual em um modelo matemático, científico. Essa fase contou com 4 etapas, a saber: a criação de um modelo de representação para o complexo agroindustrial da soja no Brasil que resultou em uma representação em rede altamente esparsa; a modelagem dos problemas de gestão de operações de curto prazo, que têm por finalidade gerenciar as atividades diárias e semanais das empresas; a modelagem dos problemas de planejamento de capacidade, que visam à avaliação dos melhores locais e períodos para investimento em

novas estruturas físicas; construção das heurísticas de programação inteira *relax-and-fix* e *fix-and-optimize*, para resolução de exemplares de maior porte do modelos desenvolvidos para auxílio aos planejamentos operacional e estratégico;

- **Experimentos:** Fase caracterizada pela obtenção de soluções para os modelos matemáticos. Foram realizados com dados realistas e gerados aleatoriamente, devido à indisponibilidade de acesso a dados reais suficientes para a formação de cenários para testes;
- **Validação:** Consiste na verificação do nível de adequação dos modelos à realidade, ou recorte da realidade, considerada. Foram feitos experimentos para comparar e analisar os efeitos observados nas saídas dos modelos, quando se realizam perturbações nos dados de entrada, e comparação com relatos da literatura;
- **Documentação e *feedback*:** etapa formada pela análise da coerência entre as soluções obtidas e os modelos conceituais. Englobou as discussões e análises dos experimentos, os ajustes feitos ao longo do desenvolvimento do estudo e a verificação dos modelos e a redação do texto da tese.

Ainda de acordo com Bertrand e Fransoo (2002) e Morabito e Pureza (2009), essa pesquisa pode ser classificada como um estudo quantitativo de modelagem empírico-normativa. Em uma pesquisa empírica, é primordial se assegurar a adesão entre as observações e as ações do sistema real e o modelo elaborado para representa-lo. Assim, é preciso testar em processos reais a validade de modelos científicos obtidos em pesquisas teóricas, ou seja, a teoria e a prática devem ser consideradas em conjunto, não de forma isolada. O caráter normativo dessa pesquisa se refere ao desenvolvimento de políticas, estratégias e ações que melhorem a situação corrente do sistema estudado. Foram adaptadas várias classes de modelos da literatura para representar uma nova classe de problemas práticos. Como já foi dito, esses modelos de apoio à gestão de operações de curto prazo e planejamento de capacidade para o complexo agroindustrial da soja no Brasil foram

desenvolvidos com base em modelos de fluxos em redes e de localização de instalações, amplamente explorados na literatura.

1.4 Organização do Texto

Este texto está organizado em nove capítulos. Neste Capítulo 1, foram abordados os aspectos preliminares do trabalho, com uma breve apresentação do tema de estudo, os objetivos e a justificativa para o desenvolvimento de modelos de otimização para auxiliar decisões pertinentes à gestão de operações de curto prazo e planejamento de capacidade a médio e longo prazos de empresas que atuam no agronegócio da soja no Brasil.

O Capítulo 2 é dedicado à revisão da literatura relevante para o presente estudo. Primeiramente, são discutidas de forma resumida várias linhas de pesquisa no Brasil que vem sendo realizadas no agronegócio da soja. Essas pesquisas, em sua maioria do tipo descritiva, são classificadas e brevemente analisadas. Em seguida, se estabelece um panorama geral sobre os trabalhos relacionados à modelagem de cadeias de suprimento agroindustriais, transporte intermodal e modelagem matemática no agronegócio da soja no Brasil. São revisados e apresentados alguns modelos da literatura que foram utilizados como referência, assim como são discutidas as dificuldades de aplicação desses modelos à realidade do agronegócio da soja no Brasil.

O Capítulo 3 serve à caracterização do complexo agroindustrial da soja no Brasil. São discutidos, brevemente, alguns aspectos históricos relativos à expansão das áreas de cultivo de soja e o desenvolvimento de corredores de escoamento para a soja em grão e seus produtos derivados. A partir daí, são caracterizadas as atividades das empresas que atuam no complexo agroindustrial da soja no Brasil, seja apenas na exportação da soja ou daquelas que a industrializam. Em seguida, são discutidas as atividades e desafios pertinentes a essas empresas, no desenvolvimento de suas atividades e no atendimento aos seus mercados consumidores. Ao final do capítulo, são apresentadas particularidades do complexo e perspectivas de modelagem do sistema esboçado, destacando-se alguns possíveis motivos relacionados às dificuldades de obtenção de dados para aplicações práticas.

O Capítulo 4 tem por objetivo formalizar uma estrutura de rede criada para representar o complexo agroindustrial da soja no Brasil. Com base em características e premissas discutidas no Capítulo 3 e nos trabalhos de Arnold et al. (2001, 2004), apresentados no Capítulo 2, definem-se conjuntos de vértices e arcos para representar a estrutura física que liga as regiões de oferta de soja aos mercados consumidores da soja em grão e seus produtos derivados, interligados por uma rede de transporte intermodal. Essa rede resultante apresenta uma estrutura altamente esparsa, que é acrescida de outros elementos específicos do sistema que se deseja representar: os armazéns, as indústrias e esmagamento e refino. Essa estrutura criada, com alto grau de esparsidade e de representação da realidade, é utilizada na modelagem dos problemas de gestão de operações de curto prazo e planejamento de capacidade, formulados nos dois capítulos seguintes.

No Capítulo 5, apresentam-se os problemas de gestão de operações de curto prazo considerados e propõem-se os modelos matemáticos usados para a sua representação. Conforme mencionado anteriormente, esses modelos são divididos em dois tipos de fluxos em redes, o monoproduto e o multiproduto. A utilização de cada tipo de modelo é definida de acordo com o foco de atuação da empresa no complexo agroindustrial, sendo o primeiro grupo indicado para empresas que atuam apenas nas etapas de transporte, armazenagem e exportação da soja em grão, enquanto que o segundo grupo é indicado para empresas que participam do processo de industrialização da soja. São discutidos, ainda, os níveis de detalhamento dos custos considerados, os tipos de processos industriais e as estruturas de armazenagem disponíveis. Além disso, na última seção do capítulo são discutidos alguns aspectos teóricos e práticos a respeito dos modelos que foram formulados.

No Capítulo 6, são modelados os problemas de planejamento de capacidade, que dizem respeito aos investimentos que essas empresas podem realizar em suas instalações físicas. Assim como no Capítulo 5, os modelos são divididos de acordo com o foco de atuação da empresa sobre o complexo agroindustrial da soja, considerando investimentos em terminais intermodais, unidades industriais e estruturas de armazenagem. A utilização de modelos de caráter dinâmico, com o horizonte de planejamento dividido em períodos, permite a indicação do momento em que as novas instalações planejadas devem entrar em operação. Também são apresentadas, para cada modelo proposto, formulações que consideram a possibilidade de avaliação de alternativas discretas de investimento. Da mesma forma como no capítulo anterior,

alguns aspectos teóricos e práticos a respeito desses modelos são apresentados e discutidos na última seção do capítulo.

No Capítulo 7 são apresentados e analisados os testes computacionais realizados com os modelos propostos nos Capítulos 5 e 6. Primeiramente, são discutidos alguns resultados de testes realizados com o intuito de verificar a coerência dos modelos e ilustrar o potencial de análise dos mesmos. A seguir, descrevem-se características do programa gerador de exemplares e das diferentes variações aleatórias consideradas na construção dos diversos parâmetros requeridos para cada teste, tais como a escala do complexo agroindustrial, distribuição geográfica das instalações das empresas consideradas, padrões de oferta ao longo do tempo, distribuição das demandas internas e externas, limitações de capacidade e *trade-offs* entre os custos envolvidos no processo decisório de cada horizonte de planejamento. Depois disso, são apresentados testes de esforço computacional relacionados à avaliação de tempos de processamento necessário à obtenção da solução ótima para os problemas formulados e suas relaxações lineares. Resultados de outros testes, em que alguns parâmetros do *software* de otimização utilizado foram variados, também são apresentados e comparados aos demais testes realizados.

O Capítulo 8 é dedicado aos métodos e estratégias de resolução utilizados nos casos em que o *software* de otimização utilizado não conseguiu encontrar as soluções ótimas para os problemas em tempo computacional aceitável, ou seja, para os problemas de planejamento de capacidade. Inicia-se o capítulo com uma breve revisão da utilização de métodos de resolução, em especial aqueles baseados em heurísticas de programação inteira, utilizados para resolver problemas relacionados à gestão de complexos agroindustriais. Em seguida, são apresentados os métodos de solução utilizados nesta tese: *relax-and-fix* e *fix-and-optimize*. Uma vez definidos esses métodos, são apresentadas as estratégias de solução desenvolvidas e utilizadas para cada método, bem como os resultados obtidos para o modelo de localização de terminais intermodais, armazéns, esmagadoras e refinarias, que foi escolhido para a realização dos testes, além da sua variação que considera alternativas discretas de investimento. Por fim, os resultados obtidos são comparados e analisados, tanto com a abordagem exata do Capítulo 7 quanto em relação ao desempenho de cada um dos métodos e estratégias testados.

Finalmente, no Capítulo 9 são apresentadas as conclusões desta tese e as perspectivas para desenvolvimento de trabalhos futuros. A principal contribuição desta tese está na criação de um conjunto de modelos de otimização de planejamento, com foco nas decisões a

serem tomadas por gestores de empresas atuantes no complexo agroindustrial da soja, uma vez que os demais trabalhos encontrados na literatura se voltaram apenas às decisões governamentais no complexo agroindustrial da soja. De posse desses modelos e dos métodos e estratégias de solução propostos e computacionalmente testados, abrem-se oportunidades principalmente de realização de estudos de casos reais e a aplicação. Outras oportunidades seriam o uso e aplicação desses modelos e métodos a outras cadeias de suprimento, não necessariamente agroindustriais, podendo envolver alguma etapa de adaptação e modificação dos modelos e métodos.

2 REVISÃO DE MODELOS DA LITERATURA

Um complexo de suprimentos agroindustrial engloba atividades de planejamento da produção, distribuição, processamento e *marketing* de produtos de origem agrícola, desde a plantação até o consumidor final. Algumas características específicas da agroindústria, como qualidade e segurança dos alimentos ou variabilidades sazonais na produção, no preço e na demanda, contribuem para o aumento de complexidade do complexo e resultam em dificuldades adicionais de gerenciamento (AHUMADA e VILLALOBOS, 2009). Quando se trata do complexo agroindustrial da soja no Brasil, estudos de modelagem considerando todo o complexo agroindustrial são pouco explorados, embora existam diversos trabalhos relacionados à proposição de abordagens de otimização da rede de exportação da soja em grão. Vários motivos podem ser relacionados a esse fato, dentre os quais acredita-se que a indisponibilidade de dados seja o fator preponderante.

Porém, excluindo-se as dificuldades de desenvolvimento de estudos de caso reais sobre esse complexo, as oportunidades de desenvolvimento de abordagens de otimização para os problemas relacionados ao complexo da soja são muitas. Se, por um lado, o complexo agroindustrial da soja apresenta características específicas que requerem o uso de modelos dedicados, por outro lado, também possibilita o uso de modelos já bastante consolidados, como os de fluxos em redes monoproduto e multiproduto, além de permitir a adaptação de classes de modelos ainda em desenvolvimento, como a modelagem de complexos de suprimento agroindustriais e de problemas de transporte intermodal.

O propósito desse capítulo é fornecer um panorama geral sobre o desenvolvimento de abordagens de otimização nos segmentos que se relacionam ao foco da tese. Nas seções que se seguem, revisa-se de forma resumida o estado da arte da modelagem de complexos agroindustriais, de problemas de transporte intermodal e da modelagem do complexo agroindustrial da soja no Brasil. Além disso, são apresentados alguns dos modelos utilizados como referência para o desenvolvimento dos modelos apresentados nos Capítulos 5 e 6. Cada um desses modelos detalhados nas seções que seguem foram escolhidos como exemplos devido às suas importâncias em relação à forma de modelagem do problema e da utilização de teorias relacionadas aos fluxos em rede e programação inteira mista. Na Seção 2.1 são tratados os modelos de complexos de suprimentos agroindustriais de produtos não perecíveis, da qual a soja

faz parte. Na Seção 2.2, são tratados os problemas de transporte intermodal, intimamente ligados ao escoamento da soja e seus derivados, tanto para exportação, quanto para atendimento das demandas domésticas. Na Seção 2.3, visita-se a literatura referente à modelagem do complexo agroindustrial da soja no Brasil. A Seção 2.4 encerra o capítulo, com alguns comentários e perspectivas de desenvolvimento de estudos relacionados à logística no complexo agroindustrial da soja no Brasil.

2.1 Modelagem de Complexos de Suprimento Agroindustriais de Produtos Não Perecíveis

A modelagem de complexos agroindustriais é um tema relativamente recente e tem se desenvolvido mais acentuadamente nas duas últimas décadas. As pesquisas nesta área são altamente aplicadas e motivadas principalmente pelo investimento de empresas que atuam no setor. Em relação às abordagens utilizadas, são encontrados principalmente modelos matemáticos baseados na teoria de otimização em redes, sendo poucos os casos em que se torna necessário utilizar algum algoritmo de resolução desenvolvido especificamente para os problemas tratados nos estudos relatados na literatura.

Dentre os trabalhos publicados na área, encontram-se aplicações a uma grande diversidade de produtos, classificados basicamente como perecíveis e não perecíveis. Em relação ao foco do decisor sobre o complexo, o objetivo do trabalho pode estar voltado a diferentes horizontes de planejamento e a diferentes sistemas, podendo inclusive cobrir apenas alguns elos específicos. Informações adicionais sobre o tema podem ser encontradas em Lowe e Preckel (2004), que fazem uma revisão de problemas relativos à plantação, colheita e risco por parte do produtor. Mais recentemente, Ahumada e Villalobos (2009) apresentaram uma revisão com objetivos mais abrangentes, classificando os trabalhos de acordo com abordagens de otimização utilizadas, os tipos de produtos considerados e o escopo geral dos problemas estudados.

Alguns dos trabalhos revisados, assim como esta tese, são aplicados a produtos não perecíveis e estão preocupados com decisões de processamento, transporte e armazenagem ao longo do complexo. Dentre eles, Gigler et al. (2002) utilizaram um algoritmo de programação dinâmica com o objetivo de abastecer uma planta geradora de energia com biomassa de salgueiro, garantindo padrões estabelecidos de qualidade e aparência do produto. Jones et al. (2003)

propuseram e aplicaram um modelo de programação linear para o planejamento da produção de sementes de milho para uma empresa norte-americana. O objetivo foi planejar as atividades realizadas na América do Sul, cuja safra ocorre depois que as demandas na América do Norte são conhecidas. No Brasil, têm-se, por exemplo, os trabalhos de Junqueira e Morabito (2006, 2008, 2012), em que um modelo de otimização linear para o planejamento tático da produção, estocagem e logística de sementes de milho foi proposto e aplicado, utilizando dados de uma empresa do setor.

Outro trabalho interessante é o de Apaiah e Hendrix (2005), em que um modelo também de programação linear foi proposto e aplicado com sucesso a um complexo real holandês de produção e fornecimento de alimentos à base de proteína de ervilha. Algumas características desse modelo, tais como a consideração de etapas de produção e transporte ao longo do complexo, o uso do transporte intermodal e a obtenção de subprodutos secundários com valor comercial durante o processo industrial, fazem desse modelo uma referência importante para o desenvolvimento desta tese e por isso esse modelo é detalhado a seguir. Apesar das semelhanças, existem duas importantes diferenças em relação aos modelos desenvolvidos nesta tese para o complexo agroindustrial da soja no Brasil.

A primeira diferença está no fato do complexo ser subdividido em níveis, um para transporte, outro para industrialização, outro para transporte, etc., uma vez que os problemas tratados nesta tese não podem ser modelados dessa forma, pois nem toda a soja passa por etapas de armazenagem e industrialização, podendo fluir pela rede de transporte e transbordo sem passar por essas etapas. A segunda está relacionada ao fato do horizonte de decisão ser estático e monopérido, ou seja, o planejamento é feito para uma única configuração do sistema e não para um horizonte dinâmico e discreto, dividido em múltiplos períodos, em que cada período de planejamento apresenta uma configuração distinta de oferta e demanda.

2.1.1 O modelo de Apaiah e Hendrix

Conforme mencionado, Apaiah e Hendrix (2005) desenvolveram um modelo matemático para a resolução de um problema prático, que integra o dimensionamento de lotes de produção e o planejamento do transporte intermodal em um complexo agroindustrial de

alimentos à base de proteína de ervilha. O complexo foi dividido em três níveis de produção, como mostrado na Figura 2.1, a saber: um primeiro nível, em que as atividades realizadas são referentes à produção, colheita, limpeza e secagem das ervilhas, que ocorre em um conjunto de unidades de produção primária; um segundo nível, também com um conjunto de fábricas disponíveis, que consiste na primeira etapa de industrialização, na qual são produzidos simultaneamente proteína concentrada de ervilha e amido; e um último nível industrial, composto por fábricas que transformam a proteína concentrada em produtos alimentícios, para os quais se tem uma demanda conhecida. Interligando essas etapas de produção, existem dois estágios de transporte intermodal, que podem ser realizados utilizando-se os modais rodoviário, ferroviário, hidroviário fluvial e hidroviário marítimo.

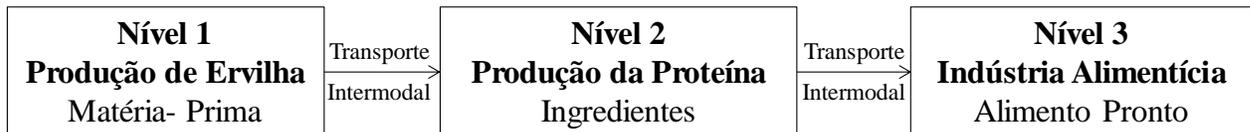


Figura 2.1 – Níveis de decisão do modelo de Apaiah e Hendrix

Para a formulação do modelo, são necessários os seguintes dados de entrada:

Conjuntos:

- I = Unidades de produção primária de ervilha
- J = Fábricas de proteína concentrada de ervilha
- K = Fábricas de alimentos à base de proteína de ervilha
- N = Modais de transporte

Parâmetros:

- c_i = Custo da ervilha produzida na unidade de produção primária i
- t_{ijn} = Custo de transporte da ervilha seca da unidade de produção primária i para a fábrica de proteína concentrada j utilizando o modal n

- p_j = Custo da proteína concentrada de ervilha produzida na fábrica j
 e_{jkn} = Custo de transporte de proteína concentrada de ervilha transportada da fábrica j para a fábrica k utilizando o modal n
 a_k = Custos de produção dos alimentos à base de proteína de ervilha produzidos na fábrica k
 v_j = Preço de venda do amido produzido na fábrica j
 d = Demanda total do mercado por alimentos à base de proteína de ervilha
 b = Quantidade de proteína de ervilha por tonelada de alimento à base de proteína de ervilha
 ε = Quantidade de ervilha por tonelada de ervilha transportada
 β = Quantidade de proteína de ervilha por tonelada de ervilha seca transportada
 α = Quantidade de amido produzida por tonelada de ervilha seca

São definidas as seguintes variáveis de decisão para o problema:

- ρ_i = Quantidade de ervilha seca produzida na unidade de produção primária i
 σ_{ijn} = Quantidade de ervilha seca transportada da unidade de produção primária i para a fábrica de proteína concentrada j utilizando o modal n
 π_j = Quantidade de proteína concentrada de ervilha produzida na fábrica j
 δ_{jkn} = Quantidade de proteína concentrada de ervilha transportada da fábrica j para a fábrica k utilizando o modal n
 ω_k = Quantidade de alimentos à base de proteína de ervilha produzidos na fábrica k
 τ_j = Quantidade de amido produzido na fábrica j

O modelo matemático é descrito pelas equações (2.1) a (2.13), a seguir:

$$\text{Min} \sum_{i \in I} c_i \rho_i + \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \sum_{n \in N} t_{ijn} \delta_{ijn} + \sum_{j \in J} p_j \pi_j + \sum_{j \in J} \sum_{k \in K} \sum_{n \in N} p_{jkn} \sigma_{jkn} + \sum_{k \in K} a_k \omega_k - \sum_{j \in J} v_j \tau_j \quad (2.1)$$

Sujeito a:

$$\sum_{k \in K} \omega_k = d \quad (2.2)$$

$$\sum_{j \in J} \sum_{n \in N} \delta_{jkn} = b \omega_k \quad \forall k \in K \quad (2.3)$$

$$\sum_{k \in K} \sum_{n \in N} \sigma_{ijn} \leq \pi_j \quad \forall j \in J \quad (2.4)$$

$$\varepsilon \sum_{i \in I} \sum_{n \in N} \sigma_{ijn} \geq \pi_j \quad \forall j \in J \quad (2.5)$$

$$\sum_{j \in J} \sum_{n \in N} \sigma_{ijn} \leq \beta \rho_i \quad \forall i \in I \quad (2.6)$$

$$\tau_j = \alpha \sum_{i \in I} \sum_{n \in N} \sigma_{ijn} \quad \forall j \in J \quad (2.7)$$

$$\rho_i \geq 0 \quad \forall i \in I \quad (2.8)$$

$$\sigma_{ijn} \geq 0 \quad \forall i \in I, \forall j \in J, \forall n \in N \quad (2.9)$$

$$\pi_j \geq 0 \quad \forall j \in J \quad (2.10)$$

$$\delta_{jkn} \geq 0 \quad \forall j \in J, \forall k \in K, \forall n \in N \quad (2.11)$$

$$\omega_k \geq 0 \quad \forall k \in K \quad (2.12)$$

$$\tau_j \geq 0 \quad \forall j \in J \quad (2.13)$$

A função objetivo (2.1) minimiza a soma dos custos de produção e transporte. A restrição (2.2) garante o atendimento da demanda por alimentos à base de proteína de ervilha. As restrições (2.3) a (2.5) fazem o balanço de massa nas fábricas, que produzem a proteína concentrada de ervilha. A restrição (2.3) garante que as quantidades de proteína de ervilha transportadas a partir das fábricas são iguais às quantidades de proteína de ervilha utilizadas para fabricar os produtos à base de proteína de ervilha em cada fábrica k . As restrições (2.4) garantem que as quantidades transportadas de proteína de ervilha não podem exceder às quantidades fabricadas em cada fábrica j . As restrições (2.5) impedem que a quantidade produzida de proteína concentrada de ervilha exceda à quantidade de ervilha seca que chega das unidades de produção primária de ervilha. Em (2.6) garante-se que as quantidades de ervilha seca transportada para as fábricas de proteína de ervilha não excedam as quantidades ofertadas de ervilha nas unidades de produção primária, considerando as perdas relacionadas à colheita e ao manuseio das ervilhas. As restrições (2.7) garantem o balanço de massa relacionado à produção de amido, que é um subproduto da produção de proteína de amido. Em (2.8) a (2.13) descrevem-se os domínios das variáveis, que são todas não negativas.

2.2 Modelagem de Problemas de Transporte Intermodal

O termo transporte intermodal pode ser definido como o movimento de cargas entre uma origem e um destino por pelo menos dois modais diferentes (CHANG, 2008). No Brasil, de acordo com a Lei 9.611/98, a denominação correta é transporte multimodal, devendo o serviço logístico prestado ser regido por um contrato único para todo o percurso. Além do transporte, o operador logístico multimodal pode oferecer serviços de coleta, consolidação ou desagregação de carga, armazenagem e entrega (ANTT, 2010). Apesar disso, utilizar-se-á aqui a denominação transporte intermodal, que é bem usual na comunidade científica.

Macharis e Bontekoning (2004) formalizaram algumas classes de problemas de Pesquisa Operacional em transporte intermodal, definidos de acordo com o ponto de vista do tomador de decisões: (i) as operações com caminhões, voltadas às atividades de coleta e entrega de carga, entre os terminais intermodais e os produtores ou clientes finais; (ii) as operações intermodais, cujo foco é otimizar os fluxos internos aos terminais intermodais; (iii) as operações de infraestrutura de rede, que têm por objetivo planejar mudanças físicas e prever seus impactos nos fluxos do sistema; (iv) as operações de roteirização, que buscam a minimização dos custos de transporte, considerando somente a estrutura física já existente.

Dentre essas classes (i) – (iv), as duas últimas, (iii) e (iv), são as mais importantes para o desenvolvimento desta tese, e, aquelas em que mais trabalhos estão disponíveis na literatura. A terceira classe (iii), que é representada por problemas que envolvem decisões de infraestrutura da rede intermodal, concentram grande número de trabalhos, voltados principalmente para o projeto da rede e o estabelecimento de políticas de atribuição de fluxo. Dentre os principais modelos utilizados estão os de projeto de rede, localização de instalações, sistemas *hub-and-spoke* e equilíbrio espacial de preços.

De acordo com Arnold et al. (2001), esses trabalhos contemplam poucas aplicações práticas, embora estejam relacionados a modelos clássicos de otimização. Jaržemskienė (2007) observa que apesar da facilidade de formulação, esses problemas são em geral difíceis de resolver, devido ao aumento da complexidade computacional refletida pela

explosão do número de variáveis binárias e de restrições que ocorrem com crescimento da rede considerada.

Problemas de localização de terminais intermodais se encontram nessa classe e são considerados problemas referentes a horizontes de longo prazo. Dentre os artigos revisados, merecem destaque os de Arnold et al. (2001, 2004). No primeiro trabalho, foram discutidas seis formulações para o problema de localização de terminais em uma rede rodo-ferroviária. Posteriormente, uma formulação de menor complexidade computacional foi apresentada, juntamente com uma heurística, possibilitando o estudo de cenários reais na Península Ibérica. Esse modelo, que é uma referência importante para os modelos de otimização desenvolvidos nesta tese, é apresentado na seção que se segue.

Mais recentemente, têm-se, por exemplo, os trabalhos de Racunica e Winter (2005), que propuseram um modelo para localização de terminais utilizando uma rede *hub-and-spoke* com custos côncavos não lineares, e Limbourg e Jourquim (2009), que propuseram um modelo de p -medianas para o mesmo fim e apresentaram um estudo de caso realizado na Europa.

No Brasil, é possível encontrar modelos de equilíbrio espacial, transporte e armazenagem e localização de terminais. No primeiro grupo, destacam-se Ojima e Yamakami (2006) e Bulhões e Caixeta Filho (2000), que analisaram os fluxos da soja em diferentes contextos. Em relação ao uso de modelos de localização, têm-se trabalhos que exploram o transporte intermodal e a localização de armazéns, como Oliveira (2005), Ferrari (2006) e Xavier (2005), que consideraram a exportação de açúcar em São Paulo, de soja pelo Mato Grosso e de álcool combustível no Brasil, respectivamente. Almeida (2010) e Amaral et al. (2009) exploraram um modelo de localização de terminais intermodais para escoamento da soja em grão brasileira, utilizando uma estrutura esparsa para representação da rede física em múltiplos níveis, um para cada modal de transporte, que foi baseada nos estudos de Arnold et al. (2004).

Os trabalhos da quarta classe (iv), que têm por objetivo otimizar fluxos, estão baseados principalmente em modelos de programação linear ou simulação e utilizam cenários para contrastar políticas de transporte atuais com possíveis cenários ou situações futuras. Em otimização, destacam-se Ojima (2007), que comparou opções de frete rodoviário com rotas intermodais para exportar a soja do Mato Grosso, e Branco (2007), que avaliou cenários de demanda captável pela Estrada de Ferro Norte-Sul. Mais recentemente, Resende et al. (2010)

propuseram um modelo de seleção de rotas intermodais para exportação da soja em grão brasileira, considerando a minimização dos custos e tempos de viagem, de forma ponderada.

Só se tem conhecimento de um trabalho relacionado à classe (i) e de um outro trabalho, relacionado à classe (ii) no Brasil. Na classe (i), em que o objetivo é minimizar os trajetos dos caminhões das regiões de coleta e entrega até os terminais intermodais, o único modelo no Brasil que se tem conhecimento é o de Oliveira (2005), que desenvolveu um modelo de roteirização de veículos e localização de instalações para auxiliar a coleta da soja produzida em Campo Mourão, no Paraná. Já na classe (ii), o único estudo de que se tem conhecimento é o de Fajardo (2006). Enquanto os trabalhos dessa classe envolvem principalmente modelos de simulação, para estudar cenários referentes à organização dos fluxos internos aos terminais intermodais, Fajardo (2006) utilizou modelos de fluxos em redes para representar os fluxos de soja dentro de terminais intermodais, com o objetivo de avaliar diferentes tecnologias de transferência da soja de um modal para outro.

2.2.1 O modelo de Arnold et al.

O propósito do modelo de Arnold et al. (2004) é localizar terminais intermodais em uma rede rodo-ferroviária, em que fluxos de cargas fechadas devem ser transportadas entre uma origem e um destino definidos. Os terminais intermodais são representados por arcos, como mostrado na Figura 2.2, e devido às possibilidades de transbordo da rodovia para a ferrovia e vice-versa, são considerados bidirecionais. Esse modelo consiste em uma reformulação para o mesmo problema, que tinha grande número de variáveis binárias e, por ser considerado NP-difícil – extensão do problema de p -medianas, se tornava de difícil utilização na prática (Arnold et al., 2001). Essa reformulação, cuja principal diferença está na consideração dos terminais intermodais representados por arcos, possibilitou a redução do número de variáveis do problema e sua aplicações a um caso na Península Ibérica.

Para a formulação do modelo, são necessários os seguintes dados de entrada:

Conjuntos:

- P = Vértices da rede
 E^t = Arcos candidatos à instalação de um terminal intermodal
 A = Conjunto de pares (i, j) , de origem e destino para entrega de uma carga unitária
 $E_{(k)}^-$ = Conjunto de arcos que chegam ao vértice k
 $E_{(k)}^+$ = Conjunto de arcos que partem do vértice k

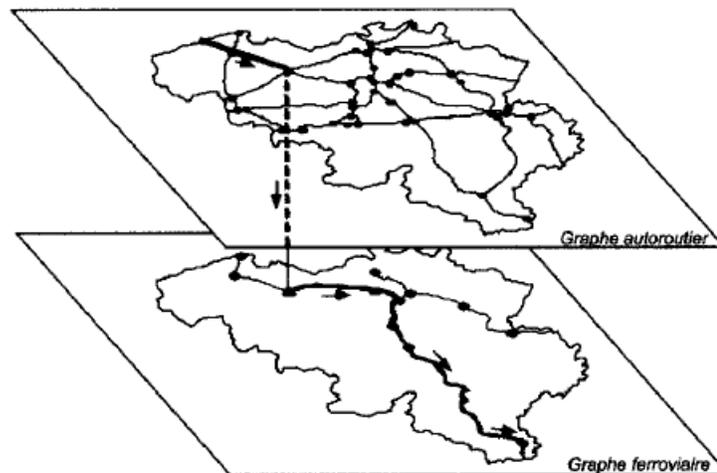


Figura 2.2 – Representação de terminais intermodais interligando duas redes de transporte

Fonte: Arnold et al. (2001)

Parâmetros:

- c_{ij}^e = Custo de transporte da origem i para o destino j passando pelo arco e
 q = Quantidade de terminais intermodais a serem instalados

São definidas as seguintes variáveis binárias:

- x_{ij}^e = $\begin{cases} 1, & \text{se o fluxo que parte da origem } i \text{ para o destino } j \text{ passa pelo arco } e \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases}$
 y^e = $\begin{cases} 1, & \text{se um terminal intermodal é aberto no arco } e \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases}$

O modelo pode, então, ser descrito pelas equações (2.14) a (2.22):

$$\text{Min} \sum_{(i,j) \in P} \sum_{e \in E} c_{ij}^e x_{ij}^e \quad (2.14)$$

Sujeito a:

$$\sum_{e \in E^t} y^e = 2q \quad (2.15)$$

$$\sum_{e \in E^+(i)} x_{ij}^e = 1 \quad \forall (i, j) \in P \quad (2.16)$$

$$\sum_{e \in E^-(k)} x_{ij}^e = \sum_{e \in E^+(k)} x_{ij}^e \quad \forall (i, j) \in P, k \notin (i, j) \quad (2.17)$$

$$\sum_{e \in E^-(i)} x_{ij}^e = 1 \quad \forall (i, j) \in P \quad (2.18)$$

$$x_{ij}^e \leq y^e \quad \forall (i, j) \in P, e \in E^t \quad (2.19)$$

$$y^e = y^{-e} \quad e \in E^t \quad (2.20)$$

$$y^e \in \{0, 1\} \quad e \in E^t \quad (2.21)$$

$$x_{ij}^e \geq 0 \quad \forall (i, j) \in P \quad (2.22)$$

A função objetivo (2.14) minimiza os custos de transporte e transbordo. Em (2.15), define-se o número de terminais intermodais a serem instalados, sendo que para cada terminal dois arcos em sentidos opostos devem ser abertos, a fim de possibilitar os transbordos rodoferroviários e ferro-rodoviários em cada terminal. Em (2.16), (2.17) e (2.18) são descritas as restrições de conservação de fluxo nos vértices da rede, respectivamente para as origens, os vértices da rede de transporte e para as demandas. Em (2.19) garante-se que só pode haver fluxo de cargas em um terminal intermodal se este estiver aberto, enquanto em (2.20) define-se que cada terminal intermodal aberto deve ter o fluxo permitido nos sentidos direto e reverso do arco e . As restrições (2.21) e (2.22) definem os domínios das variáveis; note que as variáveis definidas em (2.21) são binárias.

2.3 Modelagem do Complexo Agroindustrial da Soja no Brasil

O complexo agroindustrial da soja desperta muito interesse em pesquisas na área de otimização, mas não tem sido modelado de forma integrada, isto é, considerando a etapa de industrialização da soja em grão, gerando seus produtos derivados. Um dos poucos modelos encontrados na literatura que faz essa consideração é o de Dubke (2006), Dubke e Pizzolato (2011), apresentado a seguir. Neste estudo, foi proposto um modelo de programação inteira mista para a localização de terminais especializados para a exportação da soja e seus derivados, cujo objetivo é determinar os serviços e as capacidades a serem instalados nos principais portos brasileiros. Essas decisões dependem da lucratividade da soja em grão, do farelo e do óleo de soja, dos custos fixos de investimentos em armazéns, esmagadoras e refinarias, além dos custos variáveis de transporte na rede e dos serviços prestados nos terminais especializados.

2.3.1 O modelo de Dubke e Pizzolato

O modelo de Dubke (2006), Dubke e Pizzolato (2011), propõe a localização de terminais especializados para exportação de soja nos portos brasileiros. Um modelo de localização de instalações possibilita a escolha dos melhores locais, dentre um conjunto de candidatos, para a abertura desses terminais. Dentro de cada terminal especializado, um conjunto de serviços pode ser oferecido, como armazenagem, geração de farelo de soja e de óleo de soja refinado. O objetivo do modelo é a maximização do lucro obtido com a exportação desses produtos, no qual o *mix* de demanda a ser atendido deve ser decidido, a partir de um conjunto de ofertas de soja disponíveis e uma previsão de demanda máxima para cada produto, todas em países da Europa e Ásia. O transporte é realizado em dois níveis, como mostrado na Figura 2.3. Um primeiro nível de transporte interno representa as rotas entre as origens e os portos, e um segundo nível, realizado por transporte marítimo, faz o transporte dos produtos até as áreas de demanda. Em ambos os casos, as rotas mais baratas já estão definidas, sendo que no primeiro nível, a rota de menor custo pode ser intermodal.

Para a formulação do modelo, são necessários os seguintes dados de entrada:

Conjuntos:

- I = Conjunto de origens, constituídas de cidades, fábricas, cooperativas, terminais intermodais ou centros de distribuição
- J = Conjunto de plataformas logísticas, localizados nos portos
- K = Conjunto de pontos de destino, representado pelos clientes internacionais
- M = Conjunto de insumos
- Q = Conjunto de produtos
- S = Conjunto de serviços

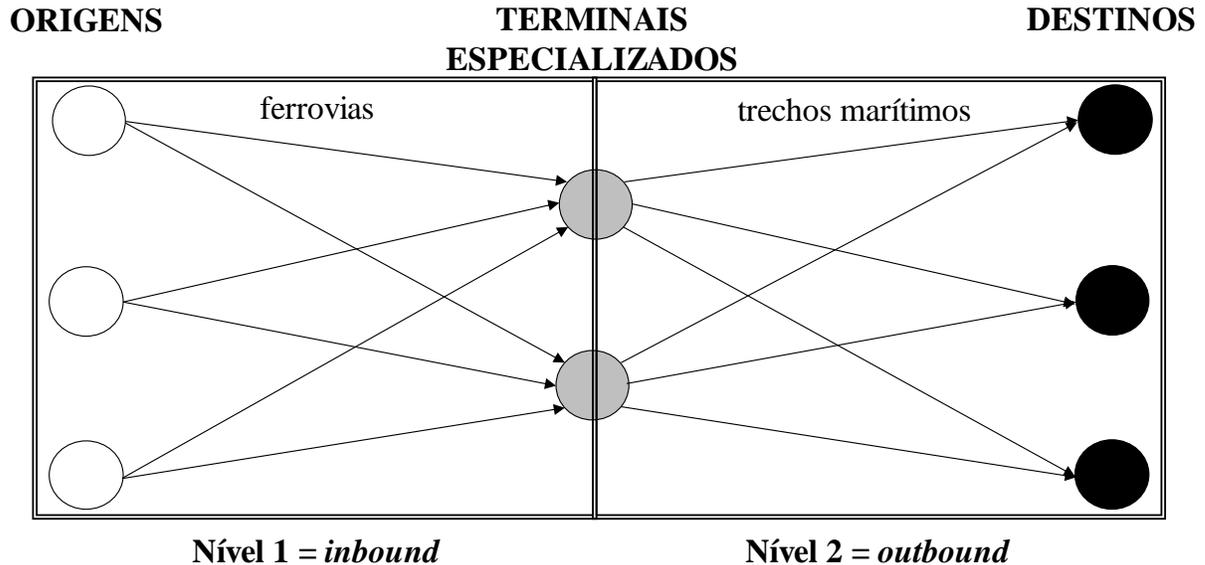


Figura 2.3 – Níveis de decisão do modelo de Dubke e Pizzolato

Parâmetros:

- P_{kq} = Preço do produto $q \in Q$ comercializado para o destino $k \in K$
- $C_{ijm}^{inbound}$ = Custo de transporte da origem $i \in I$ para o terminal especializado $j \in J$, transportando o insumo $m \in M$
- $C_{jkq}^{outbound}$ = Custo de transporte do terminal especializado $j \in J$ com destino ao ponto de

demanda $k \in K$, transportando o produto $q \in Q$

- f_j = Custo fixo de instalação de um terminal especializado $j \in J$
- g_{js}^{serv} = Custo fixo para abrir o serviço $s \in S$ no terminal especializado $j \in J$
- α_{jsm}^{serv} = Custo variável do pacote de serviços $s \in S$, realizado no insumo $m \in M$ no terminal especializado $j \in J$
- β_{jsmq} = Coeficiente de alteração de volume do produto $q \in Q$ pela realização do serviço $s \in S$ no terminal especializado $j \in J$ usando o insumo $m \in M$
- w_{js} = Capacidade instalada de atendimento do pacote de serviços $s \in S$ no terminal especializado $j \in J$
- W_j = Capacidade instalada total no terminal especializado $j \in J$
- Z = Número máximo de terminais especializados abertos
- S_{im} = Oferta do insumo $m \in M$ na origem $i \in I$
- D_{kq} = Demanda máxima para o produto $q \in Q$ no destino $k \in K$

São definidas as seguintes variáveis:

- $X_{ijsm}^{inbound}$ = Quantidade do insumo $m \in M$ a ser transportado da origem $i \in I$ para o terminal especializado $j \in J$, para receber o serviço $s \in S$
- $X_{jksq}^{outbound}$ = Quantidade do produto $q \in Q$ que efetuou o serviço $s \in S$ no terminal especializado $j \in J$ com destino a $k \in K$
- Y_j = $\begin{cases} 1, & \text{se um terminal especializado é aberto no local } j \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases}$
- Y_{js}^{serv} = $\begin{cases} 1, & \text{se o serviço } s \text{ é oferecido no local } j \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases}$

O modelo é descrito pelas equações (2.23) a (2.33):

$$\begin{aligned}
Max \sum_{j \in J} \sum_{k \in K} \sum_{q \in Q} \sum_{s \in S} P_{kq} X_{jksq}^{outbound} - \sum_{j \in J} \left\{ \sum_{i \in I} \sum_{m \in M} C_{ijm}^{inbound} \sum_{s \in S} X_{ijsm}^{inbound} + f_j Y_j + g_{js}^{serv} Y_{js}^{serv} \right. \\
\left. + \sum_{s \in S} \sum_{m \in M} \sum_{i \in I} \alpha_{jism}^{serv} X_{ijsm}^{inbound} + \sum_{k \in K} \sum_{q \in Q} C_{jkq}^{outbound} \sum_{s \in S} X_{jksq}^{outbound} \right\} \quad (2.23)
\end{aligned}$$

Sujeito a:

$$\sum_{j \in J} \sum_{s \in S} X_{ijsm}^{inbound} \leq S_{im} \quad \forall i \in I, m \in M \quad (2.24)$$

$$\sum_{j \in J} \sum_{s \in S} X_{jksq}^{outbound} \leq D_{kq} \quad \forall k \in K, q \in Q \quad (2.25)$$

$$\sum_{m \in M} \sum_{i \in I} X_{ijsm}^{inbound} \leq W_{js} Y_{js}^{serv} \quad \forall j \in J, s \in S \quad (2.26)$$

$$\sum_{s \in S} \sum_{m \in M} \sum_{i \in I} X_{ijsm}^{inbound} \leq W_j Y_j \quad \forall j \in J \quad (2.27)$$

$$Y_{js}^{serv} \leq Y_j \quad \forall j \in J, s \in S \quad (2.28)$$

$$\beta_{jismq} \sum_{i \in I} X_{ijsm}^{inbound} - \sum_{k \in K} X_{jksq}^{outbound} = 0 \quad \forall j \in J, s \in S, m \in M, q \in Q \quad (2.29)$$

$$\sum_{j \in J} Y_j \leq Z \quad \forall j \in J \quad (2.30)$$

$$X_{ijsm}^{inbound}, X_{jksq}^{outbound} \geq 0 \quad \forall i \in I, j \in J, s \in S, k \in K, m \in M, q \in Q \quad (2.31)$$

$$Y_j \in \{0, 1\} \quad \forall j \in J \quad (2.32)$$

$$Y_{js}^{serv} \in \{0, 1\} \quad \forall j \in J, s \in S \quad (2.33)$$

A função objetivo (2.23) visa à maximização do lucro total. Note que são minimizados os custos com transporte entre as origens e os terminais especializados e destes para os destinos, de instalação de terminais especializados e de serviços nesses terminais e a realização de serviços sobre os insumos que chegam aos terminais especializados. As restrições (2.24) e (2.25) garantem o escoamento das ofertas e o atendimento das demandas. Na restrição (2.26), caso um terminal especializado seja instalado, sua capacidade deve ser respeitada. Na restrição (2.27) ocorre o mesmo para os serviços que podem ser disponibilizados em um terminal especializado. A restrição (2.28) acopla os limitantes de capacidade dos serviços disponibilizados e a capacidade total do terminal especializado. A restrição (2.29) faz a conversão de massa dos

insumos para os produtos durante a realização dos serviços nos terminais especializados. Em (2.30), o número de terminais especializados que podem ser instalados é limitado. As demais restrições, de (2.31) a (2.33), se referem à definição dos domínios das variáveis.

2.4 Considerações Gerais

Alguns desafios para o planejamento logístico e da produção em complexos agroindustriais no Brasil, na qual a da soja merece grande destaque, não estão apenas na modelagem do sistema ou na necessidade de proposição de métodos de resolução para os modelos existentes, mas também em dois pontos fundamentais relacionados às práticas atuais dessas atividades. O primeiro ponto, e mais importante, diz respeito a transportar grandes volumes de cargas por longas distâncias usando modais mais baratos que o rodoviário. Isso poderia ser feito por meio de contratos de transporte intermodal para a rota completa, partindo das regiões produtoras de soja e chegando aos portos, ao invés da contratação de trechos, um para cada modal ou de pequenos trechos no mesmo modal. As concessionárias envolvidas na administração das ferrovias em geral cobram fretes diferenciados e fazem contratos separados em função das divisas dos estados e das mudanças de concessionária, mesmo quando não há transbordo de carga ou mudança de locomotivas nos trens. No entanto, alguns trechos ferroviários no Brasil praticam fretes muito altos quando comparados ao modal rodoviários, não se tornando competitivos, nem por questão de custos de transporte nem pelo tempo de viagem.

A segunda possibilidade de ganho está relacionada a uma definição mais apurada das funções dos custos envolvidas nas atividades realizadas ao longo do complexo. Nesse contexto, dois trabalhos interessantes são de Ojima (2007), que separa os custos de fretes em rotas inferiores ou superiores a 500 km, e o de Junqueira & Morabito (2006), que analisam como a consideração do ICMS (Imposto sobre Circulação de Mercadorias e Serviços) pode levar a reduções significativas nos custos de produção e logística de sementes de milho. A consideração de economias de escala, obtidas pelo uso de diferentes composições de trens e barcaças foi estudada somente em Resende et al. (2010), mas sem considerar que nesses modais existe uma carga mínima necessária para a realização de um contrato de transporte.

Os resultados dessa revisão bibliográfica indicam que existe um grande potencial para realização de pesquisas na área e para a aplicação dos modelos e métodos desenvolvidos nas pesquisas ao sistema real. Porém, uma dificuldade para a realização de pesquisas dedicadas à modelagem do complexo é a coleta de dados para verificação e validação desses modelos. Algumas possíveis fontes de dados são relatórios de órgãos governamentais e de associações de empresas ou cooperativas que atuam na área. Mas, como essas bases não são unificadas, existem diferenças significativas em relação aos dados que podem ser apurados e alguns dados básicos. Por exemplo, as distâncias percorridas em cada trecho das ferrovias, em geral, não estão disponíveis.

Contatos diretos com essas empresas também são difíceis, pois para a maioria delas, dados referentes às capacidades instaladas e aos custos envolvidos são considerados estratégicos em relação à concorrência, e se tornam sigilosos para utilização em estudos e para posterior publicação. Nesse sentido, acredita-se que uma maior realização e divulgação de pesquisas dessa natureza possa conscientizar os tomadores de decisão no governo e nas empresas das possibilidades de benefícios e ganhos que poderiam ser obtidos com o desenvolvimento de estudos de caso com dados reais destas operações.

3. O COMPLEXO AGROINDUSTRIAL DA SOJA NO BRASIL

O complexo agroindustrial da soja no Brasil apresenta uma série de particularidades em relação aos complexos da soja em outros países, tais como USA e Argentina. Para defini-lo, segue-se o esquema mostrado na Figura 3.1. Os insumos do complexo são utilizados para a produção da soja, que se distribui por todas as regiões do país. A partir da colheita, a soja segue para os originadores, que realizam os processos de secagem e limpeza da soja. A partir dos originadores, a soja pode ser enviada por diferentes caminhos, sendo que tanto o envio ao mercado externo quanto aos esmagadores são considerados nesta tese, cujo foco está no planejamento de operações de transporte, incluindo a modalidade intermodal, e de industrialização da soja em grão.

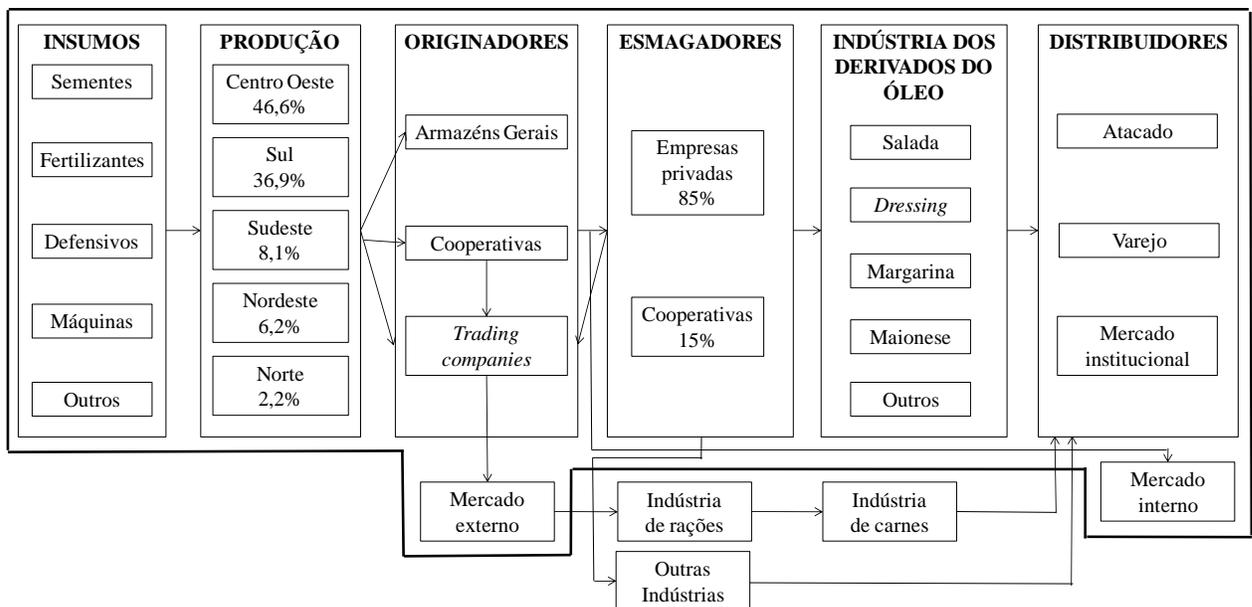


Figura 3.1 – Sistema agroindustrial da soja

O propósito desse capítulo é o de fazer uma breve caracterização do complexo agroindustrial da soja no Brasil, ou seja, criar um pano de fundo para os capítulos seguintes, em especial para os Capítulos 4, 5 e 6. O Capítulo 4, por tratar da estrutura de rede que foi desenvolvida para representação do complexo da soja, é dependente do bom conhecimento do grande número de estruturas físicas e considerações práticas desse sistema. Os Capítulos 5 e 6,

seguintes, ao se voltarem à modelagem dos problemas de planejamento operacional e estratégico, respectivamente, das empresas atuantes no agronegócio da soja, precisam ser coerentes com as premissas e objetivos pertinentes ao horizonte de planejamento considerado. Do contrário, sem uma correta relação entre o sistema real estudado, a representação em redes associada e a consideração de premissas práticas na modelagem dos problemas, os resultados obtidos não seriam aplicáveis às empresas do setor.

Sendo assim, o capítulo foi dividido em quatro seções principais, em que se apresentam algumas informações sobre o complexo, além de algumas referências que podem ser utilizadas como fontes para maiores informações. A seção 3.1 trata da estrutura física relacionada ao complexo agroindustrial da soja no Brasil. São tratados alguns tópicos relativos à cultura da soja e à infraestrutura de transporte e armazenagem disponíveis para o seu escoamento e estoque. A seção 3.2 trata das empresas que atuam sobre esse complexo. São brevemente apresentados os processos industriais envolvidos na produção de derivados de soja e, com base no foco de atuação, que pode incluir ou não a etapa industrial, são apresentados alguns exemplos de empresas que se destacam no Brasil. A seção 3.3 trata dos níveis de planejamento realizados por essas empresas no desenvolvimento de suas atividades principais. São contrastadas premissas dessas empresas que são relevantes para os planejamentos de curto e longo prazo, por estarem relacionados à gestão de atividades rotineiras ou à realização de investimentos em estrutura física. A Seção 3.4, que encerra o capítulo, fazendo também referência a outros trabalhos revisados que possuem objetivos mais gerais, como o de explicar aspectos das relações de governança ou de políticas públicas que influenciam o sistema estudado.

3.1 A Estrutura Física do Complexo Agroindustrial da Soja no Brasil

Conforme já foi dito, a infraestrutura física do complexo está na base das decisões de planejamento tratadas nesta tese. As decisões tomadas nesse nível, envolvem, no curto prazo, a administração dos recursos de transporte, armazenagem e industrialização disponíveis, enquanto o investimento em novos recursos é tratado em horizontes de longo prazo. Essa estrutura física é, em grande parte, provida pelo governo, como no caso das vias de transporte, ou por outros agentes do complexo, como os fazendeiros, que vendem a sua produção de soja para

empresas que administram a exportação de soja ou aquelas que se envolvem nos processos industriais. Nessa seção, são brevemente comentados alguns aspectos importantes do cultivo da soja e da rede de transporte e armazenagem disponíveis, ao mesmo tempo em que são apontadas algumas pesquisas realizadas especificamente sobre cada parte do complexo.

3.1.1 As áreas de cultivo da soja

A soja é uma leguminosa de origem chinesa que chegou ao Brasil em 1924, no nordeste gaúcho, região que hoje é conhecida como o “berço da soja no Brasil” (CHAVES et al., 2005). Desde então, vem adquirindo importância econômica e se espalhando por todas as regiões do Brasil, como pode ser visto na Figura 3.2. As regiões em amarelo são as regiões mais antigas de cultivo, enquanto as áreas em alaranjado mostram a expansão dessas plantações, que já se encontram em áreas de desmatamento da floresta amazônica, além do cerrado e algumas áreas de outros biomas brasileiros.



Figura 3.2 – Áreas de cultivo da soja no Brasil
Fonte: Amaral (2003)

Para fins de coleta para as empresas atuantes no agronegócio da soja, a mesma é originada a partir da colheita e secagem do grão, que pode ocorrer em grandes fazendas, cooperativas e até mesmo em estoques públicos. Os fazendeiros ou cooperativas vendem, então, a soja já limpa e seca às empresas que comercializam ou industrializam esse produto. Considera-se, dessa forma, que as ofertas de soja são originadas em pontos concentradores, ou centróides, como são mais comumente conhecidos.

Uma questão interessante é a diferenciação de plantações de soja entre variedades de organismos geneticamente modificados (OGM), mais conhecidas como soja transgênica, e as variedades que não são geneticamente modificadas (não-OGM). Atualmente, toda a soja que não recebe certificação de soja não-OGM, mesmo que não seja, é considerada transgênica nos mercados internacionais e, por isso, vendida a preços menores. Algumas empresas e cooperativas, sediadas principalmente no sul do país, já possuem certificação de produção de soja não-OGM. Alguns trabalhos que descrevem casos reais, analisando o custo-benefício de implantação de rastreabilidade e certificação da soja não-OGM são Aquino e Pelaez (2007), que descrevem o caso da Imcopa - Importação e Comércio Paraná, e Felipe (2007), que descreve o caso da Cooperativa Agropecuária Castrolândia, que possui sede na cidade de Castro, no Paraná.

Para os objetivos desta tese, a consideração das sojas OGM e não-OGM não se faz muito pertinente, pois a grande maioria das empresas não possui esse tipo de certificação. No entanto, caso houvesse essa separação, os problemas tratáveis não seriam decomponíveis para cada um desses casos, visto que os dois tipos de soja, OGM e não-OGM, competem pelas capacidades de transporte das mesmas estruturas disponíveis, incluindo os terminais intermodais e os armazéns gerais.

Algumas fontes de dados de produção e comercialização da soja podem ser encontradas principalmente nos relatórios do IBGE (2012), da Secretaria de Comércio Exterior (SECEX) ou da Associação Brasileira de Exportadores de Óleos Vegetais (ABIOVE, 2012). Algumas pesquisas que podem ser utilizadas como fonte de informação e que foram utilizadas para o entendimento da produção da soja no Brasil são, por exemplo, Filgueiras et al. (2007), que traz informações da história e expansão da soja no Brasil; Perera et al. (2003), que mostram o rápido crescimento da soja no contexto brasileiro, tanto como produto de consumo quanto de exportação e Ribeiro (2008), que estudou as mudanças ocorridas na coordenação do sistema

agroindustrial da soja na região de Rio Verde – GO, bem como seus impactos aos segmentos e agentes da cadeia da soja, em decorrência da difusão da soja transgênica.

Algumas pesquisas relacionadas à cultura da soja no Brasil estão principalmente ligadas a contextos históricos, como é o caso de Marta e Figueiredo (2006), que descrevem a entrada da soja no Mato Grosso, sob o foco de políticas governamentais em conjunto com ações de empresas comerciais que se beneficiaram do processo; ao dimensionamento e previsão da safra para algumas regiões, como Mafioletti et al. (2008), que fez o dimensionamento da safra de soja paranaense 2007/2008; Vieira (2002), que contextualizou o complexo agroindustrial da soja no estado de Goiás, descrevendo desde a história das plantações até o programas que possibilitaram a expansão das indústrias locais; ou ao mapeamento georreferenciado da safra, como em Alves et al. (2009), que mapearam as plantações e fizeram a previsão de safra de soja no Mato Grosso com sistemas de cartografia e geovisualização e de Resende (2002), que estudou as áreas de cultivo da soja localizadas no Oeste da Bahia, discutindo a existência de um *cluster*, que pode obter ganhos com a exportação do grão e do farelo.

3.1.2 A rede de transporte intermodal

O transporte de todos os produtos ocorre em uma rede intermodal, formada de rodovias, ferrovias e hidrovias, sendo essas últimas divididas em trechos fluviais e marítimos. Apontado como o maior gargalo à redução de custos logísticos, o sistema de transporte de cargas no Brasil geralmente apresenta uma série de problemas, tais como falta de integração, elevados custos de fretes e a dependência do transporte rodoviário como grandes questões a serem vencidas. Devido a isso, a maior parte dos trabalhos desenvolvidos, e aqui revisados, se relaciona à discussão do sistema de transporte intermodal utilizado para a exportação da soja.

Como pode ser visto pelas Figuras 3.3, 3.4, 3.5 e 3.6, o sistema de transporte intermodal brasileiro, é formado por uma rede de transporte rodoviário, mostrada na Figura 3.3, que apresenta grande densidade, com rodovias que integram todo o território brasileiro. Porém essas rodovias nem sempre se encontram em boas condições, tornando o transporte de cargas, incluindo o caso da soja, caro, lento e perigoso.

O sistema de transporte ferroviário, mostrado na Figura 3.4, apresenta densidade muito reduzida quando comparado ao mapa rodoviário, com concentração da malha nas regiões Sudeste, na região Sul e próximo ao litoral no Norte e Nordeste. O sistema hidroviário, mostrado na Figura 3.5, apesar de muito pouco utilizado, tem sido objeto de estudos e investimentos do governo federal para uma melhor integração com o restante do sistema viário.

Ao se sobrepor essas redes, tem-se o sistema de transporte intermodal, mostrado na Figura 3.6. Vários estudos encontrados e relacionados ao transporte de soja para exportação fazem referência a corredores de transporte, ou seja, rotas de escoamento que se destacam pelos volumes de soja escoada anualmente. Por exemplo, Oliveira (2007) faz uma descrição bastante completa desses corredores, que são utilizados no escoamento da soja para exportação; Frederico (2004) descreve os novos eixos de escoamento da soja no Noroeste, Centro-Norte e Sudeste, relatando como o governo brasileiro, em parceria com a iniciativa privada, tem proposto e viabilizado projetos de grande porte para melhorar a integração das áreas de produção e portos; Fornaro e Ilario (2009) fornecem informações do corredor Sudeste para o porto de Santos; Martins et al. (2006) discutem, em seu estudo, a situação do estado de Minas Gerais, que está sob a influência do corredor Centro-Leste, mostrando que o investimento em rodovias e expansão da malha ferroviária pode ter impactos positivos significativos para a região do Triângulo Mineiro e áreas sob a influência da Bacia do São Francisco; e, Ribeiro et al. (2009), que analisaram o uso do transporte intermodal da rota Maringá-Paranaguá.

Em relação à infraestrutura integrada dos modais de transporte, algumas pesquisas se destacam, como Lima et al. (2000), que discutem a necessidade de reestruturação da matriz de transportes, com priorização de ferrovias e hidrovias, fazendo um sumário de propostas para os corredores de transportes; Munhoz e Palmeira (2006) identificam gargalos logísticos desses corredores, como a existência de ferrovias obsoletas e escassez de hidrovias, o péssimo estado de conservação das rodovias, além do fato dos armazéns e portos disponíveis estarem sobrecarregados.



Figura 3.3 – Mapa do sistema rodoviário brasileiro

Fonte: Ministério dos Transportes

É possível citar muitos trabalhos que descrevem os fluxos da soja em sistemas mais restritos, como Bulhões e Caixeta Filho (2000), que analisam os fluxos logísticos da soja na região Centro-Sul utilizando um modelo de equilíbrio espacial; Meregge e Assumpção (2002) que analisaram o escoamento da soja Paranaense para exportação 1999 e 2000, mostrando que embora a soja brasileira seja competitiva em termos do custo de produção, há desvantagens consideráveis em relação aos canais logísticos de exportação; Pacheco e Silva (2003) utilizaram modelos de previsão de carga para uma empresa de transporte ferroviário, com foco no transporte

de soja, farelo e açúcar; Castillo (2004) explica como as novas áreas de cultivo no Centro-Oeste e Norte têm motivado diversas mudanças no transporte, com estímulo à multimodalidade, como estímulo à redução dos custos de transporte de cargas.

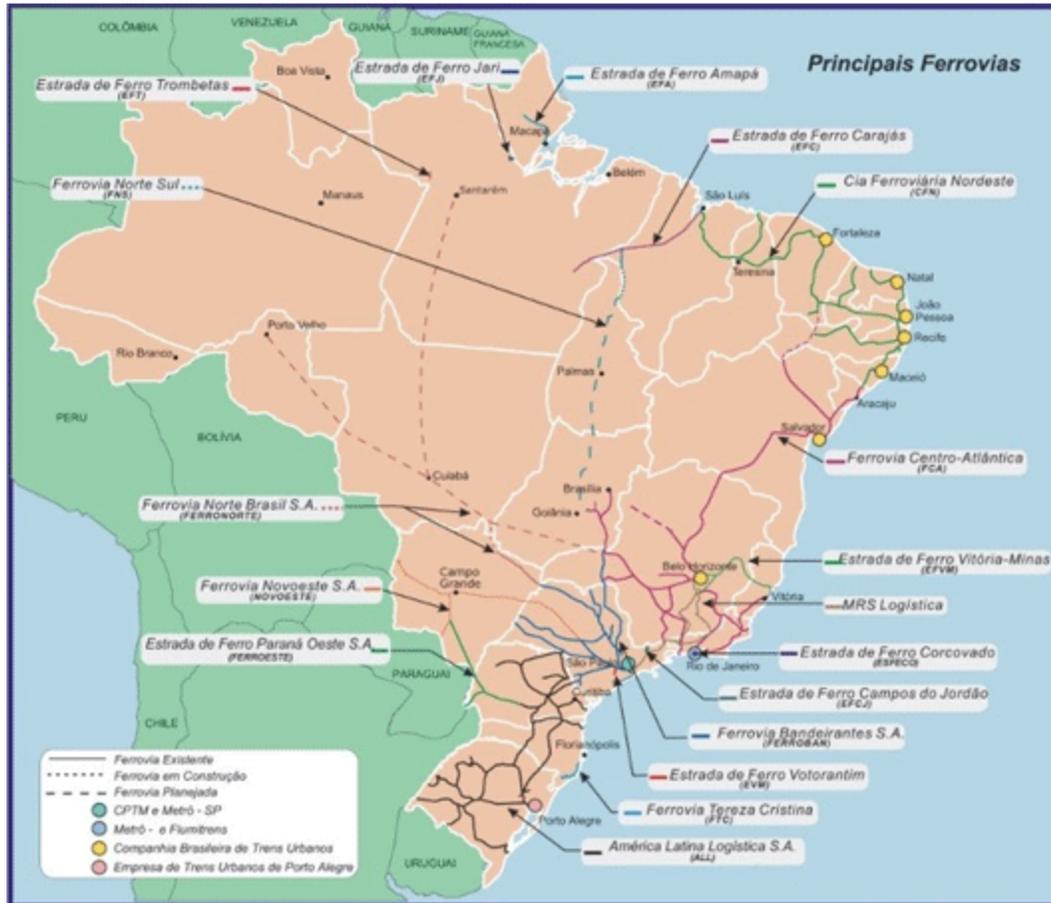


Figura 3.4 – Mapa do sistema ferroviário brasileiro

Fonte: Ministério dos Transportes

Em relação ao escoamento da soja para os portos, para fins de exportação, têm-se Loto e Lopes (2005) estudaram as rotas intermodais de exportação de Mato Grosso para Rotterdam; Neves et al. (2009) estudaram a logística de escoamento da safra agrícola do Corredor Noroeste; Filardo et al. (2005) estudaram as rotas de transporte da soja do estado do Mato Grosso para o porto de Santos; e Oliveira e Cury (2004) fizeram um modelo para escolha de modais de carga utilizando modelagem neuro-fuzzy, para a rota Rondonópolis – Vitória; além de Lima (2004), que descreveu as rotas intermodais internas utilizadas na exportação de soja no Brasil.

de cargas, analisando fatores da sua estrutura de produção e custos em relação entre indicadores operacionais e custos de frete.



Figura 3.6 – Mapa do sistema multimodal brasileiro

Fonte: Agência Nacional de Transportes Terrestres

Outros exemplos se encontram em Martins et al. (2004a), que estudaram custos de fretes rodoviários nos corredores de exportação do Centro-Sul brasileiro; Martins et al. (2004b) estudaram os fretes rodoviários do corredor de exportação de Paranaguá; Ângelo (2005) fez um interessante levantamento de custos logísticos de transporte de soja; Noro et al. (2005)

desenvolveram um estudo de caso na Bunge Alimentos, discutindo a importância da consideração de custos logísticos, ao invés do cálculo simplificado do frete de transporte, mostrando a importância da análise de custos para competitividade do agronegócio; Ojima (2006c) fez uma análise do comportamento dos fretes no transporte rodoviário no Brasil; Ojima e Rocha (2005) analisaram as principais rotas de escoamento da soja brasileira, concluindo que os custos de transporte representam 30% do custo da soja; Ojima et al. (2007) estudaram os custos de frete rodoviário na rota Barreto – Santos; Ojima et al. (2008) fizeram a mesma análise para a rota Assis – Santos; Pessoa e Pereira (2006) realizaram um estudo de cenários e mostraram que uma maior integração dos eixos viários no Mato Grosso pode reduzir os custos de transporte da soja.

Muitos trabalhos, assim como o de Ojima (2006a), que estabelece um perfil da logística de transporte de soja no Brasil, estão preocupados com contextos mais amplos em relação às perspectivas de transporte para o agronegócio brasileiro. Por exemplo, Perera et al. (2003) realizaram uma análise do complexo logístico que indica que a malha rodoviária continuará sendo fundamental para o escoamento da produção, mesmo com expectativas de melhorias nos modais ferroviário e hidroviário; Martins et al. (2005b) analisaram os impactos da carência de investimentos na logística pública de transportes para o agronegócio, mostrando que a falta de provisão, congestionamentos e saturamentos existentes nas redes de transportes, necessitam de investimentos de empresas, podendo transformar esses investimentos em forças comerciais; Fernandes et al. (2009) e Pontes et al. (2009) fizeram um levantamento dos principais obstáculos ao escoamento da safra agrícola do Brasil; e, Riva et al. (2003), que discutiram as dificuldades do transporte no Brasil, concluindo que a melhor opção é o investimento na intermodalidade, aproveitando ao máximo, a infraestrutura existente, mesmo as que necessitam de recuperação.

Michelon (2007) fez um trabalho interessante e inédito, que foi um estudo em relação à utilização de carga de retorno no transporte de soja, principalmente de fertilizantes usados no próprio cultivo da soja. Um caso real foi analisado, realizado no porto de Santos, em que se descrevem características, dificuldades e desvantagens desse tipo de fluxo de carga.

3.1.3 Os terminais intermodais

Os terminais intermodais são estruturas de integração extremamente importantes à integração dos modais de transporte disponíveis no Brasil, pois fazem o transbordo da carga de um modal de transporte para outro. Um terminal intermodal possui, em suas instalações, equipamentos capazes de fazer a descarga dos produtos, a partir de modal de origem, para uma estrutura de armazenamento intermediário, para, em seguida, fazer o carregamento dos produtos no modal de destino. Existem, no que se refere ao transporte de soja no Brasil, dois tipos de terminais intermodais distintos, os terminais intermodais no interior do território, que fazem a ligação da ferrovias e hidrovias com o modal rodoviário, e os portos, que além disso, envolvem serviços alfandegários e operam com capacidades de transferência muito superiores às dos demais terminais intermodais.

Os terminais intermodais utilizados no transporte da soja são específicos para a transferência de grãos, podendo ser de propriedade pública ou privada. Em relação aos terminais de propriedade privada, estes podem ser de propriedade de empresas que atuam no setor, mas também podem pertencer a empresas de transporte, como é o caso do terminal de grãos do porto de Praia Mole, no complexo portuário de Vitória, que pertence à Companhia Vale do Rio Doce. Algumas empresas que possuem terminais intermodais próprios são a Cargil e a Caramuru Alimentos.

Em relação às pesquisas voltadas aos terminais intermodais brasileiros, pode-se citar, por exemplo, Suzuki Júnior e Wosch (2000), que analisam algumas mudanças institucionais no setor de transporte brasileiro, ilustrado pelo porto de Paranaguá; Perera et al. (2003), que relatam a carência de medidas de modernização e seu gerenciamento e novos investimentos nos portos brasileiros; Lacerda (2005), que fez uma análise histórica do acesso ferroviário ao porto de Santos; Rosa (2005) analisou os portos do Rio de Janeiro, contrastando a oferta e a demanda por serviços logísticos, incluindo o segmento agroalimentar;. Santos (2007) estudou o transporte ferroviário da soja no Brasil e seu escoamento pelo porto de Paranaguá; Vencosvsky e Castilho (2007) discutiram o panorama geral do transporte ferroviário no Brasil após a privatização; Silva e Menezes (2008) analisaram a viabilidade econômica de escoamento da produção de soja das regiões Centro e Norte do Mato Grosso pelo corredor Noroeste, indicando a possibilidade de redução de 22,13% nos custos de transporte; Anderson et al. (2009), que avaliaram as

capacidades de transferência de grãos agrícolas nos terminais intermodais utilizados para escoamento da produção de soja dos portos localizados dentro da área de influência da produção de soja do Centro-Oeste; e ainda, Campeão et al. (2009), que realizaram uma análise dos terminais hidro-fluviais no corredor logístico Centro-Oeste, concluindo que esses terminais possuem capacidade e equipamentos em condições suficientes para atender à demanda de transferência de soja, mas são pouco utilizados pelas baixas velocidades alcançadas na transferência e no transporte da soja nas hidrovias.

3.1.4 A infraestrutura de armazenagem

A infraestrutura de armazenagem é considerada de duas formas possíveis: ora como uma unidade geral, na qual todos os produtos do complexo agroindustrial da soja podem ser armazenados, ora em unidades distintas para uso apenas de determinados produtos, como nos casos dos silos e dos tanques de óleo. As duas situações coexistem no que se refere às estruturas de armazenagem pública geral e de empresas privadas no Brasil. Os armazéns públicos, em geral, são formados por galpões para armazenamento dos produtos em sacas ou tonéis, no caso dos óleos. Esse arranjo privilegia a diversidade de usos possíveis dos armazéns, uma vez que é possível armazenar soja, milho, arroz, feijão e outros grãos sólidos em diferentes meses do ano, de acordo com a sazonalidade de safra, consumo e exportação desses produtos. Por outro lado, o uso dessas estruturas gerais de armazenamento leva à obrigação do uso de embalagens, muitas vezes de uso intermediário, para acomodação dos produtos estocados. Essas sacas, no caso de grãos sólidos, ou de tonéis, para a acomodação dos óleos de soja, leva a diferentes custos para cada tipo de produto armazenado.

As estruturas especializadas, mais abundantes nos terminais intermodais e nas fábricas de propriedade privada, podem ser divididas em silos e tanques. Os silos são imensas estruturas de secagem e armazenagem de soja e farelo. Por serem dedicadas a um único produto, não há necessidade do uso de embalagens para a acomodação dos grãos neles contidos. No entanto, não é possível misturar dois produtos em um mesmo silo. Isso leva a necessidade de alocação de cada silo a um produto, por um determinado período no horizonte de planejamento. Apesar da necessidade de alocação de um produto ao silo, não é necessária a preparação do silo

para receber esse produto, pois uma vez que o silo é esvaziado, todo o produto escoado, deixando seu interior vazio e preparado para ser reabastecido com o mesmo ou com outro produto.

A mesma coisa ocorre no caso dos tanques de armazenagem de óleos. Um único tipo de óleo é armazenado em cada tanque disponível por um período de tempo determinado, sendo escoado após esse prazo e deixando o tanque liberado para receber um novo produto. Quando um tanque ou silo é utilizado para a armazenagem de um produto, não é obrigatório que toda a sua capacidade seja consumida de uma única vez. Dessa forma, é possível utilizar parcialmente a capacidade de cada silo ou tanque disponível.

Exemplos de algumas pesquisas realizadas em relação a esse tema no Brasil incluem os trabalhos de Teixeira (2001), que avaliou as perdas qualitativas no armazenamento da soja no Brasil; Martins et al. (2005a), que estudaram as compensações de custos de transporte e armazenagem para a soja no Paraná; Naves (2007), que descreveu a remoção dos estoques públicos de grãos através do corredor Noroeste; Nogueira Júnior e Nogueira (2007), que analisaram o uso de centrais regionais de armazenagem como apoio à comercialização de grãos; Aldigueri e Oliveira (2009), que fizeram uma análise do *trade-off* entre o escoamento imediato da produção de soja e a armazenagem com escoamento controlado, utilizando dados referentes às exportações realizadas pelo porto de Paranaguá; além de Gallardo et al. (2010), que afirmaram em seu estudo que a capacidade de armazenamento estático do Brasil é inferior à necessária e não corresponde ao crescimento acentuado da produção agrícola, além de não ser adequadamente distribuída. Um estudo de caso foi realizado na região Centro-Oeste, identificando a necessidade de investimento em centrais de armazenagem, de acordo com o crescimento da produção, por microrregião produtora.

3.2 As Empresas Atuantes no Complexo Agroindustrial da Soja no Brasil

As principais atividades realizadas ao longo do complexo agroindustrial da soja no Brasil são mostradas na Figura 3.7. Entre as atividades de produção e consumo, encontram-se as atividades de armazenagem, transporte e industrialização, que estão no foco central das decisões relacionadas ao planejamento operacional. A partir dessa figura, é possível perceber que a soja produzida pode ser imediatamente transportada ou armazenada. Dos armazéns ou até mesmo das

áreas de produção, a soja pode ser enviada para os processos industriais ou às áreas de consumo. A partir das indústrias, os derivados da soja devem, necessariamente, passar por uma etapa de transporte antes de chegar ao seu destino final, independente de terem sido estocados ou não. Optou-se por não representar um arco direto entre as funções de produção e armazenagem, pois sempre ocorre uma etapa de transporte entre essas duas atividades. Embora esse transporte possa ocorrer em trechos consideravelmente menores do que em outras ligações, como entre a industrialização e o consumo, esses custos nessa forma de representação podem ser computados, ou em caso de desconsideração, terem um custo nulo, tornando a modelagem mais genérica.

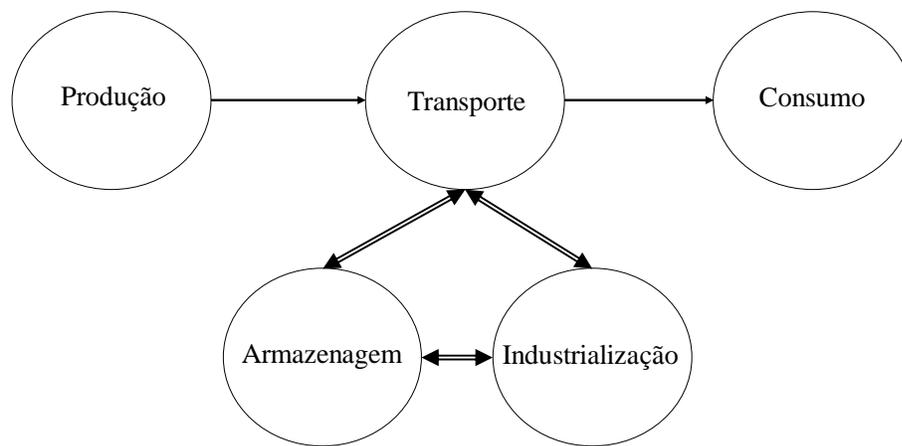


Figura 3.7 – Fluxos da soja e derivados ao longo do complexo agroindustrial

Por meio dessa simples análise dos fluxos na Figura 3.7, é possível perceber diversos desdobramentos das atividades que podem ser realizadas e das decisões a serem tomadas ao longo do complexo agroindustrial da soja. A fim de facilitar a formalização desse complexo agroindustrial, são definidos dois tipos de empresas, as que atuam apenas na exportação de soja em grão e aquelas interessadas na industrialização e no comércio de derivados de soja.

Alguns exemplos de grandes empresas que atuam somente no transporte da soja em grão ou de seus derivados, não atuando nos processos industriais do complexo da soja:

- **Transportadora Brasil Central:** fundada no início da década de 1980, a empresa atua no transporte de grãos e está presente em várias cidades de grande importância para a sojicultura brasileira. Sua sede fica na cidade de

Rio Verde, em Goiás, tendo filiais em Sinop - MT, Indiara - GO e Rosário, que é um distrito de Correntina - BA;

- **Transportadora Roma:** a empresa, também fundada no início da década de 1980, hoje pertence ao grupo Roma, que conta com outros segmentos, como postos de combustíveis e transporte rodoviário de outros tipos de carga. O segmento de transporte agrícola, com destaque para o transporte de soja e algodão, tem sede em Anastásio - MS e se destaca no escoamento da safra pelo estado da Bahia;
- **Prisma Transportes:** sediada na cidade de Jataí, com filial em Aparecida de Goiás, ambas no estado de Goiás, é especializada no transporte de óleo de soja a granel;
- **Mafro Transportes:** sediada em Rondonópolis, atua no transporte rodoviário de cargas a granel, atendendo principalmente as regiões Centro-Oeste e Sul do Brasil.

Alguns exemplos de grandes empresas que também atuam nos processos industriais ao longo do complexo da soja incluem:

- **ADM Brasil:** atua no processamento, refino e envase de óleo de soja, com fábricas em Rondonópolis – MT, Campo Grande – MS, Joaçaba – SC e Uberlândia – MG;
- **Bunge Alimentos:** opera aproximadamente 150 armazéns, possuindo também fábricas – atuação nos mercados de produtos derivados para consumo direto; possui terminais portuários e rodo-ferroviários próprios;

- **Caramuru Alimentos:** possui uma fábrica em Itumbiara – GO, terminais intermodais em São Simão – GO e Pederneiras – SP, além de terminais portuários em Santos e Vitória;
- **Cargil:** atua no esmagamento, refino e no mercado de produtos derivados para consumo direto, com fábricas em Mairinque – SP, Uberlândia – MG, Ponta Grossa – Pr, Três Lagoas – MS, Barreiras – BA e Rio Verde – GO.

3.2.1 Os produtos derivados da soja

A realização de processos industriais sobre a soja em grão permite a obtenção de produtos derivados, como mostrado na Figura 3.8. A partir da soja em grão, gera-se simultaneamente farelo de soja e óleo bruto. O óleo bruto pode ainda passar por um segundo processo industrial e gerar óleo refinado. Essa consideração é feita pelo uso de um fator de correção de massa, que é o fator percentual de massa do produto gerado a partir da sua matéria-prima correspondente.

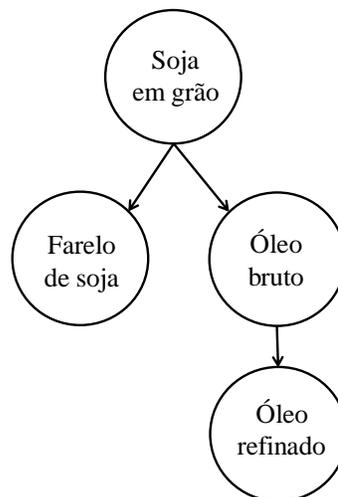


Figura 3.8 – Principais subprodutos da soja em grão

Fonte: Mandarino e Roessersing (2001)

Os processos industriais utilizados na prática geram ainda outros produtos, como a lecitina e a casquinha de soja, que não foram considerados por representarem percentuais de massa e geração de receita muito inferiores aos principais produtos considerados no complexo. Da mesma forma, em casos raros, o farelo de soja pode passar por processos de peletização ou ser transformado em farinha antes de ser utilizado como fonte de proteína em alimentos para consumo humano, como hambúrgueres e suplementos alimentares, ou também rações.

Em relação ao desenvolvimento de pesquisas relacionadas aos produtos do complexo agroindustrial da soja, pode-se citar, por exemplo, Barbosa e Perez (2005), que fizeram um estudo relacionado à evolução das exportações brasileiras de óleo de soja por portos de embarque de 1996 a 2004; e Camargo e Leite (2006), que estudaram as oportunidades de renda para pequenos produtores do Paraná para a comercialização de soja diferenciada, produzida em pequena escala, com grãos de tamanho uniforme, cor do hilo, índices de proteína e sabor adocicado.

Curiosamente, o número de trabalhos relacionados ao complexo da produção de biodiesel produzido a partir do óleo de soja tem crescido muito desde a publicação da Lei 11.097/2005, que obriga a adição de 2% de biodiesel ao diesel a partir de 2008 (FERREIRA e BORENSTEIN, 2009). Alguns exemplos dessas pesquisas incluem os trabalhos de Cánepa (2003), que caracterizaram o complexo produtor de biodiesel no Brasil; Peres et al. (2005), que relacionam a produção de biocombustíveis ao crescimento do agronegócio brasileiro; Plá (2005), que fez uma análise comparativa de mercado, concluindo que nos últimos anos, o preço do óleo de soja caiu relativamente ao preço do óleo diesel, além do fato do processo de produção de biodiesel a partir do óleo de soja gerar glicerina, que é potencialmente interessante para a viabilidade econômica do Biodiesel no Brasil; Cosenza et al. (2006), que formulou e utilizou um modelo para localização de fábricas de biodiesel no centro-sul brasileiro; Leiras et al. (2007), que estudaram a viabilidade econômica do complexo produtivo de biodiesel de soja na Bahia; Padula et al. (2007), que desenvolveram um modelo de localização e distribuição de usinas de biodiesel no Rio Grande do Sul; Osaki e Batalha (2008), que realizaram um estudo sobre a produção de biodiesel e óleo vegetal no Brasil, contrastando a realidade e os desafios encontrados, relatado que o consumo de biodiesel se concentra atualmente no Sul e Sudeste, enquanto as esmagadoras se concentram no Centro-Oeste e Sul do Brasil; além de Freitas e Nachiluck (2009), que analisaram o desempenho da produção brasileira de biodiesel no ano de 2008.

3.3.2 Processos de Transformação

A industrialização da soja e obtenção de seus subprodutos é realizada no Brasil basicamente por dois processos subsequentes, a saber: a extração do óleo bruto ou esmagamento e o refino do óleo bruto. A Figura 3.9 mostra o processo de obtenção do óleo bruto e do farelo, que são obtidos na etapa industrial de esmagamento. Os grãos entram no processo pelo acesso mostrado em 3, passando por uma prensa contínua que é alimentada pelo motor situado em 1, que impele a soja para frente no processo devido à rosca sem fim mostrada em 2. Em 4, uma rosca helicoidal moi os grãos, enviando-os ao cesto, mostrado em 5, onde a pasta de grãos aquecidos a cerca de 70° C é misturada ao hexano, que catalisa o processo de extração do óleo. Ao final do processo, recolhe-se o óleo em 6 e o farelo em forma de torta em 7. Após a saída da esmagadora, a torta produzida passa por um processo de dissolução para a retirada do restante do óleo nela contido. Devido às perdas apresentadas nesse processo, utiliza-se um fator de conversão de massa, que representa o percentual de massa do produto resultante do uso de uma unidade de sua matéria-prima.

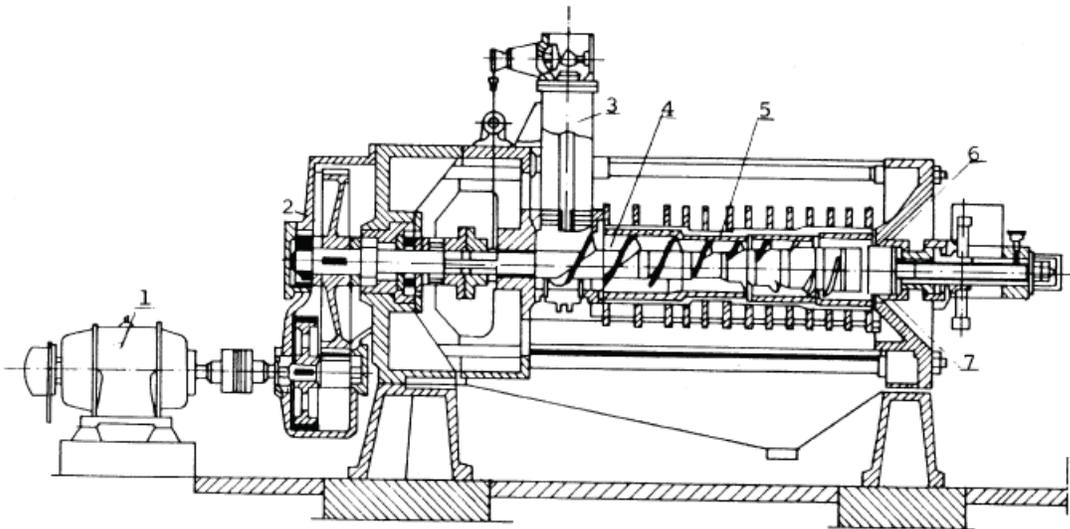


Figura 3.9 – Processo de esmagamento da soja

Fonte: Mandarino e Roessersing (2001)

Depois dessa etapa, o farelo de soja obtido após a dissolução para retirada do óleo contido passa por um processo de secagem, para redução da sua umidade. O óleo bruto pode, ainda, ser submetido a uma etapa de refino.

Em relação às pesquisas que vem sendo realizadas em relação às indústrias de esmagamento e refino, é interessante destacar Carvalho (2004), que estudou o poder de mercado da indústria de esmagamento brasileira, concluindo que a concentração das indústrias esmagadoras se acentuou nos anos 2000, resultando em um parque industrial que apresenta grande capacidade ociosa, com longas distâncias a serem percorridas até os portos; Sanches (2008), que analisou o cluster esmagador de soja da região Oeste da Bahia; Sbardelotto e Leandro (2008), que estudou como a escolha dos cultivares de soja pode ser utilizada para maximize os lucros das indústrias processadoras; e ainda Hernández (2008), que estudou como os efeitos da produção de etanol e biodiesel afetam a produção de alimentos, devido ao aumento da demanda por esses produtos internacionalmente.

Os trabalhos de Oliveira (2003) e Oliveira et al. (2004) merecem destaque pela realização de pesquisas quantitativas envolvendo a industrialização da soja, pela determinação de rotas rodoviárias de custo mínimo e pela localização de indústrias esmagadoras no estado do Mato Grosso, nas localidades de Alto Taquari e Tangará da Serra, pela proximidade com os centros produtores de soja. Outro trabalho que merece destaque é o de Zotarelli e Lugnani (2001), que comparam os complexos industriais da soja no Paraná e do Centro-Oeste do Brasil, mostrando que houve um deslocamento das indústrias de esmagamento para o Centro-Oeste, o que reduziu o dinamismo do complexo no Paraná.

3.3.3 Os mercados de consumo

As áreas de consumo podem ser divididas entre os pontos de demanda interna e externa. Os pontos de demanda interna compreendem as fábricas de produtos alimentícios, tanto para consumo humano quanto para alimentação animal, que utilizam principalmente a soja em grão, o farelo e o óleo refinado; além das indústrias de biodiesel, que demandam óleo bruto. Os pontos de demanda externa compreendem os grandes mercados internacionais da soja e seus derivados, que demandam todos os produtos, em proporções diferentes por região e por período

do ano. A respeito do atendimento da demanda, é importante ressaltar que muitos autores, tais como Ojima (2007), apontam as dificuldades de atendimento das demandas no prazo como uma das principais dificuldades do Brasil em relação às exportações de soja. Os atrasos na entrega da soja e seus derivados nos mercados internacionais geram multas, tornando nossos produtos menos competitivos em termos de custos para o produtor/exportador.

Alguns exemplos de pesquisas voltadas aos mercados consumidores da soja brasileira são Hybner e Parnoff (2003), que fizeram uma análise das exportações para a China entre 1996 e 2002; Montilha (2006), que realizou um estudo de alternativas para reduzir os custos e o *leadtime* de exportação para a China, com possibilidade de uso de rotas pelo Oceano Pacífico; Coronel et al. (2008), que relataram algumas fontes de crescimento de exportações no complexo da soja em seu estudo, com o aumento da competitividade dos produtos brasileiros e a própria expansão do comércio mundial; Figueiredo et al. (2004), também relacionado ao mesmo tema, que verificaram que houve aumento de mercado de exportação de soja, farelo e óleo nos últimos anos, devido principalmente ao aumento de competitividade da soja em grão e o crescimento do próprio mercado internacional, apesar das ineficiências nos canais de comercialização; Lovadine e Bache (2012), que estudaram relações causais e elasticidades entre os preços da soja, do farelo e do óleo de soja nos mercados externo e doméstico, concluindo que os preços internos são antecipados pelos preços externos e transmitidos com até uma semana de defasagem.

Vale ressaltar que a soja brasileira sofre concorrência com a soja produzida na Argentina e nos USA. Alguns trabalhos que tratam dessa concorrência são Bastos Filho e Rocha (2001), que analisaram as políticas públicas que foram positivas e as que prejudicaram a competitividade do complexo da soja entre 1994 e 1998; Del Corso et al. (2006), que estudaram a existência de uma relação de equilíbrio de longo prazo entre o preço da soja no mercado brasileiro e norte-americano, apresentando comportamentos similares entre 1995 e 2005; Poerschke e Prieb (2006), que fizeram um estudo sobre a competitividade do complexo da soja no Brasil no contexto do comércio internacional; Barbosa e Nogueira Júnior (2007), que compararam as características da agroindústria da soja no Brasil e na Argentina; além de CAS (2008), cujo relatório analisou o mercado da soja em países do Cone Sul: Argentina, Brasil, Chile, Paraguai e Uruguai. Rodrigues (2009), por sua vez, estudou os efeitos da redução da escala tarifária de importação de produtos pela União Européia e China e seus resultados sugerem que o Brasil obtém maior ganho na exportação de produtos

industrializados, derivados do café e da soja. Um outro trabalho interessante é o de Sampaio et al. (2006), que analisa o mercado internacional da soja, considerando a introdução da soja transgênica, os incentivos dos USA à produção de soja e a utilização de taxas de câmbio flutuantes pelo Brasil e pela Argentina. Os resultados obtidos mostram que para o Brasil, a expansão do mercado se apresenta promissora, uma vez que apresenta custos competitivos e é o único país produtor com possibilidade de expansão da produção.

3.3 Os Níveis de Planejamento das Empresas do Complexo Agroindustrial da Soja no Brasil

São tratados, nesta tese, dois horizontes de planejamento para as empresas que atuam no complexo agroindustrial da soja no Brasil, o horizonte de curto prazo e o horizonte de longo prazo. Devido ao foco no curto prazo, as durações das atividades realizadas são relevantes, devendo ser consideradas. Alguns exemplos, tais como a duração das atividades de transporte, transbordo, industrialização e a permanência da soja nos armazéns contribuem para a dificuldade de gestão e para um aumento da complexidade dos modelos a serem formulados. Os impactos desses tempos recaem sobre o gerenciamento das capacidades de cada uma das estruturas consideradas e influenciam diretamente o cumprimento dos prazos estabelecidos para entrega dos produtos nos destinos finais.

Já no longo prazo, os horizontes de planejamento incluem alguns anos. Os tempos de execução das atividades são irrelevantes, considerando-se que as capacidades disponíveis permitem que toda a demanda, descrita de forma agregada, possa ser atendida dentro do horizonte planejado. Nesse contexto, também é importante se fazer análises dos valores presente líquidos dos investimentos que podem ser realizados, no caso, com a instalação de terminais intermodais, armazéns e indústrias de esmagamento e refino.

Em ambos os casos, as decisões que devem ser tomadas sofrem influência dos impactos da sazonalidade da soja, descritos em Ojima (2006b). No curto prazo, a ocorrência de um pico de colheita, que ocorre entre os meses de março e abril, provoca alterações nos custos de frete, como mostrados na Figura 3.10. Além dessa variação nos custos, as atividades durante o período de pico de colheita também sofrem os efeitos de congestionamento das vias e terminais de transporte, além da lotação de grande parte das estruturas de armazenagem. No contexto

estratégico, os efeitos da sazonalidade da produção de soja também devem ser considerados, pois ao se investir em aumento das capacidades de armazenagem, por exemplo, é importante definir o momento em que a nova instalação deve entrar em operação, podendo esse novo armazém absorver alguns efeitos locais relacionados a esse pico de produção.

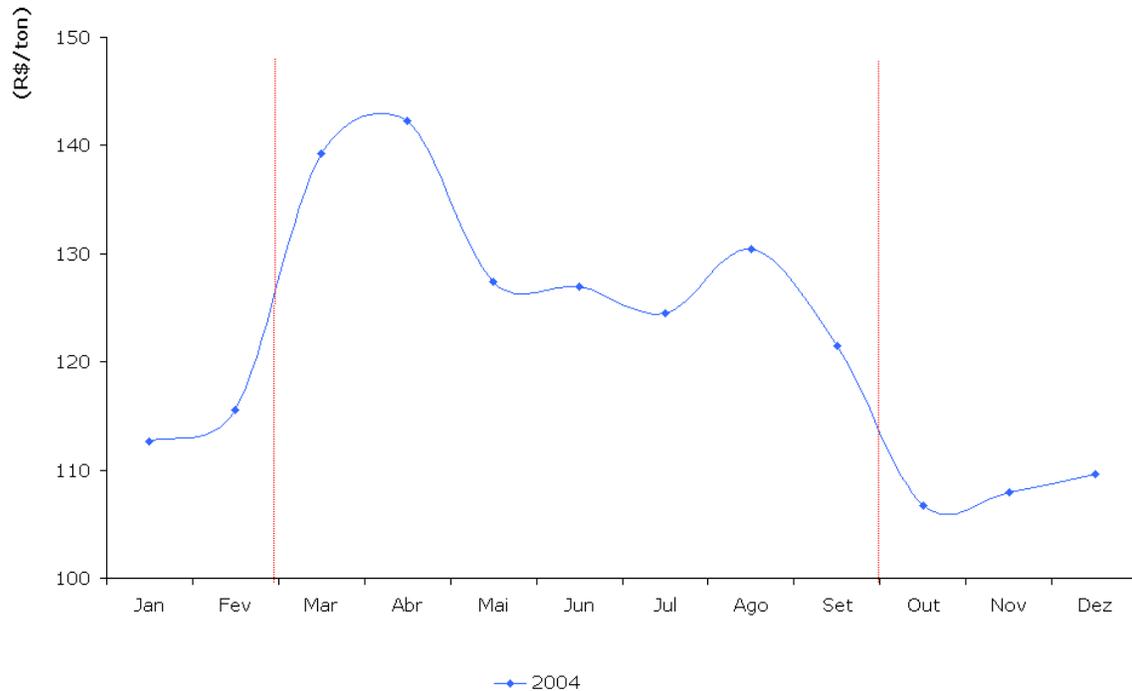


Figura 3.10 – Evolução dos custos de frete rodoviário da soja em 2004

Fonte: Ojima (2006b)

3.4 Considerações Gerais

A configuração de toda a estrutura física envolvida, como as plantações de soja, a estrutura de transporte intermodal e de escoamento disponíveis, possuem contextos históricos que explicam os desafios encontrados para a exploração do agronegócio da soja no Brasil. As empresas que atuam nesse setor, ao se estabelecerem, nos últimos 50 anos, em um sistema agrícola e de transportes ainda em desenvolvimento, enfrentam dificuldades adicionais relativas à distribuição de armazéns e indústrias de esmagamento e refino.

Com relação a esses pontos, foi feita uma rápida descrição bibliográfica dos trabalhos publicados no Brasil que, de alguma forma, podem fornecer informações sobre o sistema que envolve a integração da estrutura física do complexo, com seus agentes, no caso, as empresas atuantes no agronegócio da soja, dentro de um determinado contexto de planejamento. Esse levantamento foi extremamente útil, pelo fornecimento de informações que levaram a um melhor entendimento dos problemas de planejamento que são tratados nesta tese, abordados a partir do próximo capítulo, o Capítulo 4.

Além da representação em redes para a estrutura física do complexo agroindustrial da soja no Brasil, os apontamentos deste capítulo também foram úteis para a caracterização de premissas dos modelos de planejamento operacional e estratégico, que são apresentados nos Capítulos 5 e 6, respectivamente. No Capítulo 7, em que são apresentados os experimentos computacionais com os modelos formulados nos Capítulos 5 e 6, algumas das fontes aqui citadas foram utilizadas para a construção de exemplares realistas.

Outras pesquisas interessantes, que se voltam principalmente para as estruturas de governança que regem as relações entre os diversos agentes no complexo da soja, aparecem, por exemplo, em Silva (2006) é feita uma análise sobre a governança e coordenação exercida pelo porto de Paranaguá no complexo agroindustrial da soja no estado do Paraná; Lima Filho (2007), em que são descritas as relações contratuais no complexo produtiva da soja. Um estudo de caso realizado, e fundamentado na economia dos custos de transação, mostrou que relações contratuais entre uma esmagadora, uma cooperativa agrícola e uma operadora de transportes não se cumpriu conforme o esperado. Gonçalves (2008) analisou políticas públicas e de empresas de grande porte, em relação à modernização do cerrado e o complexo da soja no Sul goiano entre 1970 e 2005; Buainain (2012) apresentou uma análise mais recente da governança no complexo da soja; Luremann (2012) estudou o desenvolvimento do agronegócio no Brasil central com foco no estado de Mato Grosso; Matos e Matos (2012) e estudaram o desenvolvimento da atividade econômica da soja no noroeste do Paraná entre 1996 a 2006; Paula e Faveret Filho (2012) traçaram um perfil do complexo agroindustrial da soja, relacionando oportunidades e riscos envolvidos; Pereira et al. (2012) apresentaram uma caracterização do sistema logístico de transporte para o agronegócio.

4 REPRESENTAÇÃO EM REDE DO COMPLEXO AGROINDUSTRIAL DA SOJA

Para representar o complexo agroindustrial da soja no Brasil, nesta tese foi criada uma estrutura em múltiplas redes de transporte paralelas, organizadas em um grafo direcionado. A princípio, essa representação foi inspirada nos trabalhos de Arnold et al. (2001) e (2004). Como já foi dito no Capítulo 2, em Arnold et al. (2001), foram propostas 6 formulações para um problema de localização de terminais intermodais, baseadas na representação de múltiplas redes de transporte, sendo uma para cada modal considerado. Arnold et al. (2004), por sua vez, propuseram uma reformulação para esses modelos e mostraram uma aplicação prática na Península Ibérica. A reformulação de Arnold et al. (2004) consistiu na representação dos terminais intermodais como arcos na rede em vez de vértices, com a justificativa de que essa consideração permite a redução significativa do número de variáveis de decisão do modelo de localização de terminais intermodais quando a rede física representada é esparsa.

Com base em duas dessas ideias, a de representação de múltiplas redes de transporte paralelas e da sua interligação por terminais intermodais localizados em arcos na rede, foi proposta uma rede esparsa para a representação do complexo agroindustrial da soja no Brasil. O propósito deste capítulo é o de apresentar essa rede, por onde os produtos fluem das áreas de produção para as de consumo. Na Seção 4.1, é apresentada a estrutura básica da rede, formada por vértices de oferta, de demanda, das redes de transporte rodoviária, ferroviária e hidroviária, além dos arcos que fazem as ligações entre esses vértices e redes de transporte. São apresentadas as propriedades que tornam essa estrutura de rede extremamente esparsa e as premissas práticas que foram incorporadas na caracterização dos fluxos e custos associados. Na Seção 4.2, outras estruturas específicas da cadeia agroindustrial da soja no Brasil, como os armazéns e as indústrias, são inseridas à estrutura básica. A inserção desses elementos também mantém a rede esparsa e organizada com base em algumas premissas práticas. Ao final do capítulo, na Seção 4.3, a estrutura de rede proposta é comparada com a rede utilizada por Arnold et al. (2004), comparando as definições de conjuntos e, conseqüentemente, de variáveis e restrições resultantes da modelagem de problemas a partir dessas duas estruturas de rede. Além disso, são destacados os principais pontos nessa representação que facilitam a modelagem dos problemas dos capítulos seguintes e a sua utilização em outras aplicações.

4.1 A Estrutura Básica da Rede

A principal característica dessa notação é a utilização de múltiplas redes paralelas para representar os modais viários disponíveis. A Figura 4.1 mostra um pequeno exemplo, contendo 3 modais – rodoviário, ferroviário e hidroviário. Cada um dos pontos geográficos representados no mapa do Brasil deve ser projetado em cada uma das redes modais em que possui alguma ligação, podendo assim, ser representado em mais de uma rede de transporte. Cada via de transporte é representada por uma linha horizontal cheia, na rede correspondente ao modal que se deseja representar. Interligando essas redes de transporte, têm-se os terminais intermodais, representados por linhas verticais tracejadas que ligam duas redes modais distintas em um único ponto geográfico.

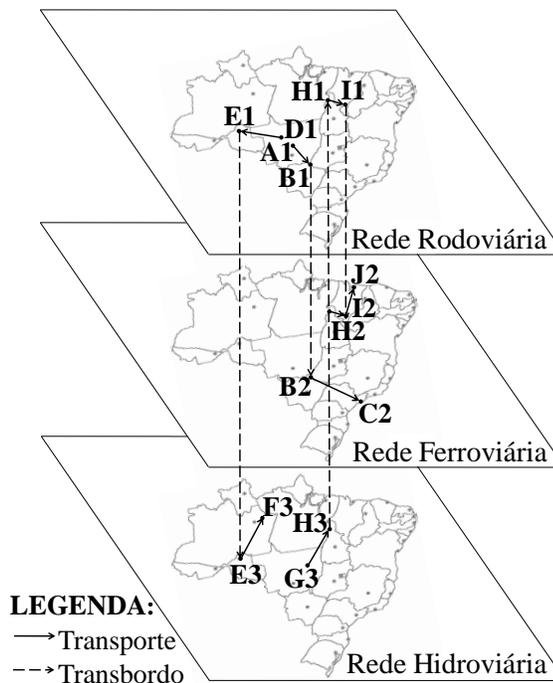


Figura 4.1 – Estrutura intermodal formada por várias redes de transporte

Por exemplo, o ponto **A**, situado em Primavera do Leste, no Mato Grosso e representado por **A1** na rede rodoviária, é a origem da primeira rota intermodal representada. A partir dele, chega-se ao ponto **B**, em Alto Taquari – MT, cuja primeira replicação está na rede

rodoviária e é representado por **B1**. De **B1**, é possível alcançar o modal ferroviário, chegando a **B2**. Percebe-se, dessa forma, que a ligação **B1** → **B2** é um terminal intermodal do tipo rodo-ferroviário. De **B2**, é possível alcançar o ponto **C**, que é o porto de Santos, por **C2**, no litoral de São Paulo. As demais ligações dessa rota, já citadas, são vias de transporte, sendo **A1** → **B1** uma rodovia e **B2** → **C2** uma ferrovia.

O uso dessa notação é especialmente vantajoso para a representação de múltiplos transbordos em uma única rota, como ocorre em diversas rotas no Brasil utilizadas para o transporte de produtos da cadeia agroindustrial da soja. Como exemplo, tem-se a rota que parte de Nova Xavantina – MT e chega ao porto de Itaqui – MA, representada em **G3** → **H3** → **H1** → **I1** → **I2** → **J2**, que passa por dois terminais, um hidro-rodoviário em Xambioá – TO, e um rodo-ferroviário em Estreito – MA. Na rota de Sorriso – MT até Itacoatiara – AM, que passa pelos pontos **D1** → **E1** → **E3** → **F3** apenas um terminal é utilizado, porém o terminal **E1** → **E3**, em Porto Velho – RO, é do tipo rodo-hidroviário, que ainda não tinha sido representado nas demais rotas.

A representação básica do complexo agroindustrial da soja necessita da definição dos seguintes conjuntos de vértices: de oferta, de demanda e da rede de transporte. As áreas produtoras ou centróides são representados por um conjunto de vértices ou regiões de oferta, denominado V_O , enquanto o conjunto de pontos de demanda é representado pelo conjunto V_D . Cada um dos modais de transporte, isoladamente, é representado por um grafo direcionado, $G_m = (V_m, A_m)$, $m = \{1 = \text{rodoviário}, 2 = \text{ferroviário}, 3 = \text{hidroviário fluvial}\}$, em que V_m representam os conjuntos de vértices e A_m os conjuntos de arcos que representam as vias de transporte. Os terminais intermodais são representados por um conjunto de arcos A_I , que faz as ligações entre as redes de transporte disponíveis. Um último conjunto de arcos, A' , contém as ligações entre os vértices de oferta e demanda e a rede de transporte. Dessa forma, a representação básica da cadeia agroindustrial da soja no Brasil pode ser feita por um grafo direcionado $G = (V, A)$, em que $V = V_O \cup V_D \cup V_1 \cup V_2 \cup V_3$ e $A = A' \cup A_1 \cup A_2 \cup A_3 \cup A_I$.

A partir do exemplo a seguir – com 4 vértices de oferta, 2 vértices de demanda e 3 modais de transporte – ilustrado pela Figura 4.2, é possível fazer novas considerações a respeito dessa notação utilizada e verificar a sua principal vantagem, que consiste no alto grau de esparsidade da matriz de adjacências resultante, por mais denso que seja o mapa representado.

Considere os seguintes elementos para os conjuntos de vértices:

$$V_O = \{\mathbf{o1}, \mathbf{o2}, \mathbf{o3}, \mathbf{o4}\},$$

$$V_D = \{\mathbf{d1}, \mathbf{d2}\},$$

$$V_I = \{\mathbf{r1}, \mathbf{r2}, \mathbf{r3}, \mathbf{r4}, \mathbf{r5}\},$$

$$V_2 = \{\mathbf{f3}, \mathbf{f4}, \mathbf{f5}\} \text{ e}$$

$$V_3 = \{\mathbf{h1}, \mathbf{h2}, \mathbf{h4}, \mathbf{h5}\}.$$

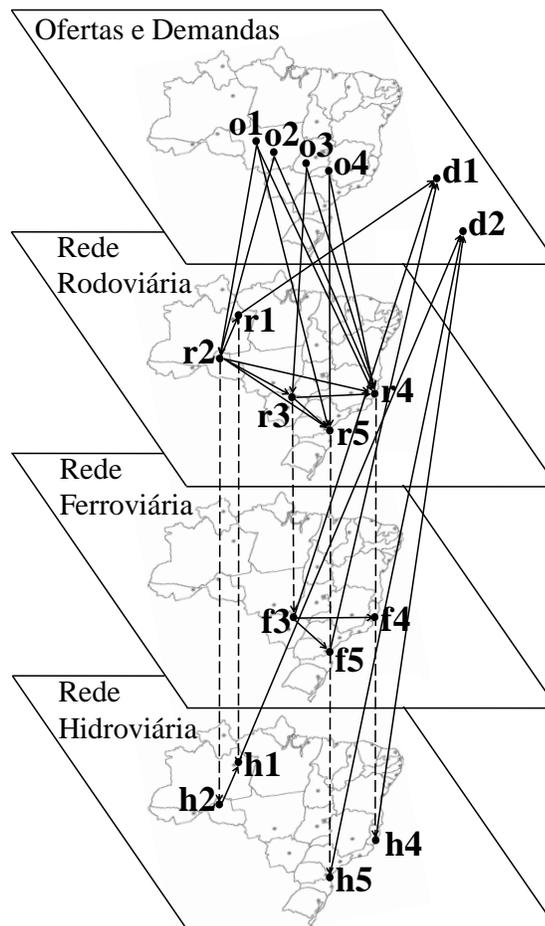


Figura 4.2 – Exemplo de rede com $|O| = 4$, $|D| = 2$, $|V_I| = 5$, $|V_2| = 3$ e $|V_3| = 4$

E os seguintes elementos para os conjuntos de arcos:

$$A' = \{(\mathbf{o1}, \mathbf{r2}), (\mathbf{o1}, \mathbf{r4}), (\mathbf{o1}, \mathbf{r5}), (\mathbf{o2}, \mathbf{r2}), (\mathbf{o2}, \mathbf{r4}), (\mathbf{o3}, \mathbf{r3}), (\mathbf{o3}, \mathbf{r4}), (\mathbf{o4}, \mathbf{r4}),$$

$$(\mathbf{o4}, \mathbf{r5}), (\mathbf{r3}, \mathbf{d1}), (\mathbf{f3}, \mathbf{d1}), (\mathbf{f5}, \mathbf{d1}), (\mathbf{h1}, \mathbf{d2}), (\mathbf{h4}, \mathbf{d2}), (\mathbf{h5}, \mathbf{d2})\},$$

$$A_1 = \{(r2, r1), (r2, r3), (r2, r4), (r2, r5), (r3, r4), (r3, r5)\},$$

$$A_2 = \{(f3, f4), (f3, f5)\},$$

$$A_3 = \{(h2, h1)\} \text{ e}$$

$$A_4 = \{(r3, f3), (r1, h1), (r2, h2), (r4, h4), (r5, h5)\}.$$

A matriz de adjacências associada ao grafo da Figura 4.2 é ilustrada na Figura 4.3. O grau de esparsidade dessa matriz é de 91,04%; sua densidade é, portanto, de 8,96%. Para se entender por que toda rede de transporte representada dessa forma sempre apresenta uma estrutura altamente esparsa, é necessário analisar esse exemplo mais atentamente. Cada uma das regiões demarcadas é uma submatriz de características bem definidas. Dessa forma, os conjuntos de arcos definidos em Arnold et al. (2004) podem ser desmembrados em subconjuntos disjuntos e mutuamente exaustivos e, para cada um deles, existem regras de preenchimento da matriz de adjacências, qualquer que seja a rede física que se deseja representar. Esse maior detalhamento da matriz de adjacências realizado é bastante útil para uma definição mais compacta dos domínios dos parâmetros, variáveis e restrições dos modelos formulados nos Capítulos 5 e 6.

	o1	o2	o3	o4	r1	r2	r3	r4	r5	f3	f4	f5	h1	h2	h4	h5	d1	d2	
o1	0	0	0	0	0	1	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
o2	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
o3	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
o4	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
r1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	
r2	0	0	0	0	1	0	1	1	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	
r3	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	1	0	
r4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	
r5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	
f3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	1	0	
f4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
f5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	
h1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	
h2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	
h4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	
h5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	
d1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
d2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	

Figura 4.3 – Matriz de adjacências associada ao exemplo de rede

A submatriz de dimensões $|V_O| \times |V_I|$, definida entre as linhas **o1** a **o4** e as colunas **r1** a **r5** e destacada na Figura 4.4, representa os arcos de A' que fazem a ligação dos vértices de oferta com a rede rodoviária. Denominada por A'_o , essa submatriz representa os arcos em que ocorre a primeira etapa do transporte, logo após a operação de compra da soja em grão, por parte da empresa foco da cadeia. A soja comprada dos produtores, sejam eles fazendeiros autônomos ou cooperativas, é retirada das fazendas ou dos armazéns públicos exclusivamente por caminhões graneleiros. A densidade máxima da submatriz A'_o , em termos teóricos, pode ser de 100%, uma vez que se queira ligar cada um dos pontos de oferta a todas as cidades acessíveis por rodovia. Essa consideração não é coerente com a prática, uma vez que a soja adquirida pelas empresas é levada até a rodovia mais próxima e, a partir dela, ocorre a cobrança do frete de transporte rodoviário até o próximo destino da referida carga. No exemplo dado, $|A'_o| = 9$, embora teoricamente poder-se-ia ter até 20, que é o número total de elementos de uma matriz de dimensões 4×5 .



	o1	o2	o3	o4	r1	r2	r3	r4	r5	f3	f4	f5	h1	h2	h4	h5	d1	d2			
o1	0	0	0	0	0	1	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
o2	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
o3	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
o4	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
r1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0		
r2	0	0	0	0	1	0	1	1	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0		
r3	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0		
r4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0		
r5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0		
f3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	1	0		
f4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
f5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	
h1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	
h2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	
h4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	
h5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
d1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
d2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

	r1	r2	r3	r4	r5
o1	0	1	0	1	1
o2	0	1	0	1	0
o3	0	0	1	1	0
o4	0	0	0	1	1

Figura 4.4 – Arcos que ligam os vértices de oferta à rede de transporte (A'_o)

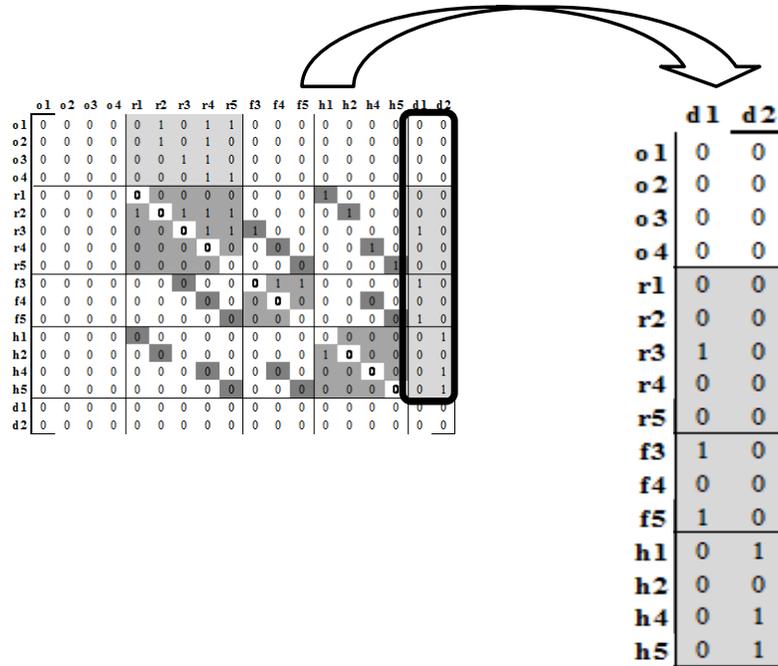
A submatriz definida entre as linhas **r1** a **h5** as colunas **d1** e **d2**, cuja dimensão é dada por $[|V_I|+|V_2|+|V_3|] \times |V_D|$ e destacada na Figura 4.5, define o conjunto de arcos A'_D . Essa submatriz representa os arcos que ligam as redes de transporte disponíveis aos vértices de demanda na rede. Nesse caso específico, não é necessário realizar um transbordo final da carga para uma rodovia, caso o trecho final não tenha sido realizado neste modal, pois o próprio arco de A'_D ,

ligando o ponto final de transporte ao vértice de demanda, pode ser utilizado para a representação dessa etapa e a cobrança do respectivo custo associado. Nesse caso, a densidade da submatriz também é menor que 100%, pois não haverá, pelo menos em teoria, um local na rede que é ao mesmo tempo vértice de oferta e demanda, nem vértices de demanda que sejam acessíveis por todos os vértices de todas as redes de transporte. É interessante definir ainda a necessidade de transporte entre vértices de oferta e demanda, de forma que a submatriz de dimensões $|V_O| \times |V_D|$, representada entre as linhas **o1** a **o4** e as colunas **d1** e **d2**, seja sempre nula.

Quanto às demais submatrizes mostradas na Figura 4.5, é possível verificar que correspondem às ligações das redes de transporte com os vértices de demanda. Por exemplo, observando a submatriz de dimensões $|V_I| \times |V_D|$, definida entre as linhas **r1** a **r5** e as colunas **d1** e **d2**, percebe-se que é possível acessar **d1** apenas pelo ponto rodoviário representado por **r3** e que **d2** não pode ser acessado por meio de nenhuma rodovia. Se continuarmos a mesma análise para as submatrizes de acesso ferroviário, de dimensões $|V_2| \times |V_D|$ e definida **f3** a **f5** e colunas **d1** e **d2** e, de acesso hidroviário, de dimensões $|V_3| \times |V_D|$ e definida entre as linhas **h1** a **h5** e colunas **d1** e **d2**, é possível verificar que **d1** é acessível por rodovias e ferrovias, enquanto **d2** só é acessível por hidrovias. No caso do complexo agroindustrial da soja no Brasil, os vértices de demanda de exportação são acessíveis exclusivamente pelo modal hidroviário marítimo, uma vez que o frete aéreo não é economicamente considerável para o transporte da soja e seus derivados. Apesar dessas considerações sobre os tipos de modais que dão acesso para cada vértice de demanda, não é necessário formalizar uma subdivisão para a submatriz A'_D , pois esta não facilitaria a descrição dos modelos matemáticos que são formalizados nos dois capítulos seguintes.

Os terminais intermodais, que são arcos que fazem a ligação entre dois vértices pertencentes a modais distintos, também podem ser agrupados em subconjuntos do conjunto A_I , como mostrado na Figura 4.6. Por exemplo, na Figura 4.6(a), os arcos do subconjunto A_{I12} , com dimensões $|V_I| \times |V_2|$, realizam o transbordo rodo-ferroviário, estando relacionados à submatriz de adjacências entre as linhas **r1** a **r5** e as colunas **f3** a **f5**, e assim por diante para os demais tipos de terminais intermodais. A densidade máxima de cada uma dessas submatrizes é igual à sua menor dimensão. No caso de A_{I12} , têm-se que $|V_I| = 5$ e $|V_2| = 3$. Isso significa que haverá no máximo 3 terminais rodo-ferroviários na rede física representada, pois um terminal intermodal, de acordo com a sua definição, liga duas redes de transportes distintas em um mesmo ponto geográfico e,

como só há 3 pontos na rede ferroviária, só poderão ser instalados no máximo 3 terminais desse tipo na rede.



	o1	o2	o3	o4	r1	r2	r3	r4	r5	f3	f4	f5	h1	h2	h4	h5	d1	d2
o1	0	0	0	0	0	1	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
o2	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
o3	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
o4	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
r1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
r2	0	0	0	0	1	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
r3	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	1	0
r4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
r5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
f3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	1
f4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
f5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
h1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
h2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
h4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
h5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
d1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
d2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

	d1	d2
o1	0	0
o2	0	0
o3	0	0
o4	0	0
r1	0	0
r2	0	0
r3	1	0
r4	0	0
r5	0	0
f3	1	0
f4	0	0
f5	1	0
h1	0	1
h2	0	0
h4	0	1
h5	0	1

Figura 4.5 – Representação do transporte de carga a um ponto de demanda (A'_d)

Os arcos de cada modal – rodoviário, ferroviário e hidroviário, do modo como foi esquematizado – também são representados em submatrizes de dimensões $|V_1| \times |V_1|$, $|V_2| \times |V_2|$ e $|V_3| \times |V_3|$, respectivamente. Os arcos pertencentes a cada modal são mostrados na Figura 4.7 e é possível verificar visualmente que essas submatrizes são quadradas com diagonal principal nula. As submatrizes referentes às redes de cada modal de transporte podem ter uma estrutura densa, caso haja uma ligação entre cada um dos pontos do modal, formando um grafo completo – o que não é comum na prática. Porém, como já foi citado, as diagonais principais são nulas, pois não faz sentido realimentação entre os vértices da rede de transporte.

Nas demais regiões que representam os arcos de transporte e transbordo, observa-se que todos os pontos são duplicados para cada um dos modais disponíveis. Dessa forma, **r4**, **f4** e **h4** representam uma mesma localidade na rede física real, significando que nesse ponto existem acessos rodoviário, ferroviário e hidroviário. Porém, para que seja possível a realização de embarque ou desembarque nos dois últimos modais, é preciso que exista um terminal intermodal

instalado, como o que está representado entre **r4** e **h4** na Figura 4.8. As submatrizes referentes aos terminais intermodais, ao contrário, são altamente esparsas, pois fora da diagonal principal todos os elementos são necessariamente nulos, como já foi explicado. Um outro ponto importante é a possibilidade de compressão da matriz de adjacências, o que pode ser feito quando há linhas e colunas nulas na rede de transporte. Por exemplo, na Figura 4.9, todas as linhas e colunas nulas da submatriz de transporte foram suprimidas, o que ocorreu para os elementos **f1**, **f2** e **h3**.

	o1	o2	o3	o4	r1	r2	r3	r4	r5	f3	f4	f5	h1	h2	h4	h5	d1	d2	
o1	0	0	0	0	0	1	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
o2	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
o3	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
o4	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
r1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
r2	0	0	0	0	1	0	1	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
r3	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0
r4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
r5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
f3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
f4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
f5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
h1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
h2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
h4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
h5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
d1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
d2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

(a) Terminais rodo-ferroviários (A_{I12})

	o1	o2	o3	o4	r1	r2	r3	r4	r5	f3	f4	f5	h1	h2	h4	h5	d1	d2	
o1	0	0	0	0	0	1	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
o2	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
o3	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
o4	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
r1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
r2	0	0	0	0	1	0	1	1	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
r3	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
r4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
r5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
f3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
f4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
f5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
h1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
h2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
h4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
h5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
d1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
d2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

(b) Terminais rodo-hidroviários (A_{I13})

	o1	o2	o3	o4	r1	r2	r3	r4	r5	f3	f4	f5	h1	h2	h4	h5	d1	d2	
o1	0	0	0	0	0	1	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
o2	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
o3	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
o4	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
r1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
r2	0	0	0	0	1	0	1	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
r3	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
r4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
r5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
f3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
f4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
f5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
h1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
h2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
h4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
h5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
d1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
d2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

(c) Terminais ferro-rodoviários (A_{I21})

	o1	o2	o3	o4	r1	r2	r3	r4	r5	f3	f4	f5	h1	h2	h4	h5	d1	d2	
o1	0	0	0	0	0	1	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
o2	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
o3	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
o4	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
r1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
r2	0	0	0	0	1	0	1	1	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
r3	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
r4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
r5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
f3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
f4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
f5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
h1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
h2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
h4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
h5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
d1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
d2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

(d) Terminais ferro-hidroviários (A_{I23})

	o1	o2	o3	o4	r1	r2	r3	r4	r5	f3	f4	f5	h1	h2	h4	h5	d1	d2	
o1	0	0	0	0	0	1	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
o2	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
o3	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
o4	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
r1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
r2	0	0	0	0	1	0	1	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
r3	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
r4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
r5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
f3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
f4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
f5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
h1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
h2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
h4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
h5	0	0	0	0	0														

De acordo com a definição dessas regiões na matriz de adjacências da rede, é possível perceber algumas propriedades que garantem a esparsidade da rede, mesmo quando a estrutura física de transporte representada for densa. Por exemplo, os elementos da submatriz $V_O \times V$, que representa as possibilidades de roteirização a partir dos vértices de oferta de soja, possui arcos representados apenas na porção definida por $V_O \times V_I$, pois os demais vértices de V não são ligados diretamente a V_O . Essa propriedade é ilustrada na Figura 4.10, mostrando que cada vértice de oferta é ligado apenas às rodovias mais próximas, conferindo um alto grau de esparsidade também à submatriz que define A'_O , enquanto as demais submatrizes destacadas possuem somente elementos nulos.

	o1	o2	o3	o4	r1	r2	r3	r4	r5	f3	f4	f5	h1	h2	h4	h5	d1	d2	
o1	0	0	0	0	0	1	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
o2	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
o3	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
o4	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
r1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	
r2	0	0	0	0	1	0	1	1	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	
r3	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	1	0	
r4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	
r5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	
f3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	1	0	
f4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
f5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	
h1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	
h2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	
h4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	
h5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	
d1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
d2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	

(a) Rede rodoviária (A_1)

	o1	o2	o3	o4	r1	r2	r3	r4	r5	f3	f4	f5	h1	h2	h4	h5	d1	d2
o1	0	0	0	0	0	1	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
o2	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
o3	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
o4	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
r1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
r2	0	0	0	0	1	0	1	1	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0
r3	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	1	0
r4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
r5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
f3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	1	0
f4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
f5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
h1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
h2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
h4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
h5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
d1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
d2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

(b) Rede ferroviária (A_2)

	o1	o2	o3	o4	r1	r2	r3	r4	r5	f3	f4	f5	h1	h2	h4	h5	d1	d2
o1	0	0	0	0	0	1	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
o2	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
o3	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
o4	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
r1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
r2	0	0	0	0	1	0	1	1	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0
r3	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	1	0
r4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
r5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
f3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	1	0
f4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
f5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
h1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
h2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
h4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
h5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
d1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
d2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

(c) Rede hidroviária (A_3)Figura 4.7 – Arcos que representam as redes de transporte em cada modal (A)

No outro extremo da cadeia, o fluxo é impedido diretamente entre vértices de oferta e demanda e entre os próprios vértices de demanda, como pode ser visto na Figura 4.11(a). A

submatriz de dimensões $|V/x|V_D|$, definida entre as linhas **o1** a **d2** e as colunas **d1** e **d2**, apresenta apenas ligações das redes modais com as regiões de demanda, conforme ilustrado na Figura 4.11(b). Também não é possível escoar soja a partir de um vértice de demanda, o que pode ser visto pela submatriz de dimensões $|V_D|x|V|$, definida entre as linhas **d1** e **d2** e as colunas **o1** a **d2**, que só apresenta elementos nulos, como mostrado na Figura 4.11(c). Dessa forma, é possível perceber que os vértices de demanda são vértices terminais na rede, pois apenas recebem fluxo, sendo incapazes de gerar fluxos.

	o1	o2	o3	o4	r1	r2	r3	r4	r5	f3	f4	f5	h1	h2	h4	h5	d1	d2
o1	0	0	0	0	0	1	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
o2	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
o3	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
o4	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
r1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
r2	0	0	0	0	1	0	1	1	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0
r3	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	1	0
r4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
r5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
f3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	1	0
f4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
f5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
h1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
h2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
h4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
h5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
d1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
d2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Figura 4.8 – Terminal rodo-hidroviário no ponto geográfico “4”

	o1	o2	o3	o4	r1	r2	r3	r4	r5	f1	f2	f3	f4	f5	h1	h2	h3	h4	h5	d1	d2	
o1	0	0	0	0	0	1	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
o2	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
o3	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
o4	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
r1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
r2	0	0	0	0	1	0	1	1	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
r3	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
r4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
r5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
f1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
f2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
f3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0
f4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
f5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
h1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
h2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
h3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
h4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
h5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
d1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
d2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Figura 4.9 – Linhas e colunas suprimidas nulas suprimidas em **f1**, **f2** e **h3**

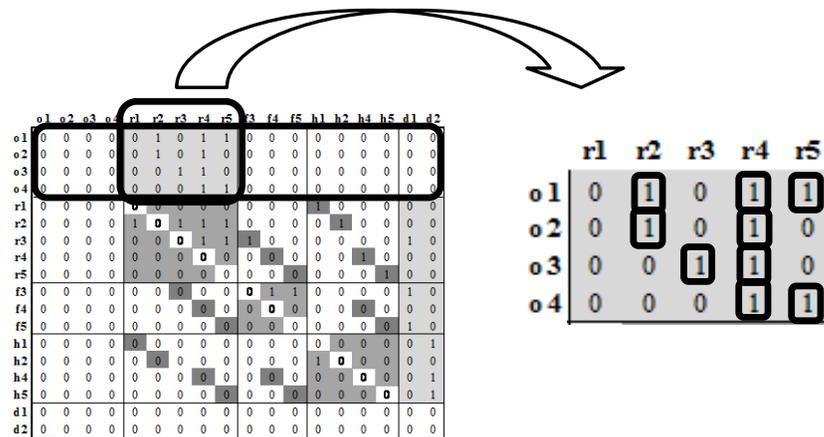
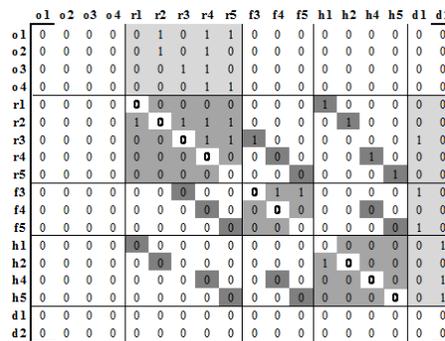
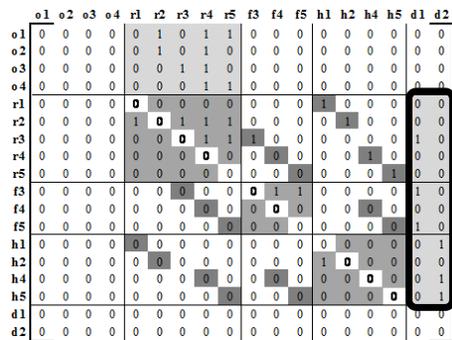


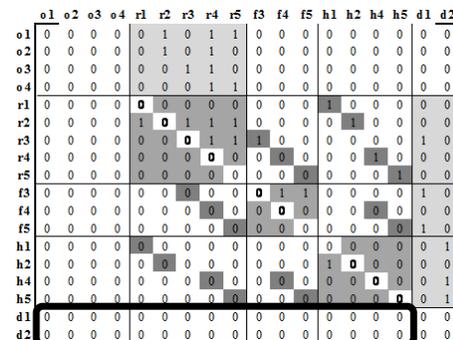
Figura 4.10 – Ligações possíveis a partir dos vértices de oferta de soja



(a) Não há fluxo direto entre regiões de oferta e demanda ou entre vértices de demanda



(b) Ligações até os vértices de demanda



(c) Não há fluxo a partir das demandas

Figura 4.11 – Ligações possíveis até os pontos de demanda

Dessa maneira, é possível redefinir o grafo $G=(V,A)$, desmembrando o conjunto A , de acordo com os subconjuntos relacionados às linhas, colunas e elementos da matriz de adjacências da rede que foram recém discutidos: $A = A'_O \cup A'_D \cup A_1 \cup A_2 \cup A_3 \cup A_I$.

4.2 Elementos da Rede Específicos do Complexo Agroindustrial da Soja

A rede básica, que apresenta os mesmos elementos da rede utilizada por Arnold et al. (2001, 2004), não é suficiente para a representação do complexo agroindustrial da soja no Brasil. Por isso, é preciso acrescentar dois novos elementos a essa estrutura: os armazéns e as indústrias de esmagamento e refino. Nas subseções que se seguem, cada uma dessas estruturas físicas é inserida à rede, ao mesmo tempo em que as premissas práticas consideradas são relacionadas às novas características e regiões da matriz de adjacências associada.

4.2.1 Os armazéns

Os armazéns podem estar localizados em qualquer ponto ao longo da rede rodoviária, mas estão especialmente concentrados nos terminais intermodais e nas indústrias de esmagamento e refino. Os armazéns são representados por vértices auxiliares que fazem parte de um conjunto denominado V_E . Esses vértices estão ligados à rede rodoviária, como mostrado na Figura 4.12, devido ao fato de todos os armazéns possuírem acesso por rodovia, mesmo quando possuem outros tipos de acesso viário. É possível observar o acréscimo dos armazéns à rede básica anteriormente construída, com a inclusão de dois arcos, um de entrada e outro representando a saída dos produtos depois de estocados. Dessa modificação, resultam as seguintes modificações nas definições dos conjuntos de vértices e arcos: $V = V_O \cup V_D \cup V_1 \cup V_2 \cup V_3 \cup V_E$ e $A = A'_O \cup A'_D \cup A_1 \cup A_2 \cup A_3 \cup A_I \cup A_E$, sendo que $|A_E| = 2|V_E|$, pois sempre existe um arco de entrada e um de saída para cada armazém representado.

A nova matriz de adjacências associada a uma rede com três armazéns localizados nos pontos geográficos “1”, “2” e “5” é apresentada na Figura 4.13. Os arcos de ligação dos

armazéns com a rede de transporte se dispõem em duas regiões distintas, uma para representar a entrada dos produtos nos armazéns e outra para representar o fluxo de saída. Na primeira região, definida pela submatriz definida entre as linhas **r1** a **r5** e as linhas **e1** a **e5**, de dimensões $|V_I| \times |V_E|$, estão representados os arcos associados à entrada dos armazéns. Chegando, geralmente a partir da rede rodoviária, os produtos da rede podem receber diversos serviços, tais como, descarga, pesagem, limpeza e embalagem, por exemplo. Depois disso, os produtos permanecem em estoque por um período de tempo, antes de retornar à rede de transporte.

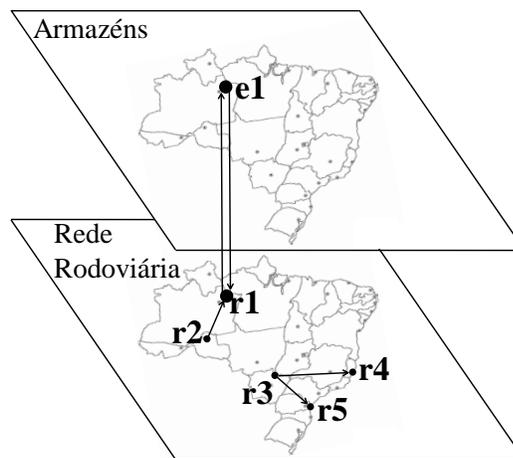


Figura 4.12 – Ligação dos armazéns à rede rodoviária

	o1	o2	o3	o4	r1	r2	r3	r4	r5	f3	f4	f5	h1	h2	h4	h5	e1	e2	e5	d1	d2
o1	0	0	0	0	0	1	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
o2	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
o3	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
o4	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
r1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0
r2	0	0	0	0	1	0	1	1	1	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0
r3	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
r4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
r5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0
f3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1
f4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
f5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
h1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
h2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
h4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
h5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
e1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
e2	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
e3	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
d1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
d2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Figura 4.13 – Matriz de adjacências da rede acrescida de 3 armazéns

As operações realizadas na saída dos armazéns, como o transbordo da carga para os caminhões, trens, barcas ou navios, a cobrança de tarifas de armazenagem e impostos, são representadas por outro conjunto de arcos. Esses arcos são representados em uma segunda região da matriz de adjacências, cuja submatriz é definida entre as linhas **e1** a **e5** e as colunas **r1** a **r5**, com dimensão dada por $|V_E| \times |V_I|$. Em ambos os casos, essas submatrizes são altamente esparsas, possuindo elementos apenas na diagonal principal da matriz quadrada correspondente. Com a supressão de linhas e colunas vazias da matriz de adjacências, como tem sido ilustrado, o número máximo de elementos de cada uma dessas matrizes corresponde à sua menor dimensão, da mesma forma como ocorre na representação dos terminais intermodais.

4.2.2 *As indústrias de esmagamento e refino*

Da mesma forma, as indústrias de esmagamento e refino também podem se localizar em qualquer vértice da malha rodoviária. As ligações são feitas à rede de transporte da mesma forma que no caso dos armazéns. A matriz resultante da inclusão das indústrias de esmagamento e refino, pertencentes a um conjunto de vértices W , é mostrada na Figura 4.14. Percebe-se que a lógica de ligação das unidades industriais é exatamente a mesma dos armazéns, porém, a partir de uma unidade industrial, o fluxo passa a ser multiproduto. Como as fábricas transformam a soja em grão em produtos derivados, esses produtos precisam fluir para a rede de transporte novamente, a fim de serem enviados aos seus destinos finais.

Dispõe-se de três tipos de unidades industriais: as esmagadoras, denotadas por vértices pertencentes a um subconjunto W_1 ; as refinarias, cujos vértices pertencem ao subconjunto W_2 ; e as fábricas que oferecem simultaneamente os processos industriais de esmagamento e refino, pertencentes a W_3 . É necessário, na definição da rede, se diferenciar essas unidades dentro do conjunto de indústrias, sendo bastante conveniente dispor cada tipo em uma ordenação específica. O mais importante, ao se adicionar as indústrias, é que a partir das esmagadoras, podem fluir o farelo e o óleo bruto, que são os produtos derivados da soja em grão, que é a matéria-prima utilizada por esse tipo de fábrica; das refinarias flui somente o óleo refinado, sendo o óleo bruto usado como matéria prima; e das fábricas que oferecem esmagamento e refino, as duas matérias-primas são

admitidas, gerando os três produtos derivados considerados e levando à proibição de saída apenas da soja em grão.

	o1	o2	o3	o4	r1	r2	r3	r4	r5	f3	f4	f5	h1	h2	h4	h5	e1	e2	e5	w2	d1	d2	
o1	0	0	0	0	0	1	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
o2	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
o3	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
o4	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
r1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	
r2	0	0	0	0	1	0	1	1	1	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	1	0	0	
r3	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	
r4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	
r5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	
f3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	
f4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
f5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	
h1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	
h2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
h4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	
h5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	
e1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
e2	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
e3	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
w2	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
d1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
d2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	

Figura 4.14 – Matriz de adjacências da rede acrescida de 1 unidade industrial

Essa definição de padrões de fluxo de produtos é importante nos vértices das indústrias consideradas, obedecendo às regras reforçadas na Figura 4.15. Uma das premissas práticas relacionadas a essa questão diz respeito aos estoques das indústrias, que desempenham função diferente das demais estruturas de armazenagem da rede. Enquanto os armazéns gerais possuem funções de integração de transporte e balanceamento entre oferta e demanda ao longo do horizonte de planejamento, os estoques das unidades industriais servem ainda para estocar matéria-prima. Como só é permitida a saída dos produtos derivados a partir das indústrias, seus estoques não cumprem o mesmo papel daqueles espalhados ao longo da rede e localizados nos terminais intermodais, pelo menos, em relação às matérias-primas que utilizam.

Dessa modificação, resultam as seguintes modificações nas definições dos conjuntos de vértices e arcos: $V = V_O \cup V_D \cup V_1 \cup V_2 \cup V_3 \cup V_E \cup W$ e $A = A'_O \cup A'_D \cup A_1 \cup A_2 \cup A_3 \cup A_I \cup A_E \cup A_W$. Apesar dos demais conjuntos serem identificados pela letra V seguida do índice que identifica o tipo de vértice associado, as indústrias serão descritas

por um conjunto W , e não V_W , para simplificar a notação quando for necessário fazer referência aos subconjuntos W_1 , W_2 e W_3 .

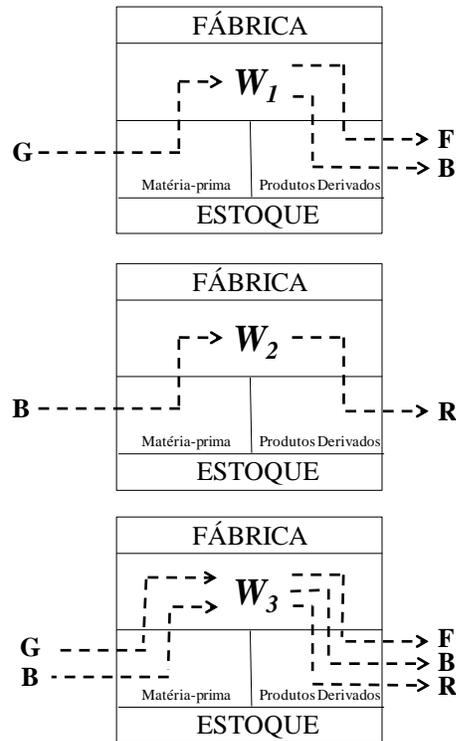


Figura 4.15 – Fluxos de matéria-prima e produtos derivados nas indústrias

4.3 Considerações Gerais

A estrutura de rede proposta para representação do complexo agroindustrial no Brasil se baseia nos trabalhos de Arnold et al. (2001, 2004), que contempla múltiplas redes paralelas para representar os modais viários, que por sua vez, são ligados por arcos que representam os terminais intermodais. A partir da estrutura básica utilizada por Arnold et al. (2004) – composta pelas regiões de oferta, demanda e suas ligações com a rede de transporte intermodal – foram acrescentadas outras estruturas, a fim de representar os armazéns e fábricas existentes no sistema real que foi representado. A Tabela 4.1 compara as duas redes, que apresentam estruturas

semelhantes, apesar da rede proposta apresentar um número maior de pontos representados e possuir regras para a definição de cada um dos conjuntos de vértices e arcos.

Tabela 4.1 – Estrutura de rede proposta x Estrutura de Arnold et al. (2004)

Estrutura	Arnold et al. (2004)	Representação proposta nesta tese
Regiões de oferta	V_o	V_o
Regiões de demanda	V_D	V_D
Modais de transporte	$V_m, m = 1, 2, \dots$	$V_m, m = 1, 2, \dots$
Armazéns	-	V_E
Indústrias	-	W
Ligações a partir das ofertas	A'	A'_o
Ligações até as demandas		A'_D
Ligações dos armazéns	-	A_E
Ligações das indústrias	-	A_W
Ligações em cada modal	$A_m, m = 1, 2, \dots$	$A_m, m = 1, 2, \dots$
Ligações entre os modais	A_I	A_I
Tipo de Fluxo	Monoproducto	Multiproducto a partir das indústrias

Essas duas redes apresentam estruturas esparsas, apesar disso não ter sido evidenciado por Arnold et al. (2004). A rede aqui proposta, no entanto, além de apresentar uma estrutura altamente esparsa e um número maior de pontos considerados, como foi mostrado nesse capítulo, apresenta ainda uma estrutura mais bem definida do que a de Arnold et al. (2004). Por exemplo, Arnold et al. (2004) definem o conjunto A' como contendo as ligações entre os pontos de oferta e demanda e a rede de transporte intermodal. Na rede proposta para representar a cadeia agroindustrial da soja no Brasil, por sua vez, o conjunto A' é particionado em A'_o e A'_D , ambos com regras específicas para definição dos arcos e preenchimento da matriz de adjacências.

Essas regras de preenchimento dos conjuntos de arcos, e, conseqüentemente, da matriz de adjacências, foram baseadas em premissas práticas da cadeia agroindustrial da soja e conferem à rede uma estrutura rígida e bem definida, que garante seu alto grau de esparsidade, independentemente da rede real representada. Assim, a utilização dessa estrutura de redes facilita a formulação de modelos matemáticos, auxiliando na definição de conjuntos de variáveis e restrições, além da organização de parâmetros de entrada. Por exemplo, ao se definir de forma clara um conjunto de vértices que partem da demanda e chegam à rede de transporte rodoviário, A'_o ,

podem-se associar a esses arcos os custos de aquisição da soja nas fazendas e cooperativas. Da mesma forma, é possível associar custos específicos aos arcos de ligação da rede rodoviária com os armazéns ou as fábricas, tanto para a entrada e a saída de produtos. Pode-se diferenciar, por exemplo, impostos incidentes somente sobre a compra ou sobre a venda dos produtos em questão, ou a cobrança de alíquotas específicas sobre a compra ou a venda, como no caso do ICMS, que incide sobre a circulação de mercadorias e serviços.

A estrutura de redes proposta foi especialmente útil para a formulação dos modelos matemáticos para auxílio à gestão de operações de curto prazo, formulados no Capítulo 5, e de planejamento de capacidade das empresas que atuam na cadeia agroindustrial da soja no Brasil, formulados no Capítulo 6. Essa mesma estrutura de redes, e as regras de preenchimento da matriz de adjacências associada, foram utilizadas para sistematizar o algoritmo gerador de exemplares aleatórios, que foi utilizado para construir os problemas testes utilizados nos experimentos computacionais descritos nos Capítulos 7 e 8. Além disso, tanto a estrutura básica quanto a estrutura com armazéns e fábricas já foram testadas em outros trabalhos, como pode ser visto em Amaral et al. (2009), Amaral et al. (2010), Resende et al. (2010), Almeida (2010) e Amaral et al. (2012), todos no contexto do agronegócio da soja, podendo incluir o comércio de produtos derivados do grão, como é o caso de Amaral et al. (2010).

A principal motivação e justificativa para o investimento em uma estrutura de rede rígida e esparsa para a representação do complexo agroindustrial da soja no Brasil está no fato de que estruturas esparsas podem tornar métodos de solução mais eficientes para a resolução de problemas de larga escala (MARTIN, 1999). Quando se tem um alto índice de esparsidade em um problema, pode ser possível formar estruturas bloco angulares, como mostrado na Figura 4.16. A ideia consiste na reorganização de linhas do problema, formando-se grupos com restrições com menor número de variáveis envolvidas, sendo essas variáveis comuns para a maior parte das restrições de cada bloco. Cada um desses blocos é formado por restrições mais curtas, demonstrando uma menor interdependência entre variáveis envolvidas que a observada em problemas muito densos, em que a grande maioria das variáveis aparece em todas as restrições.

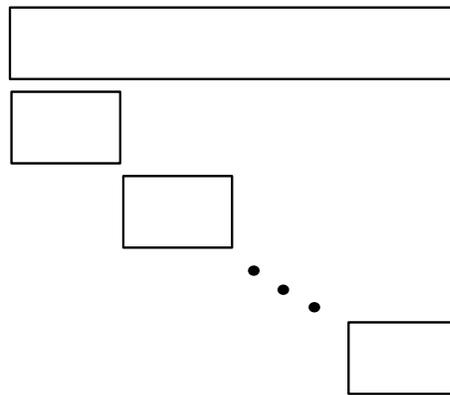


Figura 4.16 – Estrutura bloco angular para um problema esparsos

Como consequência, podem-se obter vantagens na resolução desses problemas, em especial no que se refere à solução problemas de programação linear. Como algoritmos para a solução de problemas com variáveis lineares são utilizados como passos de diversos algoritmos para a resolução de problemas inteiros, tais como o *branch-and-bound* ou os planos de corte, essa vantagem também se estende a esses problemas. De acordo com Martin (1999), um menor esforço computacional é obtido para problemas esparsos durante os cálculos de pivotamento no método simplex, por exemplo, com o uso da fatoração de Cholesky. Um outro método bastante conhecido que se utiliza da possibilidade da formação de estruturas bloco angulares é a decomposição de Dantzig-Wolfe (MATOS, 1994). Esse método procura aproveitar essa estrutura para reduzir a dimensão da base, criando um problema equivalente com grande redução no número de restrições e utiliza um esquema de geração implícita de colunas não básicas no problema equivalente, tornando possível a sua solução. Assim, acredita-se que a estrutura de rede criada seja útil para reduzir os impactos computacionais referentes ao porte dos problemas formulados nos Capítulos 5 e 6, o que é desejável devido à complexidade dos sistemas e problemas representados.

5 GESTÃO DE OPERAÇÕES DE CURTO PRAZO NO COMPLEXO AGROINDUSTRIAL DA SOJA

A gestão de operações de curto prazo no complexo agroindustrial da soja no Brasil envolve a programação diária e semanal de atividades. Essas atividades são parte de um processo decisório que envolve a gestão de tarefas integradas. De um lado, os decisores do processo, qualquer que seja seu nível de atuação no agronegócio da soja, precisam fazer uso dos recursos disponíveis, coordenando um conjunto de atividades a custo mínimo. De outro, esses mesmos recursos disponíveis são limitados e, muitas vezes relacionados a altos custos de utilização, devendo suas capacidades ser aproveitadas com o máximo de critério, de forma a equilibrar o balanço entre a oferta e a demanda ao longo do tempo.

Essas decisões são bastante complexas e envolvem três tipos de rotinas integradas: o planejamento de transporte intermodal, a manutenção e a movimentação de estoques e dimensionamento dos lotes de produção nas fábricas disponíveis. O dimensionamento de lotes nesse contexto, em que se têm processos industriais contínuos, consiste em decidir qual fábrica terá sua capacidade utilizada para atender a cada pedido, de forma a considerar também os custos de transporte dos produtos fabricados até os clientes. Por meio de uma simples análise dos fluxos na Figura 5.1, é possível perceber diversos desdobramentos das atividades que podem ser realizadas e das decisões operacionais a serem tomadas ao longo do complexo agroindustrial da soja.

Acompanhando os fluxos expressos na figura, observa-se que a soja produzida é transportada para os armazéns ou para as fábricas de farelo e óleo. A partir das fábricas, que também podem receber matéria-prima proveniente de armazéns, os derivados da soja devem, necessariamente, passar por uma etapa de transporte antes de chegar ao seu destino final, independente de terem sido estocados ou não. Os armazéns, além de auxiliarem na conciliação de prazos para atendimento das demandas, também são importantes para a integração entre os modais de transporte, ao absorverem estoques temporários de produtos para embarque nos terminais intermodais. Nesse sentido, é importante destacar essa função dos armazéns localizados nos portos, principalmente durante o período de pico de colheita, quando se formam filas de caminhões e trens para descarga, enquanto os navios que chegam são abastecidos e seguem para os principais destinos internacionais da soja brasileira, a Europa e a Ásia.

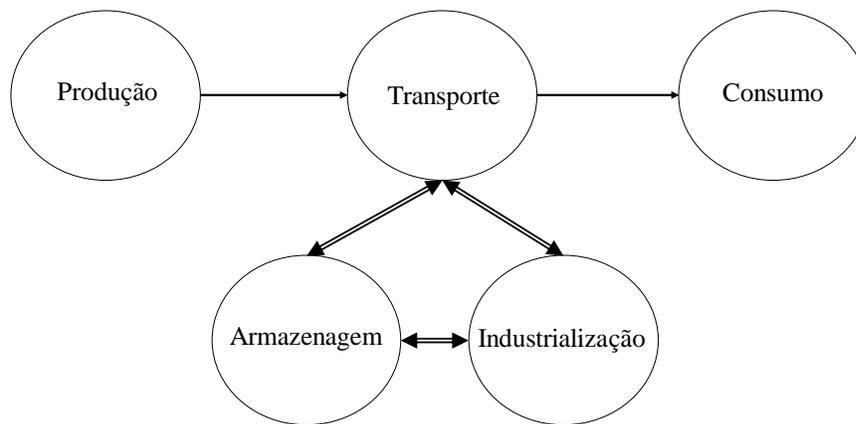


Figura 5.1 – Fluxos da soja e seus derivados no complexo agroindustrial da soja

O uso desse esquema simplificado para a representação do complexo agroindustrial da soja tem por finalidade destacar as principais atividades consideradas na gestão de operações de curto prazo: transporte, armazenagem e industrialização. Assim, cada uma dessas atividades, ou grupos formados entre elas, podem ser destacados na formulação de modelos matemáticos deste capítulo. Como já foi dito no Capítulo 3, as áreas de produção e consumo se encontram, em sua maioria, geograficamente muito dispersas. Há forte sazonalidade na oferta de soja, que tem seu pico durante a colheita anual, concentrada nos meses de março e abril. A demanda, apesar de ser formada, em geral, de pedidos firmes e, portanto, bem conhecida, é razoavelmente constante e difícil de ser conciliada com a oferta concentrada. O principal tipo de recurso utilizado para realizar o balanceamento entre a oferta e a demanda, os armazéns, não estão disponíveis em quantidades suficientes e, muitas vezes, as capacidades disponíveis para o estoque da soja não se encontram nos locais mais adequados à redução dos custos de transporte.

A rede de transporte, composta por rodovias, ferrovias, hidrovias fluviais e marítimas, também apresenta uma série de problemas. O modal rodoviário, mais rápido e mais amplamente disponível ao longo do território brasileiro, apresenta problemas relacionados à falta de pavimentação e conservação das vias, fretes de valores elevados e encarecidos pela existência de muitos postos de pedágio, longos congestionamentos e altos riscos, relacionados principalmente à ocorrência de acidentes e ao roubo de carga. No caso ferroviário, por exemplo, a má conservação e a falta de compatibilidade entre bitolas de trilhos, de integração do território brasileiro, e os altos custos quando comparados ao transporte rodoviário e as baixas velocidades

de transporte, são fatores desestimulantes. As hidrovias, cujo transporte é ainda mais lento, possuem baixa disponibilidade e integração. A integração, de forma generalizada, é uma grande barreira ao uso do transporte intermodal, pois os terminais intermodais existentes, que não estão disponíveis em quantidade suficiente, muitas vezes são de propriedade privada. Além disso, alguns desses terminais possuem baixa capacidade de transbordo, tornando ainda mais lento o transporte realizado por uma rota não exclusivamente rodoviária.

As indústrias de esmagamento e refino, por serem exclusivas das empresas que as administram, apresentam menos problemas de integração com a rede de transporte, apesar de serem altamente dependentes da gestão de estoques de matéria-prima e produtos derivados, que também apresentam capacidades difíceis de gerenciar em algumas épocas do ano. Muitas delas, por serem mais antigas, se localizam em locais distantes das áreas de plantio. Outras, mais novas e construídas em locais mais próximos às plantações, são dotadas apenas de unidades esmagadoras, obrigando o transporte do óleo bruto para refino em outras unidades, quando se necessita atender a demandas de óleo refinado, principalmente no mercado doméstico.

O objetivo deste capítulo é o de formalizar um conjunto de modelos para apoio ao planejamento de curto prazo dessas atividades, que estão relacionadas à gestão do transporte intermodal da soja e seus derivados, das áreas de produção até as áreas de consumo, passando, quando necessário, pelas unidades industriais e os armazéns disponíveis ao longo do complexo agroindustrial da soja no Brasil. A seção 5.1 é dedicada à modelagem de problemas de empresas que atuam apenas na exportação da soja em grão, cujo maior desafio é o planejamento do transporte intermodal. Na seção 5.2 são formalizados os modelos de gestão de operações de curto prazo específicos de empresas que atuam em todo o complexo produtiva da soja, que também necessitam coordenar as decisões de produção e estoque dos derivados da soja, além do planejamento de transporte. Ao final do capítulo, são discutidos alguns aspectos relevantes desses modelos e destacadas algumas contribuições e desdobramentos, referentes tanto aos aspectos teóricos quanto práticos deste capítulo.

5.1 Empresas Exportadoras da Soja em Grão

As empresas que comercializam exclusivamente a soja em grão são especializadas apenas na exportação desse produto e, por isso, possuem uma lógica de transporte bem definida. A partir dos vértices de oferta da soja, devem decidir quais as quantidades de soja que devem ser adquiridas e transportadas para cada um dos destinos a custo mínimo. Os custos considerados incluem o transporte, os transbordos de carga nos terminais intermodais, a armazenagem da soja ao longo da rede e o não atendimento da demanda nos destinos em algum período. As restrições do problema estão relacionadas ao balanço de massa nos vértices da rede e às limitações de capacidades de transporte, transbordo e armazenagem.

A Figura 5.2 reforça que várias empresas e, conseqüentemente, os modelos propostos nessa seção, estão principalmente interessados nas decisões relativas à gestão do transporte intermodal da soja. No primeiro modelo, proposto na subseção 5.1.1, consideram-se que todos os custos são lineares, sendo proporcionais às quantidades de soja transportada, transbordada ou armazenada. No segundo modelo, proposto na subseção 5.1.2, admite-se a possibilidade de obtenção de economias de escala nos modais ferroviário e hidroviário fluvial. Essa possibilidade real, pouco explorada pelas exportadoras de soja no Brasil, pode ser obtida pela formação de trens ou barcaças com mais vagões ou balsas (ANTT, 2012). Dessa forma, a Figura 5.2 representa as atividades de empresas que não operam na industrialização da soja, tornando a gestão de suas atividades de curto prazo mais simples do daquelas que a consideram.

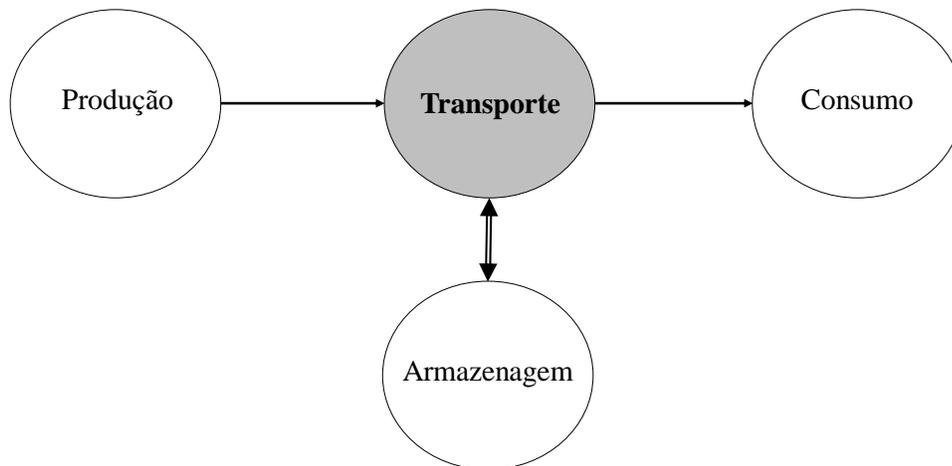


Figura 5.2 – Foco das empresas exportadoras da soja em grão

5.1.1 Planejamento do transporte intermodal da soja em grão (Modelo 1)

O planejamento do transporte intermodal da soja é basicamente um modelo de fluxo de custo mínimo para um único produto com múltiplos períodos, em que se deseja, a partir de um conjunto de vértices de oferta, determinar as quantidades ótimas a serem transportadas a cada um dos vértices de destino. Como nem sempre as quantidades de oferta e demanda estão equilibradas período a período dentro do horizonte de planejamento, são utilizados estoques ao longo da rede para balancear essas diferenças e minimizar os custos de não atendimento da demanda. Todos os custos são considerados lineares e proporcionais às quantidades transportadas, transbordadas, armazenadas e não entregues dentro do prazo.

Para a representação do modelo, são necessários os seguintes dados de entrada:

Conjuntos de Índices:

V_O = Vértices de oferta

V_D = Vértices de demanda

V_m = Vértices de cada um dos modais considerados, $m = \{1, 2, 3, 4\}$

V_E = Vértices que representam os armazéns de soja

V_T = Vértices da rede de transporte, $V_T = \bigcup_{m=1}^4 V_m$

A'_O = Arcos que ligam os vértices de oferta de soja à rede de transporte, formado pelos elementos não nulos da submatriz $V_O \times V_T$

A'_D = Arcos que ligam a rede de transporte aos vértices de demanda, ou seja, elementos não nulos da submatriz $V_T \times V_D$

A'_E = Arcos que ligam os armazéns à rede de transporte, formados pelos elementos não nulos das submatrizes $V_I \times V_E$ e $V_E \times V_I$

A_m = Arcos de cada uma das redes de transporte, formados pelos elementos das submatrizes $V_m \times V_m$, $m = \{1, 2, 3, 4\}$

A_I = Arcos que representam os terminais intermodais, formados pelos elementos das submatrizes $V_1 \times V_2$, $V_1 \times V_3$, $V_1 \times V_4$, $V_2 \times V_1$, $V_2 \times V_3$, $V_2 \times V_4$, $V_3 \times V_1$, $V_3 \times V_2$ e $V_3 \times V_4$

$$A_T = \text{Arcos da rede de transporte, } A_T = \left(\bigcup_{m=1}^4 A_m \right) \cup A_I \cup A'_O \cup A'_D$$

$$T = \text{Períodos de planejamento, } T = \{ 1, 2, \dots, \tau \}$$

Parâmetros:

$$a_i^t = \text{Quantidade de soja em grão ofertada na origem } i, i \in V_O \text{ no período } t \text{ (t)}$$

$$d_j^t = \text{Quantidade de soja em grão demandada pelo destino } j, j \in V_D \text{ no período } t \text{ (t)}$$

$$c_{ij}^t = \text{Custo de transporte ou transbordo no arco } (i, j), (i, j) \in A_T \text{ no período } t \text{ (R\$)}$$

$$h_l^t = \text{Custo de estoque no armazém } l, l \in V_E \text{ no período } t \text{ (R\$)}$$

$$g_j^t = \text{Custo de não atendimento da demanda no destino } j, j \in V_D \text{ no período } t \text{ (R\$)}$$

$$s_l^0 = \text{Estoque inicial de soja no armazém } l, l \in V_E \text{ (t)}$$

$$S_l = \text{Estoque mínimo de segurança no armazém } l, l \in V_E \text{ para atendimento de demandas futuras ao final do período } \tau \text{ (t)}$$

$$\gamma_{ij} = \text{Tempo de transporte no arco } (i, j), (i, j) \in A_T \text{ (dias)}$$

$$\mu_{ij} = \text{Capacidade de transporte no arco } (i, j), (i, j) \in A_T \text{ (t)}$$

$$\theta_l = \text{Capacidade total de estoque de soja no armazém } l, l \in V_E \text{ (t)}$$

São definidas as seguintes variáveis não negativas:

$$x_{ij}^t = \text{Fluxo de transporte no arco } (i, j), (i, j) \in A_T \text{ no período } t \text{ (t)}$$

$$s_l^t = \text{Quantidade estocada no terminal intermodal } l, l \in V_E \text{ ao final do período } t \text{ (t)}$$

$$b_j^t = \text{Quantidade de demanda que não foi atendida no destino } j, j \in V_D \text{ no período } t \text{ (t)}$$

A formulação matemática para o problema de planejamento do transporte da soja em grão é dada pelas equações (5.1) a (5.11), a seguir:

$$\text{Min} \quad \sum_{(i,j) \in A_T} \sum_{t \in T} c_{ij}^t x_{ij}^t + \sum_{l \in V_E} \sum_{t \in T} h_l^t s_l^t + \sum_{j \in V_D} \sum_{t \in T} g_j^t b_j^t \quad (5.1)$$

Sujeito a:

$$\sum_{j \in V(i,j) \in A'_D} x_{ij}^t \leq a_i \quad \forall i \in V_O, \forall t \in T \quad (5.2)$$

$$\sum_{i \in V(i,j) \in A'_D} x_{ij}^{t-\gamma_{ij}} + b_j^t = d_j^t + b_j^{t-1} \quad \forall j \in V_D, \forall t \in T \quad (5.3)$$

$$\sum_{i \in V(i,l) \in A} x_{il}^{t-\gamma_{il}} = \sum_{j \in V(l,j) \in A} x_{lj}^t \quad \forall l \in V_T, \forall t \in T \quad (5.4)$$

$$\sum_{i|(i,j) \in A'_E} x_{il}^t + s_l^{t-1} = s_l^t + \sum_{j|(i,j) \in A'_E} x_{lj}^t \quad \forall l \in V_E, \forall t \in T \quad (5.5)$$

$$x_{ij}^t \leq \mu_{ij} \quad \forall (i,j) \in A_T, \forall t \in T \quad (5.6)$$

$$s_l^t \leq \theta_l \quad \forall l \in V_E, \forall t \in T \quad (5.7)$$

$$s_l^t \geq S_l \quad \forall l \in V_E \quad (5.8)$$

$$x_{ij}^t \geq 0 \quad \forall (i,j) \in A_T, \forall t \in T \quad (5.9)$$

$$s_l^t \geq 0 \quad \forall l \in V_E, \forall t \in T \quad (5.10)$$

$$b_j^t \geq 0 \quad \forall j \in V_D, \forall t \in T \quad (5.11)$$

A função objetivo (5.1) visa à minimização dos custos de transporte e transbordo na rede intermodal, armazenagem nos estoques localizados ao longo da rede física disponível e do não atendimento da demanda pela soja em grão nos vértices de destino, respectivamente. Em relação aos custos de transporte nos arcos da rede, c_{ij}^t , na primeira parcela da função objetivo, é importante comentar que é possível representar nesse único parâmetro, diversas situações reais encontradas na prática da gestão de operações de curto prazo das empresas exportadoras de soja:

- Os custos de transporte rodoviário, ferroviário, hidroviário fluvial e marítimo, respectivamente, quando os arcos (i,j) pertencerem aos conjuntos A_1, A_2, A_3 e A_4 , respectivamente;
- Custos de transbordo, quando os arcos (i,j) pertencerem ao conjunto A_T ;

- Custos de aquisição da soja, a partir das fazendas produtoras ou das cooperativas, quando os arcos (i,j) pertencerem ao subconjunto A'_o .
- Custos de transporte da soja até o vértice de demanda, quando o arco pertencer a A'_D .

O conjunto de restrições (5.2) a (5.5) representam a conservação do fluxo nos vértices da rede. Considerando cada um dos tipos de vértices da rede, têm-se que as restrições (5.2) representam o escoamento da soja em grão a partir dos vértices de oferta em todos os períodos de planejamento. Note que a oferta de soja é diária, não sendo cumulativa. A cada dia podem surgir novas quantidades de soja ofertada, provenientes de fazendas, cooperativas ou armazéns. Admite-se a concorrência de mercado sobre essa oferta e, caso a empresa foco não adquira essa soja, outras empresas podem fazê-lo. Dessa forma, a soja adquirida poderá ser armazenada para transporte futuro, desde que a empresa arque com esses custos de estoque. Porém, a soja que não for adquirida não é acumulada nos vértices de oferta para compra futura, pois nesse caso os custos de estoque não seriam cobrados da empresa foco e sim do próprio produtor.

Em (5.3) têm-se o balanço das demandas de soja atendidas e não atendidas no prazo, também em todos os períodos, como mostrado na Figura 5.3. Por meio da variável b'_j , as demandas não atendidas no prazo são somadas às demandas dos próximos períodos, para que possam ser atendidas em algum período até o final do horizonte de planejamento. As penalizações que essas variáveis, quando positivas, recebem na função objetivo, são referentes às multas por atraso na entrega da soja e são, em geral, estipuladas em contratos de compra e venda internacionais (OJIMA et al., 2008).

Em (5.4), garante-se a conservação do fluxo de entrada e saída em todos os vértices das redes de transporte intermodal, enquanto em (5.5) ocorre o balanço de estoque nos armazéns localizados ao longo da rede, período a período. As restrições (5.6) e (5.7) impõem capacidades de transporte e transbordo na rede intermodal e de estoque nos armazéns da rede. As restrições descritas por (5.8) são relativas à manutenção de um estoque mínimo de segurança no

último período de planejamento, a ser usada para o atendimento de demandas futuras. As restrições representadas pelas equações (5.9), (5.10) e (5.11) definem a não negatividade das variáveis do modelo.

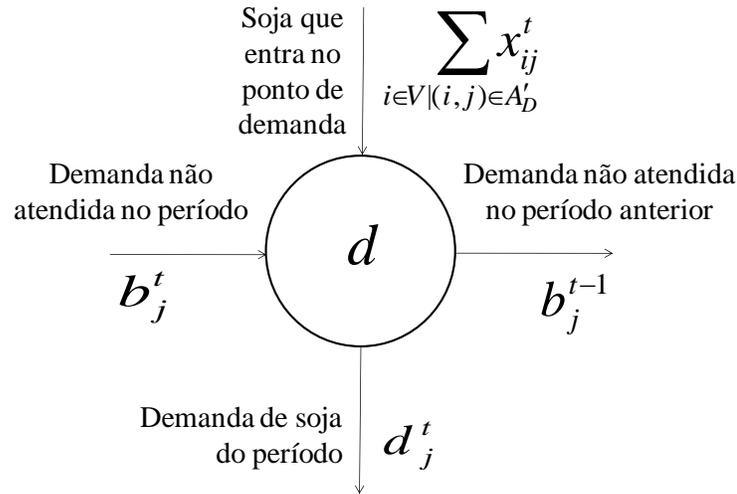


Figura 5.3 – Fluxo de atendimento das demandas dentro e fora do prazo

Como já foi dito, o problema do transporte da soja em grão é um modelo de fluxo de custo mínimo, com consideração de múltiplos modais de transporte e múltiplos períodos de planejamento. Dessa forma, pode-se dizer que este é um modelo linear e de fácil solução. A Tabela 5.1 mostra alguns dados utilizados para exprimir o porte desse problema, tais como número de parâmetros, variáveis e restrições. Para o cálculo do número de restrições do problema foram desconsideradas as restrições de domínio e canalização de variáveis, dadas pelas equações (5.6) a (5.11).

Tabela 5.1 – Porte do problema de planejamento do transporte intermodal da soja em grão

Parâmetros		$\tau(V_O + 2 V_D + V_E + A_T) + 2 A_T + 3 V_E $
Variáveis	Não Negativas	$\tau(V_D + V_E + A_T)$
	Binárias	–
	Totais	$\tau(V_D + V_E + A_T)$
Restrições		$\tau(V_O + V_D + V_T + V_E)$

Embora de simples formulação, esse modelo é capaz de capturar muitas premissas práticas da realidade de empresas que realizam a exportação da soja em grão. Uma questão importante, no que diz respeito às ofertas de soja em grão, é o fato dessa oferta não ser cumulativa. Como a soja, em geral não é plantada pelas mesmas empresas que fazem a sua exportação, essas empresas devem comprar a soja de fazendeiros ou cooperativas. Admite-se, a partir dessa realidade, que a quantidade de soja ofertada a cada período pode ser ou não adquirida pela empresa foco, isto é, a empresa para a qual se está realizando o planejamento de operações de curto prazo. No caso dessa empresa não adquirir essa soja disponível, essa soja é adquirida por empresas concorrentes, por exemplo. Caso seja adquirida pela empresa foco, esta pode ser imediatamente transportada para atendimento de alguma demanda, ou ficar em estoque em algum armazém. Com base nessa premissa e no conhecimento de demandas futuras, ao final do período de planejamento das operações de curto prazo, deve ser feito um estoque de segurança de soja, de forma a cadenciar quantidades ofertadas e demandadas futuramente.

A realização dos transbordos nos arcos dos terminais intermodais também possibilita a representação de vários aspectos práticos da exportação da soja em grão. Um aspecto que não parece óbvio, mas que está bem representado, é o fato de que, quando se tem rotas de transporte exclusivamente ferroviárias ou hidroviárias, por exemplo, estas sempre se iniciam por uma operação de transbordo. Esse transbordo representa a passagem da soja do modal rodoviário, a partir do ponto onde foi coletada, em um vértice de oferta, até um terminal intermodal. Antes de iniciar a etapa de transporte, essa soja precisa ser transbordada para os trens ou as barcaças, antes de seguir para seu destino.

Outro aspecto importante em relação aos transbordos é que os portos também são terminais intermodais, que fazem o transbordo das cargas que chegam de diferentes modais, como rodoviário e ferroviário, para o modal marítimo. Nessa operação, também devem ser incluídos os custos de tarifas alfandegárias de exportação. Ainda sobre os portos, uma outra consideração prática importante é a distinção entre hidrovias fluviais e marítimas. Primeiramente, existem diferenças de custos de transporte entre os trechos desses modais e, além disso, há necessidade de realização do transbordo de carga do primeiro para o segundo modal, quando se trata da exportação da soja. Como o transporte da soja em grão é realizado a granel, isto é, sem o uso de contêineres, há necessidade do desembarque da soja das barcaças, no porto, para em seguida, essa mesma soja ser embarcada nos navios.

Passando à representação das demandas, se esta for doméstica, as etapas de transporte se processam em tempos compatíveis com um horizonte de curto prazo. Porém, quando a demanda for de exportação, as principais rotas marítimas envolvidas possuem durações de aproximadamente 20 a 45 dias. Nesses casos, as datas de entrega devem ser projetadas para trás no tempo, a fim de coincidir com a data em que a carga deve sair do porto. Fazendo-se essa projeção, é possível determinar, dentro de um horizonte de planejamento de curto prazo, não só a data em que o navio deve terminar de ser carregado e estar pronto para deixar o porto, mas também qual é a melhor rota que a soja pode fazer a partir da área em que foi ofertada até o porto que minimize os custos de atendimento daquela demanda e, se possível, dentro do prazo estipulado no respectivo contrato.

Os parâmetros que representam os custos de transporte, estoque e de não atendimento da demanda no prazo foram expressos de forma específica para cada período de planejamento. Embora essa consideração possa não fazer muito sentido prático em uma primeira análise do problema, visto que em curtos períodos, compatíveis com o planejamento de curto prazo, esses custos normalmente são constantes ou muito bem representados pela média, existem particularidades na exportação da soja que justificam essa representação. Uma primeira justificativa é a sazonalidade da oferta de soja ao longo do ano. Essa sazonalidade provoca alterações importantes nos custos de transporte e de estoque, pois a partir do momento em que se inicia a colheita da soja, ocorre uma saturação rápida do uso dos meios de transporte e armazenagem locais. Esses custos podem crescer muito rápido e se estabilizam numa zona alta, mas também podem sofrer quedas rápidas, de acordo com a concorrência de outras culturas, como o milho, o arroz, o feijão ou até o trigo, no sul do país. Mas algumas adaptações podem ser bastante simples, como por exemplo, se houver a obrigação de permanência da soja em estoque por um período mínimo maior que um dia, os custos anteriores a esse período mínimo podem ser alimentados com valores muito altos, de forma que a soja só saia dos estoques após esse prazo.

Os custos de não atendimento da demanda no prazo também podem mudar bruscamente, à medida que os estoques de soja dos compradores da soja brasileira possam ser regulados por soja do tipo *spot*, compradas em leilões, quando ocorre o pico da safra da soja no Hemisfério Norte. De posse desses detalhes, a generalização dos custos envolvidos facilita o uso desse modelo em qualquer época do ano, com qualquer combinação de custos, envolvendo ou não o pico ou o declínio de algum ou de todos esses fatores relacionados ao balanço da oferta e

da demanda no mercado da soja e de seus derivados, principalmente nos mercados internacionais. No mercado doméstico, para regular a demanda, principalmente de farelo, quando os estoques estão muito altos, as empresas são obrigadas a se desfazer desses estoques a preços mais baixos, pois o produto é perecível.

5.1.2 Planejamento do transporte intermodal da soja em grão com economias de escala nos modais ferroviário e hidroviário fluvial (Modelo 2)

Economias de escala podem ser obtidas principalmente no uso dos modais ferroviário e hidroviário fluvial, pela possibilidade de formação de trens e barcaças com diferentes composições, que variam em termos do número de vagões ou balsas utilizados. Dessa forma, em contratos para o transporte de soja, o valor do frete por t.km pode reduzir com o aumento da quantidade a ser transportada em cada trecho. No Brasil, normalmente essa possibilidade não é considerada nos estudos de transporte intermodal de soja, embora seja uma possibilidade real de ganho em relação ao uso do transporte rodoviário da soja (ANTT,2012).

Para modelar essa situação, utilizam-se funções côncavas lineares por partes (ARENALES et al., 2007; CROXTON *et al.*, 2007). Na Figura 5.4 têm-se um exemplo de função de economia de escala com duas faixas de custos. Em cada arco de ferrovia ou hidrovía, $(i, j) \in A_2 \cup A_3$, o custo de transporte por tonelada varia de acordo com a faixa de fluxo da soja a ser transportada. Dessa forma, para cada arco de ferrovia ou hidrovía se tem um conjunto de $R + 1$ pontos, dados por $0 \leq L_{ij}^0 < L_{ij}^1 < \dots < L_{ij}^R$, que restringem o fluxo na faixa r , $r = 1, 2, \dots, R$, entre L_{ij}^{r-1} e L_{ij}^r . Associada à cada faixa de capacidade, tem-se um custo de transporte nessa faixa r , $r = 1, 2, \dots, R$, dado por $c_{ijr}^t, (i, j) \in A_2 \cup A_3, t \in T$, de modo que $c_{ij1}^t > c_{ij2}^t > \dots > c_{ijR}^t > 0$. São então definidas as variáveis binárias $y_{ijr}^t \in \{0,1\}$ para selecionar a faixa r a ser utilizada no arco $(i, j) \in A_2 \cup A_3$, no período $t \in T$, e as variáveis não negativas de fluxo $X_{ijr}^t \geq 0, \forall (i, j) \in A_2 \cup A_3, t \in T, r = 1, 2, \dots, R$, correspondentes à quantidade de soja transportada no mesmo arco (i, j) .

Assim, ao se definir uma faixa \hat{r} a ser cobrada, o custo de transportar a soja em grão pelo arco $(i, j) \in A_2 \cup A_3$, num período t , é dado por $c_{ij\hat{r}}^t X_{ij\hat{r}}^t + \beta_{ij\hat{r}}^t y_{ij\hat{r}}^t$, em que $\beta_{ij\hat{r}}^t$ é o ponto de intersecção com o eixo das ordenadas, assumindo também que $\beta_{ij1}^t \leq \beta_{ij2}^t$. Note que se pode ter para o limitante inferior da faixa 1, $L_{ij}^0 > 0$, situação em que o modal só é ativado a partir de um volume mínimo de fluxo, referente à composição mínima de vagões em um trem ou de balsas em uma barçaça.

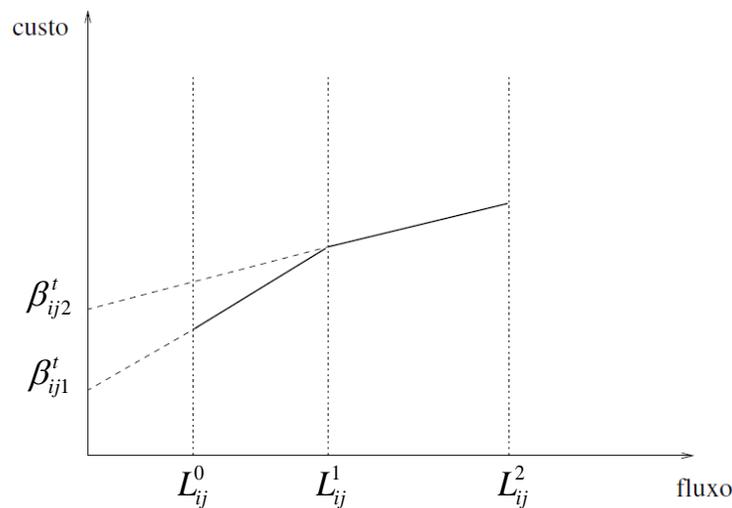


Figura 5.4 – Estrutura dos custos côncavos cobrados nas ferrovias e hidrovias

Assim, há a necessidade de inserção de alguns dados adicionais ao problema, que são detalhadas nas seguintes definições de conjuntos e parâmetros:

Índices:

R = Conjunto de segmentos para as funções côncavas lineares por parte, $r = 1, 2, \dots, R$

Parâmetros:

c_{ij}^t = Custo de transporte ou transbordo no arco $(i, j), (i, j) \in A_T \setminus \{A_2 \cup A_3\}$ no período t

(R\$)

C_{ijr}^t = Custo de transporte nos arcos ferroviários e hidroviários fluviais $(i, j), (i, j) \in A_2 \cup A_3$ para o segmento r de custo no período t (R\$)

L_{ij}^r = Limitante superior, ou inferior quando descrito por L_{ij}^{r-1} , para a quantidade transportada no arco $(i, j), (i, j) \in A_2 \cup A_3$ usando o segmento de custos r (t)

β_{ijr}^t = Ponto de interseção da função de custos do segmento r com o eixo das ordenadas para cada arco $(i, j), (i, j) \in A_2 \cup A_3$ no período t (R\$)

A formulação matemática para o problema de planejamento do transporte da soja em grão com economias de escala nos modais ferroviário e hidroviário fluvial é dado pelas equações (5.12) a (5.16) a seguir, além das equações (5.2) a (5.11), já apresentadas:

$$\text{Min} \quad \sum_{(i,j) \in A_T \setminus \{A_2 \cup A_3\}} \sum_{t \in T} c_{ij}^t x_{ij}^t + \sum_{(i,j) \in A_2 \cup A_3} \sum_{t \in T} \sum_{r=1}^R (C_{ijr}^t X_{ijr}^t + \beta_{ijr}^t y_{ijr}^t) + \sum_{l \in V_E} \sum_{t \in T} h_l^t s_l^t + \sum_{j \in V_D} \sum_{t \in T} g_j^t b_j^t \quad (5.12)$$

Sujeito a:

$$\sum_{j \in V \setminus \{(i,j) \in A_D\}} x_{ij}^t \leq a_i^t \quad \forall i \in V_O, \forall t \in T \quad (5.2)$$

$$\sum_{i \in V \setminus \{(i,j) \in A_D\}} x_{ij}^{t-\gamma_{ij}} + b_j^t = d_j^t + b_j^{t-1} \quad \forall j \in V_D, \forall t \in T \quad (5.3)$$

$$\sum_{i \in V \setminus \{(i,l) \in A\}} x_{il}^{t-\gamma_{il}} = \sum_{j \in V \setminus \{(l,j) \in A\}} x_{lj}^t \quad \forall l \in V_T, \forall t \in T \quad (5.4)$$

$$\sum_{i \in V \setminus \{(i,j) \in A_E\}} x_{il}^t + s_l^{t-1} = s_l^t + \sum_{j \in V \setminus \{(i,j) \in A_E\}} x_{ij}^t \quad \forall l \in V_E, \forall t \in T \quad (5.5)$$

$$L_{ij}^{r-1} y_{ijr}^t \leq X_{ijr}^t \leq L_{ij}^r y_{ijr}^t \quad \forall (i, j) \in A_2 \cup A_3, \forall t \in T, r = 1, 2, \dots, R \quad (5.13)$$

$$\sum_{r=1}^R y_{ijr}^t \leq 1 \quad \forall (i, j) \in A_2 \cup A_3, \forall t \in T \quad (5.14)$$

$$x_{ij}^t = \sum_{r=1}^R X_{ijr}^t \quad \forall (i, j) \in A_2 \cup A_3, \forall t \in T \quad (5.15)$$

$$x_{ij}^t \leq \mu_{ij} \quad \forall (i, j) \in A_T, \forall t \in T \quad (5.6)$$

$$s_l^t \leq \theta_l \quad \forall l \in V_E, \forall t \in T \quad (5.7)$$

$$s_l^r \geq S_l \quad \forall l \in V_E \quad (5.8)$$

$$x_{ij}^t \geq 0 \quad \forall (i, j) \in A_T, \forall t \in T \quad (5.9)$$

$$s_l^t \geq 0 \quad \forall l \in V_E, \forall t \in T \quad (5.10)$$

$$b_j^t \geq 0 \quad \forall j \in V_D, \forall t \in T \quad (5.11)$$

$$y_{ijr}^t \in \{0,1\} \quad \forall (i, j) \in A_2 \cup A_3, \forall t \in T, r = 1,2,\dots,R \quad (5.16)$$

A função objetivo (5.12) visa à minimização dos custos totais. Na primeira parcela, são computados os custos de transporte e transbordo em todos os arcos em todos os períodos, excluindo-se os arcos referentes aos fretes ferroviários e hidroviários fluviais, que são calculados na segunda parcela, como já foi explicado. As demais parcelas da função objetivo se referem aos custos de armazenagem nos estoques localizados ao longo da rede física disponível e do não atendimento da demanda pela soja em grão nos vértices de demanda dentro do prazo, também para todos os períodos de planejamento.

As restrições (5.13) a (5.16) fazem a atribuição da faixa de custos a ser utilizada nos modais em que se admitem economias de escala. Em (5.13) garante-se que o fluxo em um arco pertencente aos modais ferroviário e hidroviário fluvial tem que estar entre os limites inferior e superior das capacidades de transporte na faixa de custo selecionada. Em (5.14), no máximo uma faixa de custo é selecionada para cada um dos arcos desses modais e em (5.15) é feito o acoplamento das variáveis de fluxo com economias de escala, dadas por X_{ijr}^t , e as variáveis de fluxo de toda a rede de transporte, representadas por x_{ij}^t . Em (5.16) define-se o domínio das variáveis binárias y_{ijr}^t . As demais restrições, dadas por (5.2) a (5.11) são as mesmas do modelo de planejamento do transporte intermodal da soja em grão, explicadas na subseção anterior.

O problema de planejamento do transporte da soja em grão com economias de escala também é um modelo de fluxo de custo mínimo, com consideração de múltiplos modais de transporte e múltiplos períodos de planejamento. Porém, esse modelo envolve variáveis binárias para representar economias de escala, descritas por funções côncavas lineares por partes, sendo considerado NP-difícil (CROXTON *et al.*, 2007). A Tabela 5.2 mostra alguns dados utilizados para medir o porte desse modelo de programação inteira mista, como o número de parâmetros, de

variáveis e de restrições. Novamente, para o cálculo do número de restrições, foram desconsideradas as restrições de canalização e de definição de domínio para as variáveis, dadas pelas equações (5.6) a (5.11) e (5.16).

Embora a obtenção de economias de escala possa ser obtida em outros modais de transporte, que não o ferroviário e o hidroviário fluvial, essa possibilidade prática no Brasil é muito restrita. Os fretes rodoviários são, em sua maioria, acordados diretamente com caminhoneiros autônomos, e não com empresas transportadoras. Quando se analisam os agentes que atuam no transporte da soja brasileira para exportação, a assinatura de contratos de transporte ferroviário e hidroviário, quando feitas por operadores de transporte multimodal, têm maiores chances de contemplar essa possibilidade, embora não seja impossível para outros agentes, como empresas exportadoras e até mesmo para produtores individuais ou cooperados.

Tabela 5.2 – Porte do problema de planejamento intermodal da soja em grão com economias de escala nos transportes ferroviário e hidroviário fluvial

Parâmetros		$\tau(V_O + 2 V_D + V_E + A'_O + A'_D + A_1 + A_4 + A_I) + A_T + 3 V_E + R(A_2 + A_3 + 1)$
Variáveis	Não Negativas	$\tau[V_D + V_E + A'_O + A'_D + A_1 + A_4 + A_I + R(A_2 + A_3)]$
	Binárias	$R\tau(A_2 + A_3)$
	Totais	$\tau[V_D + V_E + A'_O + A'_D + A_1 + A_4 + A_I + R(A_2 + A_3)] + R\tau(A_2 + A_3)$
Restrições		$\tau(V_O + V_D + V_T + V_E) + 2\tau(A_2 + A_3)(R + 1)$

5.2 Empresas Atuantes no Complexo da Soja

As empresas que atuam em todo o complexo agroindustrial da soja realizam, além das atividades anteriormente consideradas de transporte e armazenagem, a transformação da soja em seus produtos derivados, o farelo de soja e os óleos bruto e refinado, por meio dos processos industriais de esmagamento da soja em grão e do refino do óleo bruto. A partir da negociação da soja em grão com os fazendeiros e cooperativas e antes de chegar aos locais de demanda, esses dois processos industriais são inseridos de forma dispersa ao longo desse complexo.

Mesmo com a inclusão dessas etapas de transformação da soja em seus derivados, o problema ainda pode ser tratado por meio da modelagem de fluxos em redes. Os custos a serem minimizados continuam sendo os de transporte, os de transbordo nos terminais intermodais, os de estoque nos armazéns localizados ao longo da rede, os custos de não atendimento das demandas nos prazos estabelecidos e, agora também, os custos de transformação industrial da soja em grão e do óleo bruto. As principais restrições incluem o balanço de massa nos vértices da rede e as restrições de capacidade de transporte, estoque e industrialização. É importante observar que, a partir das unidades industriais, passa a haver o fluxo de múltiplos produtos, competindo pelas capacidades de estoque nos armazéns e de transporte, inclusive quando há a possibilidade de obtenção de economias de escala.

As decisões que podem ser apoiadas, agora ampliadas pelos processos de transformação da soja em derivados, se tornam mais complexas e interligadas. Na Figura 5.5, tem-se um esboço de como essas decisões se relacionam, formando um grafo do tipo E-OU (*and-or graph*) (STOFFEL et al., 1995; MORABITO e ARENALES, 1996). Em cada período do horizonte de planejamento, $t = 1, 2, \dots, \tau$, a partir das regiões de oferta de soja em grão, representadas pelo vértice no alto do grafo, tem-se três possibilidades: a industrialização, a armazenagem e o transporte.

A primeira delas, de industrialização dessa soja em grão, está representada por arcos em negrito e representam as duas etapas do processo industrial. O esmagamento está representado por um arco do tipo “E”, que mostra que, uma vez esmagado, o grão gera simultaneamente farelo e óleo bruto. O refino, assim como as demais decisões possíveis, constituem-se de arcos do tipo “OU”, indicando que podem ser realizadas ou não. Note a diferença do refino em relação ao esmagamento, pois não é possível se produzir somente farelo ou somente óleo bruto, mas apenas uma combinação proporcionalmente definida de um e outro, ao passo que é possível refinar o óleo bruto ou não. Em ambas as etapas industriais, que podem ser realizadas em um mesmo local ou em duas instalações localizadas em locais distintos da rede, é necessário inserir um conversor de massa entre as entradas e saídas do processo.

Essa conversão é importante, pois ocorrem perdas de matéria-prima nesses processos e as proporções de produtos gerados são fixas, não havendo possibilidade de decisão sobre o *mix* e as quantidades relativas de produtos fabricados a partir de uma dada quantidade de matéria-prima. Assim, nesses problemas, ao se fazer o dimensionamento dos lotes de produção

ao longo da rede, não há consideração de tempos ou custos de preparação (*setup*) nessas fábricas. Como já foi dito, não é possível trocar os produtos ou as quantidades de cada derivados produzidos, pois as instalações são dedicadas exclusivamente ao esmagamento ou ao refino, gerando quantidades de produtos fixas a partir da quantidade de matéria-prima, de acordo com as tecnologias instaladas.

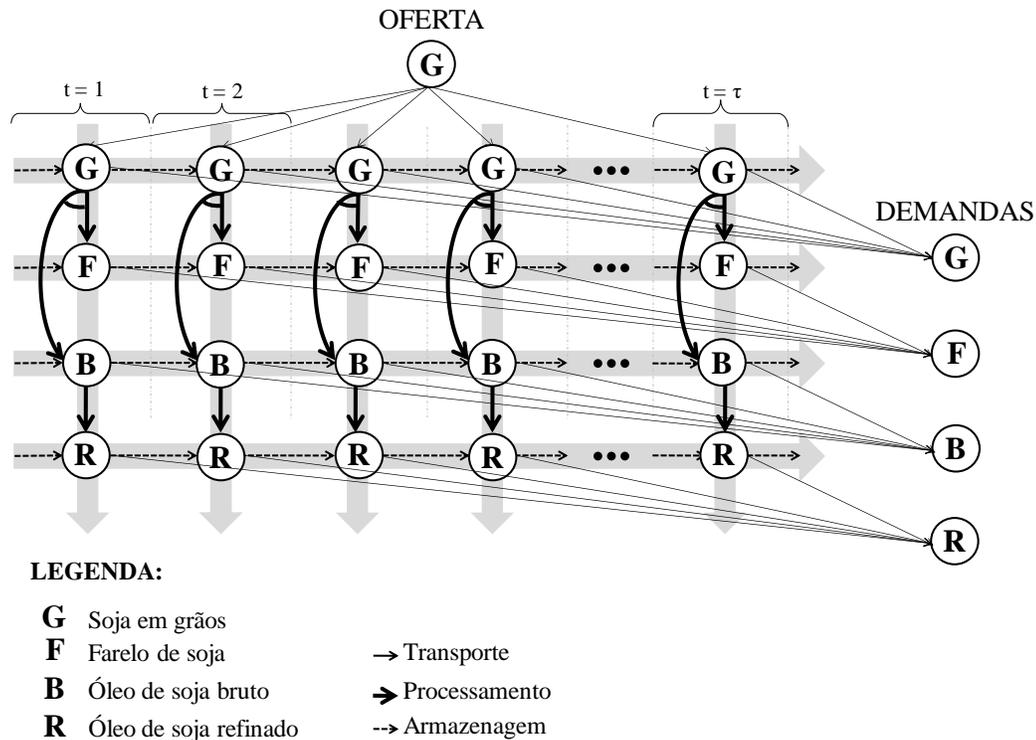


Figura 5.5 – Decisões na gestão de operações de curto prazo do complexo agroindustrial da soja

A segunda possibilidade de decisão, que consiste em armazenar, representada por arcos tracejados, agora se refere tanto à soja em grão quanto aos seus derivados. Nesse caso, os estoques também podem estar localizados nas fábricas, além dos terminais intermodais e ao longo da rede. E, além disso, podem ser de tipos diferentes, para melhor acomodação de cada um dos produtos, de acordo com a sua destinação ao mercado interno ou de exportação.

Percebe-se, pela figura, que tanto as decisões de industrialização quanto as de armazenagem estão destacadas pelo uso de setas largas, sombreadas. Essas atividades, embora já relacionadas entre si, possuem ainda um outro relacionamento muito forte, que é a sua conexão com a etapa de transporte. As etapas de transporte, representadas por arcos mais finos, fazem a

ligação de todas as decisões de planejamento do complexo produtivo com a rede física e as instalações disponíveis. A partir das regiões de oferta até as regiões de demanda, representadas por vértices terminais do grafo, passando pelas unidades industriais e os estoques, os produtos considerados devem ser transportados, seja por rotas monomodais ou intermodais. Apesar desse detalhe ter sido omitido na figura, é importante lembrar que em ambos os casos, os produtos competem entre si pelas capacidades de transporte instaladas na rede intermodal. Ao final do transporte, esses produtos, podem então atender às demandas, que são independentes e podem ocorrer no mercado doméstico ou de exportação.

A Figura 5.6 destaca o foco das empresas atuantes no complexo produtivo da soja e a subdivisão dos modelos formulados nesta seção. No primeiro modelo, proposto na subseção 5.2.1, consideram-se as decisões de industrialização que envolvem o esmagamento e o refino. Nesse caso, o diferencial da modelagem está na consideração dos fluxos dos quatro produtos do complexo por unidades de industrialização classificadas de acordo com os serviços que são oferecidos: esmagamento, refino ou esmagamento e refino. Já na subseção 5.2.2, admite-se a existência de diferentes estruturas de armazenagem, que incluem silos e tanques, além dos armazéns gerais. Essas estruturas podem ser especialmente importantes nas unidades industriais, para diferenciação dos produtos de acordo com sua destinação e uso final, seja no que se refere ao consumo desses produtos por outras indústrias ou por consumidores finais, seja no que se refere ao mercado doméstico ou de exportação.

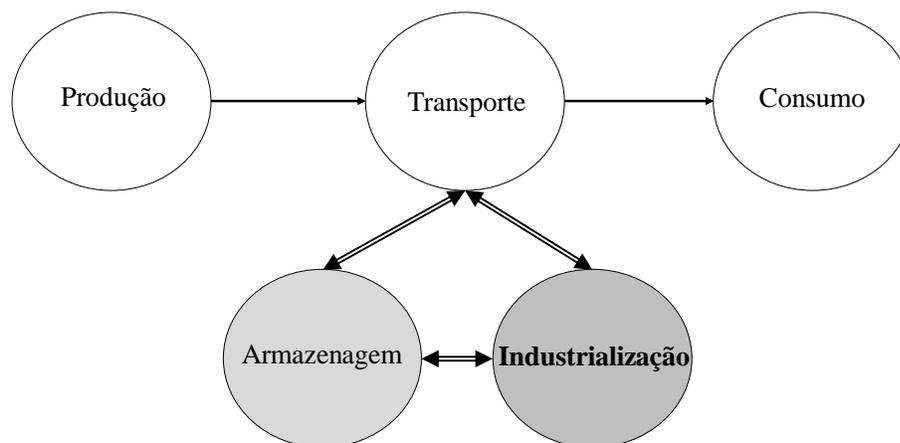


Figura 5.6 – Foco da gestão de operações de curto prazo das empresas atuantes no complexo produtivo da soja

5.2.1 Dimensionamento de lotes de produção e planejamento do transporte intermodal na agroindústria da soja (Modelo 3)

O problema de dimensionamento de lotes de produção e planejamento intermodal na agroindústria da soja é basicamente um modelo de fluxos em redes multiproduto integrado com um modelo de dimensionamento dos lotes de produção nas esmagadoras e refinarias disponíveis. Apesar da semelhança desse problema com os outros modelos de planejamento de operações de curto prazo apresentados anteriormente, a inclusão dos três produtos derivados da soja em grão implica no aparecimento de uma competição pelas capacidades de transporte nos arcos localizados a partir das unidades industriais. Isso obriga à inclusão de um índice para a representação desses produtos considerados e na necessidade de realização de balanços de transformação, dependentes de um fator de conversão de massa para transformação de uma matéria-prima em seus derivados, para todos os tipos de indústrias disponíveis.

São consideradas três possibilidades de unidades industriais, em que o primeiro tipo realiza apenas o esmagamento da soja, gerando farelo e óleo bruto, o segundo é dedicado ao refino do óleo bruto e o terceiro realiza os dois tipos de serviços. Ao se fazer a roteirização do transporte da soja em grão, parte segue para exportação e parte segue para as indústrias esmagadoras. No momento do processamento, ocorre o dimensionamento dos lotes de produção destinados a cada fábrica ao longo do horizonte de planejamento. O tamanho desses lotes de produção depende de dois fatores, que são as capacidades das fábricas e o melhor gerenciamento dos custos de transporte de matéria-prima e produtos derivados. Ao chegar nas unidades industriais, a matéria-prima pode ser diretamente processada ou permanecer em estoque até que seja consumida, não sendo novamente escoada para rede de transporte. Em consequência disso, os estoques da soja em grão, quanto utilizados para atender às demandas, devem sair de estoques localizados nos terminais intermodais ou em outros pontos da rede, pois não se admite redimensionamento dos lotes de produção planejados para cada fábrica. Da mesma forma, considera-se que todo o fluxo de óleo bruto que entra em uma unidade de refino deve ser destinado à produção de óleo refinado e, uma vez que esse lote de matéria-prima foi definido, esse produto não pode ser utilizado para atendimento de demandas domésticas ou de exportação.

Para a apresentação do modelo, formaliza-se, a seguir, a notação utilizada para representação dos conjuntos de índices e dos parâmetros necessários. É importante comentar que

o conjunto de matérias-primas é um subconjunto do conjunto de produtos, formado apenas pelo grão e pelo óleo bruto. Como esses produtos também possuem demandas nos destinos finais, são considerados ora como matéria-prima, ora como produtos acabados no complexo agroindustrial. Em função da inclusão desses dois conjuntos de índices e daqueles referentes às unidades industriais disponíveis, os parâmetros precisam ser novamente apresentados, para a consideração dos múltiplos produtos considerados. Os parâmetros novos, isto é, que não pertenciam aos modelos já apresentados, estão relacionados aos processos de industrialização considerados e representam suas capacidades, custos e fator de conversão de massa.

Conjuntos:

- P = Produtos, $P = \{G, F, B, R\}$
 MP = Matérias-primas, $MP \subset P$
 W_1 = Vértices que representam as unidades esmagadoras de soja
 W_2 = Vértices que representam as unidades refinadoras de óleo bruto
 W_3 = Vértices que representam as unidades que realizam esmagamento e refino
 W = Vértices com unidades industriais, $W = W_1 \cup W_2 \cup W_3$

Parâmetros:

- c_{pij}^t = Custo de transporte ou transbordo do produto p no arco $(i, j), (i, j) \in A_T \setminus \{A_2 \cup A_3\}$ no período t (R\$)
 C_{ijr}^t = Custo de transporte nos arcos ferroviários e hidroviários fluviais $(i, j), (i, j) \in A_2 \cup A_3$ para o segmento r de custo no período t (R\$)
 f_{pw}^t = Custo de processamento da matéria-prima $p, p \in MP$ na fábrica w no período t (R\$)
 d_{pj}^t = Quantidade do produto p demandada pelo destino $j, j \in V_D$ no período t (t)
 δ_{pw} = Tempo de processamento para a matéria-prima p na unidade industrial $w, w \in W$ (dias)

- λ_{pw} = Capacidade de processamento da matéria-prima p na unidade industrial w , $w \in W$ (t)
- α_p = Fator de conversão de massa (t) do produto derivado p produzido a partir de 1 t da sua matéria-prima, $\alpha_p \leq 1, p \neq \mathbf{G}$
- s_{pl}^0 = Estoque inicial do produto p no armazém l , $l \in W \cup V_E$ (t)
- S_{pl} = Estoque mínimo de segurança no armazém l , $l \in W \cup V_E$ do produto p para atendimento de demandas futuras ao final do período τ (t)

As variáveis também sofreram o acréscimo do índice p para representação dos produtos, sendo acrescentada a variável z_{pw}^t , para representar as quantidades de matéria-prima processadas em cada unidade industrial em cada período.

- x_{pij}^t = Fluxo de transporte do produto p no arco $(i, j), (i, j) \in A_T$ no período t (t)
- z_{pw}^t = Quantidade da matéria-prima p processada na unidade industrial w , $w \in W$ no período t (t)
- s_{pl}^t = Quantidade do produto p estocada no armazém l , $l \in W \cup V_E$ ao final do período t (t)
- b_{pj}^t = Quantidade de demanda do produto p que não foi atendida no destino j , $j \in V_D$ no período t (t)
- X_{pijr}^t = Fluxo do produto p no segmento r selecionado para o custo de transporte no arco $(i, j), (i, j) \in A_2 \cup A_3$ no período t (t)
- y_{ijr}^t = $\begin{cases} 1, & \text{se o segmento } r \text{ é selecionado para o arco } (i, j) \in A_2 \cup A_3 \text{ no período } t \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases}$

A formulação matemática para o problema de dimensionamento de lotes de produção e planejamento do transporte intermodal na agroindústria da soja é dado pelas equações (5.17) a (5.39), a seguir:

$$\begin{aligned}
\text{Min} \quad & \sum_{p \in P} \sum_{(i,j) \in A_T \setminus \{A_2 \cup A_3\}} \sum_{t \in T} c_{pij}^t x_{pij}^t + \sum_{(i,j) \in A_2 \cup A_3} \sum_{t \in T} \sum_{r=1}^R (C_{ijr}^t \sum_{p \in P} X_{pijr}^t + \beta_{ijr}^t y_{ijr}^t) + \sum_{p \in P} \sum_{w \in W} \sum_{t \in T} f_{pw}^t z_{pw}^t \\
& + \sum_{p \in P} \sum_{l \in W \cup V_E} \sum_{t \in T} h_{pl}^t s_{pl}^t + \sum_{p \in P} \sum_{j \in V_D} \sum_{t \in T} g_{pj}^t b_{pj}^t
\end{aligned} \tag{5.17}$$

Sujeito a:

$$\sum_{j \in V \setminus \{(i,j) \in A'_0\}} x_{pij}^t \leq a_i^t \quad p = \mathbf{G}, \forall i \in V_0, \forall t \in T \tag{5.18}$$

$$\sum_{i \in V \setminus \{(i,j) \in A'_0\}} x_{pij}^{t-\gamma_{ij}} + b_{pj}^t = d_{pj}^t + b_{pj}^{t-1} \quad \forall p \in P, \forall j \in V_D, \forall t \in T \tag{5.19}$$

$$s_{pw}^{t-1} + \sum_{i \in V \setminus \{(i,w) \in A\}} x_{piw}^{t-\gamma_{iw}} = s_{pw}^t + z_{pw}^t \quad p = \mathbf{G}, \forall w \in W_1 \cup W_3, \forall t \in T \tag{5.20}$$

$$s_{qw}^{t-1} + \alpha_q z_{pw}^{t-\delta_{pw}} = s_{qw}^t + \sum_{j \in V \setminus \{(w,j) \in A\}} x_{qwj}^t \quad p = \mathbf{G}, q = \mathbf{F}, \forall w \in W_1 \cup W_3, \forall t \in T \tag{5.21}$$

$$s_{qw}^{t-1} + \alpha_q z_{pw}^{t-\delta_{pw}} = s_{qw}^t + \sum_{j \in V \setminus \{(w,j) \in A\}} x_{qwj}^t \quad p = \mathbf{G}, q = \mathbf{B}, \forall w \in W_1, \forall t \in T \tag{5.22}$$

$$s_{pw}^{t-1} + \sum_{i \in V \setminus \{(i,w) \in A\}} x_{piw}^{t-\gamma_{iw}} = s_{pw}^t + z_{pw}^t \quad p = \mathbf{B}, \forall w \in W_2, \forall t \in T \tag{5.23}$$

$$s_{qw}^{t-1} + \sum_{i \in V \setminus \{(i,w) \in A\}} x_{qiw}^{t-\gamma_{iw}} + \alpha_q z_{pw}^{t-\delta_{pw}} = s_{qw}^t + \sum_{j \in V \setminus \{(w,j) \in A\}} x_{qwj}^t + z_{qw}^t \quad p = \mathbf{G}, q = \mathbf{B}, \forall w \in W_3, \forall t \in T \tag{5.24}$$

$$s_{qw}^{t-1} + \alpha_q z_{pw}^{t-\delta_{pw}} = s_{qw}^t + \sum_{j \in V \setminus \{(w,j) \in A\}} x_{qwj}^t \quad p = \mathbf{B}, q = \mathbf{R}, \forall w \in W_2 \cup W_3, \forall t \in T \tag{5.25}$$

$$\sum_{i \in V \setminus \{(i,l) \in A\}} x_{pil}^{t-\gamma_{il}} = \sum_{j \in V \setminus \{(l,j) \in A\}} x_{plj}^t \quad \forall p \in P, \forall l \in V_T, \forall t \in T \tag{5.26}$$

$$\sum_{i \in V \setminus \{(i,l) \in A'\}} x_{pil}^{t-\gamma_{il}} + s_{pl}^{t-1} = s_{pl}^t + \sum_{j \in V \setminus \{(l,j) \in A'\}} x_{plj}^t \quad \forall p \in P, \forall l \in V_E, \forall t \in T \tag{5.27}$$

$$\sum_{p \in P} x_{pij}^t \leq \mu_{ij} \quad \forall (i,j) \in A_T, \forall t \in T \tag{5.28}$$

$$z_{pw}^t \leq \lambda_{pw} \quad \forall p \in MP, \forall w \in W, \forall t \in T \tag{5.29}$$

$$\sum_{p \in P} s_{pl}^t \leq \theta_l \quad \forall l \in V_E, \forall t \in T \tag{5.30}$$

$$s_{pl}^t \geq S_{pl} \quad \forall p \in P, \forall l \in V_E \tag{5.31}$$

$$L_{ij}^{r-1} y_{ijr}^t \leq \sum_{p \in P} X_{pijr}^t \leq L_{ij}^r y_{ijr}^t \quad \forall (i,j) \in A_2 \cup A_3, \forall t \in T, r = 1, 2, \dots, R \tag{5.32}$$

$$\sum_{r=1}^R y_{ijr}^t \leq 1 \quad \forall (i, j) \in A_2 \cup A_3, \forall t \in T \quad (5.33)$$

$$x_{pij}^t = \sum_{r=1}^R X_{pijr}^t \quad \forall p \in P, \forall (i, j) \in A_2 \cup A_3, \forall t \in T \quad (5.34)$$

$$x_{pij}^t \geq 0 \quad \forall p \in P, \forall (i, j) \in A, \forall t \in T \quad (5.35)$$

$$z_{pw}^t \geq 0 \quad \forall p \in MP, \forall w \in W, \forall t \in T \quad (5.36)$$

$$s_{pl}^t \geq 0 \quad \forall p \in P, \forall l \in V_E, \forall t \in T \quad (5.37)$$

$$b_{pj}^t \geq 0 \quad \forall p \in P, \forall j \in V_D, \forall t \in T \quad (5.38)$$

$$y_{ijr}^t \in \{0,1\} \quad \forall (i, j) \in A_2 \cup A_3, \forall t \in T, r = 1,2,\dots,R \quad (5.39)$$

A função objetivo (5.17) visa à minimização dos custos totais para todos os produtos em todos os períodos. Na primeira e segunda parcelas, têm-se os custos de transporte e transbordo, com a consideração da possibilidade de obtenção de economias de escala para os transportes ferroviário e hidroviário fluvial. Nesse caso, é importante comentar que a existência de mais de um produto na composição de um trem ou barcaça implica na competição entre eles por capacidade, em termos da ocupação dos vagões ou balsas. A terceira parcela se refere à consideração dos custos de processamento de matéria-prima, ou seja, representa os custos referentes ao dimensionamento dos lotes de produção de farelo, óleo bruto e refinado executados durante o horizonte de planejamento em questão, cobrados em termos das quantidades de matéria-prima que foi utilizada em cada unidade industrial. Seguindo a ordem apresentada, têm-se os custos de estoque e de não atendimento das demandas nos prazos, computados para todos os produtos e todos os períodos ao longo do horizonte de planejamento.

As restrições seguintes dizem respeito ao balanço de massa nos vértices da rede, que agora apresenta fluxo multiproduto a partir das unidades industriais, mas monoproduto nos vértices de oferta até chegar às fábricas. As restrições (5.18) representam o escoamento da soja em grão ofertada em cada período e em (5.19), têm-se o balanço das demandas atendidas e não atendidas para todos os produtos em todos os períodos, como nos outros já modelos apresentados. As restrições (5.20) a (5.25) fazem o balanço de entrada, transformação, armazenagem e saída dos produtos nas unidades industriais. Como as unidades industriais foram divididas em três tipos, de acordo com os serviços de transformação oferecidos, esmagamento, refino ou

esmagamento e refino, é possível organizar os fluxos de matéria-prima e produtos derivados nessas unidades, de acordo com a Tabela 5.3.

Nas restrições descritas pela equação (5.20) são formuladas as restrições que representam o balanço de estoques da soja em grão, que atua como matéria-prima nas unidades do tipo W_1 e W_3 , como mostra a Figura 5.7. Toda a soja que entra na unidade industrial, vinda de todas as rotas de transporte possíveis, depois de decorridos os tempos necessários para transpor esses arcos, acrescidos da soja já estocada na unidade, devem ser iguais aos lotes de soja enviados para a produção no período de planejamento em questão, mais a quantidade de soja restante em estoque ao final desse mesmo período. Em (5.21), ocorre o balanço de farelo de soja em unidades industriais dos mesmos tipos, como mostrado na Figura 5.8. Nesse caso, o farelo é um produto derivado, cuja equação de balanço em cada período é dada da seguinte forma: do lado esquerdo, a soma do estoque do período anterior com a quantidade produzida no período corrente, representada pela conversão de massa da respectiva matéria-prima processada; do lado direito, o estoque de farelo na unidade ao final do período em questão acrescido da soma de todo o farelo que deixou a fábrica em direção às zonas de demanda ou a outros armazéns, fluindo pela rede de transporte disponível.

Tabela 5.3 – Fluxos de matérias-primas e produtos derivados nas unidades industriais

Tipo de Produto	Esmagadoras (W_1)	Refinarias (W_2)	Esmagadora e Refinaria (W_3)
Matéria-Prima	G	B	G, B
Produto Derivado	F, B	R	F, B, R

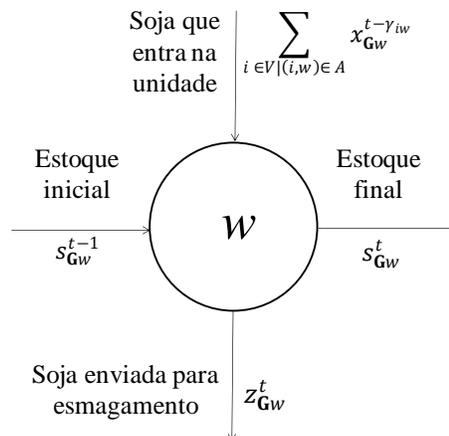


Figura 5.7 – Fluxo de soja em grão nas indústrias de esmagamento ou esmagamento e refino

Em (5.22), (5.23) e (5.24), tem-se o balanço de óleo bruto nas esmagadoras (W_1), nas refinarias (W_2), e nas unidades que realizam esmagamento e refino (W_3), respectivamente. As diferenças entre os três casos são mostradas nas Figuras 5.9, 5.10 e 5.11. Na Figura 5.9, que representa o fluxo do óleo bruto nas esmagadoras e as restrições descritas em (5.22), o óleo bruto é obtido a partir do esmagamento da soja em grão e deve ser considerado como produto derivado. A partir da sua fabricação, o óleo bruto pode fluir para a rede de transportes ou ser armazenado. Os fluxos do óleo bruto, nesse caso específico, seguem a mesma lógica do farelo de soja, pois ambos são obtidos pelo mesmo processo, a partir de um mesmo lote de matéria-prima utilizada.

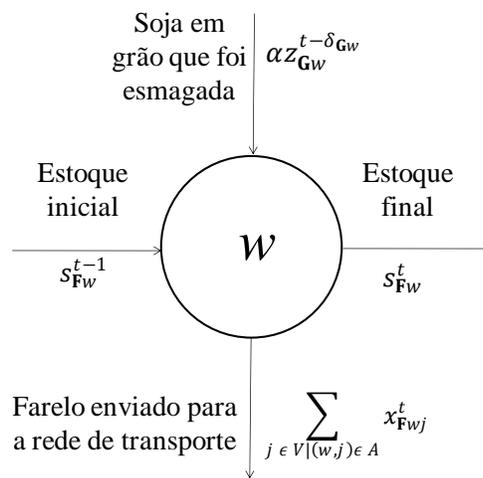


Figura 5.8 – Fluxo de farelo de soja nas unidades de esmagamento ou esmagamento e refino

Na Figura 5.10, referente aos fluxos do óleo bruto nas refinarias e à equação (5.23), o óleo bruto é tratado como matéria-prima para o óleo refinado. Assim que chega à unidade industrial, o óleo bruto pode ser armazenado ou refinado, fechando o balanço com o estoque do período anterior. Verifica-se, para esse caso, que o óleo bruto apresenta a mesma lógica de fluxo que a soja em grão em (5.20), pois ambos são matéria-prima para o processo industrial tratado. Na Figura 5.11, correspondente à equação (5.24), o óleo bruto é considerado tanto como matéria-prima quanto como produto derivado. Assim, o óleo bruto pode ser gerado localmente ou vir de outra unidade, decidindo-se também entre o comércio direto ou pelo refino. Em (5.25), apresenta-se o balanço de óleo refinado nas refinarias e nas unidades que realizam esmagamento e refino, com fluxos semelhantes ao do farelo de soja, já mostrado na Figura 5.8. Podendo vir do estoque de períodos anteriores ou da etapa industrial, o óleo refinado pode

permanecer em estoque ou fluir para a rede de transporte, sendo enviado para outros armazéns ou para atendimento de demandas.

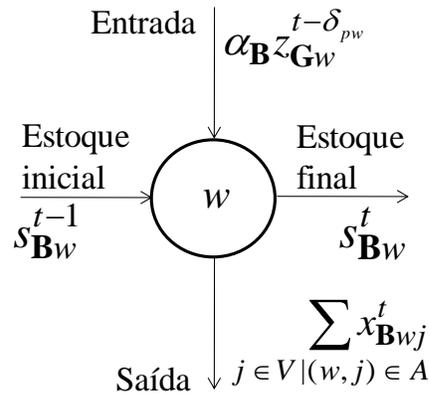


Figura 5.9 – Fluxo do óleo bruto nas esmagadoras ($w \in W_1$)

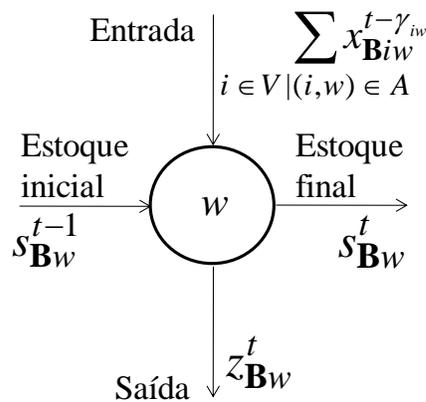


Figura 5.10 – Fluxo do óleo bruto nas refinarias ($w \in W_2$)

As demais restrições são semelhantes às dos modelos já formulados, mas consideram o fluxo de múltiplos produtos. Em (5.26) a conservação de massa é garantida para os vértices das redes de transporte, enquanto em (5.27) ocorre o balanço de estoque nos terminais intermodais. As restrições (5.28) a (5.30) impõem capacidades de transporte e transbordo na rede intermodal, de processamento de matéria-prima nas industriais e de estoques nos armazéns, respectivamente. Em (5.30) é importante comentar que as capacidades dos armazéns devem ser

repartidas ente todos os produtos estocados e que pode haver, para cada produto, um estoque mínimo de segurança a ser mantido ao final do horizonte de planejamento, como mostrado em (5.31). As restrições (5.32) e (5.33) fazem a atribuição da faixa de custos a ser utilizada para os modais ferroviário e hidroviário pelo transporte de todos os produtos em todos os arcos em todos os períodos e garantem que apenas uma faixa de custos seja cobrada na função objetivo. As variáveis de fluxos x_{pij}^t e X_{pij}^t são acopladas em (5.34). As domínios das variáveis são definidos nas equações (5.35) a (5.39).

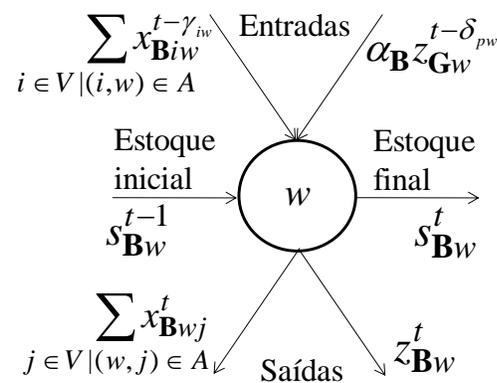


Figura 5.11 – Fluxo do óleo bruto nas unidades de esmagamento e refino ($w \in W_3$)

O modelo formulado para o problema de dimensionamento de lotes de produção e planejamento do transporte intermodal da soja em grão pode ser visto como um problema de fluxos multiproduto, com consideração de múltiplos modais de transporte e múltiplos períodos de planejamento. Dessa forma, esse modelo de programação inteira mista é NP-difícil (AHUJA et al., 1993). Há ainda um aspecto compatível com o modelo de fluxo generalizado, pela presença do fator de conversão α_p , que além da transformação das matérias-primas em produtos derivados, representa perdas de massa inerentes aos processos industriais tratados (AHUJA et al., 1993). A Tabela 5.4 mostra alguns dados utilizados para exprimir o porte desse problema, tais como número de parâmetros, variáveis e restrições. Para o cálculo do número de restrições do problema foram desconsideradas as restrições de definição de domínio e de canalização de variáveis, dadas pelas equações (5.28) a (5.31) e (5.35) a (5.39). As principais modificações realizadas consistiram na inserção de novos produtos à rede de transporte, gerados a partir dos

arcos de saída dos vértices pertencentes ao conjunto W , além da definição das variáveis de dimensionamento dos lotes de produção nesses mesmos vértices para as matérias-primas pertinentes em todos os períodos, pelas variáveis não negativas z_{pw}^t .

Tabela 5.4 – Porte do problema de dimensionamento de lotes de produção e planejamento do transporte intermodal na agroindústria da soja

Parâmetros		$4\tau(2 V_D + V_E + W + A'_O + A'_D + A_1 + A_4 + A_T) + A_T + \tau V_O + 9 V_E + 13 W + R(A_2 + A_3)(2\tau + 1)$
Variáveis	Não Negativas	$4\tau[V_D + V_E + 2 W + A_T + R(A_2 + A_3)]$
	Binárias	$R\tau(A_2 + A_3)$
	Totais	$4\tau[V_D + V_E + 2 W + A_T + R(A_2 + A_3)] + R\tau(A_2 + A_3)$
Restrições		$\tau[V_O + 4 V_D + 4 V_T + 4 V_E + 3 W_1 + 2 W_2 + 4 W_3 + (A_2 + A_3)(R + 5)]$

O modelo de dimensionamento de lotes de produção e planejamento do transporte intermodal na agroindústria da soja é capaz de capturar muitas das características do complexo agroindustrial da soja no Brasil, tais como a existência de fábricas equipadas com instalações esmagadoras, de refino ou dos dois tipos. Não se tem conhecimento de outros modelos na literatura que tratem essa característica. Por exemplo, o modelo de Dubke (2006), já apresentado no Capítulo 2, trata da localização de indústrias e serviços em terminais especializados para exportação, mas não da localização dessas fábricas ao longo do território brasileiro. Outra diferença importante está no fato de que o modelo aqui proposto representa o atendimento de demandas domésticas pelos produtos do complexo da soja, não se restringindo à exportação dos mesmos. Em relação às mudanças nas demandas internas ocorridas nos últimos anos, destaca-se a crescente utilização do óleo refinado na fabricação de biodiesel, que pode ser contemplada nos parâmetros de demanda interna por esse produto.

Uma característica do transporte ferroviário e hidroviário dos produtos do complexo da soja que foi desconsiderada é a restrição de competição dos produtos pelas capacidades dos vagões e balsas. Na prática, tanto os vagões quanto as barcaças recebem apenas um produto por vez, não sendo permitido misturá-los. Dessa forma, a cobrança de fretes de um trem ou barcaça carregada por múltiplos produtos deveria ser feita pelo número de vagões ou balsas ocupadas com cada produto. Porém, a aproximação proposta não gera grandes diferenças

de cálculo e a estrutura de cobrança dos custos é muito semelhante para grupos de produtos, uma vez que a soja e o farelo possuem custos semelhantes entre si, mas diferentes dos custos de transporte dos óleos, devido às diferenças de estado físico, densidade e valor agregado entre eles (ABIOVE, 2012).

5.2.2 Gestão de operações de curto prazo no complexo agroindustrial da soja com alocação de estoques (Modelo 4)

O problema de gestão de operações de curto prazo no complexo agroindustrial da soja com alocação de estoques é basicamente o problema de dimensionamento de lotes de produção e planejamento do transporte intermodal na agroindústria da soja integrado com um problema de alocação de estoques em silos, tanques e armazéns. A ideia de propor essa extensão é a de que tanto a soja em grão e o farelo quanto os óleos bruto e refinado, possuem características físicas e valor agregado distintos. Assim, esses produtos, além de poderem ser divididos em matérias-primas e produtos derivados, podem ainda ser subdivididos em granéis sólidos e líquidos. Essa subdivisão leva a interessantes diferenças no manuseio desses produtos durante as etapas de transporte e armazenagem. Durante o transporte, em termos da modelagem dos problemas, as diferenças existentes entre granéis sólidos e líquidos não demandam alterações nos modelos apresentados. Os mesmos tipos de caminhões, trens e barcas utilizados no transporte da soja em grão e do farelo podem ser usados para transportar os óleos bruto e refinado, requerendo apenas o uso de tonéis para acondicionamento da carga líquida. No entanto, caminhões tanque e navios especiais também podem ser utilizados no transporte dos granéis líquidos, e em ambos os casos, essas diferenças podem ser expressas apenas em termos de valores de frete diferenciados, dependendo do veículo ou das embalagens que forem necessárias.

Já na etapa de armazenagem desses produtos, surgem diferenças que demandam reformulação dos modelos matemáticos já apresentados, uma vez que existem diferentes tipos de estruturas físicas para acondicionamento dos granéis sólidos e líquidos ao longo do complexo agroindustrial. Os granéis sólidos podem ser armazenados nos silos ou em armazéns gerais, enquanto os granéis líquidos podem ser alocados a tanques ou a armazéns gerais. Os armazéns gerais podem estocar qualquer produto, inclusive ao mesmo tempo, desde que a soja em grão e o

farelo de soja estejam ensacados e os óleos bruto e refinado sejam acondicionados em tonéis. Os silos e os tanques podem estocar apenas um produto por vez, sem necessidade de embalagens, resultando em custos mais baixos de manutenção de estoques. Uma vez que um produto seja alocado a uma estrutura, pode-se manter qualquer quantidade em estoque até quando se desejar mudar de produto. Então, basta esvaziar o silo ou o tanque, realizar uma operação simples de limpeza e colocar o outro produto em seguida, pelo período que se desejar manter a nova configuração de estoque.

Assim, o modelo de gestão de operações de curto prazo no complexo agroindustrial da soja com alocação de estoques possui, além das características de fluxo multiproduto em uma rede intermodal e dimensionamento de lotes de produção, um problema de designação de diferentes tipos de produtos às estruturas físicas disponíveis para estoque. As modificações necessárias à reformulação do problema são mostradas a seguir e consistem na criação de conjuntos de produtos a serem alocados aos estoques, isto é, de granéis sólidos e líquidos, além da criação de conjuntos de silos, tanques e armazéns gerais localizados em cada uma das unidades industriais e de armazenagem disponíveis. É importante comentar que, devido às premissas adotadas para a classificação das unidades industriais, as unidades que realizam apenas o refino do óleo bruto, denotadas por W_2 , não possuem silos em sua estrutura utilizada para estoques, uma vez que tanto a matéria-prima quanto o produto derivado produzido são granéis líquidos.

As modificações nos dados necessárias à inclusão da alocação dos granéis sólidos e líquidos aos diferentes tipos de unidades de estoque são mostrados a seguir:

Conjuntos:

P_1 = Granéis sólidos, $P_1 = \{\mathbf{G}, \mathbf{F}\}$

P_2 = Granéis líquidos, $P_2 = \{\mathbf{B}, \mathbf{R}\}$

K_{1w} = Conjunto de silos pertencentes a cada unidade industrial ou terminal intermodal w ,
 $w \in W_1 \cup W_3 \cup V_E$

K_{2w} = Conjunto de tanques pertencentes a cada unidade industrial ou terminal intermodal w ,
 $w \in W \cup V_E$

K_{3w} = Conjunto de armazéns gerais pertencentes a cada unidade industrial ou terminal intermodal w , $w \in W \cup V_E$

Parâmetros:

$h'_{(1)pwk}$ = Custo de armazenar o produto p no k -ésimo silo localizado na unidade industrial ou na unidade de armazenagem w , $w \in W_1 \cup W_3 \cup V_E$ no período t (R\$)

$h'_{(2)pwk}$ = Custo de armazenar o produto p no k -ésimo tanque localizado na unidade industrial ou na unidade de armazenagem w , $w \in W \cup V_E$ no período t (R\$)

$h'_{(3)pwk}$ = Custo de armazenar o produto p no k -ésimo armazém geral localizado na unidade industrial ou na unidade de armazenagem w , $w \in W \cup V_E$ no período t (R\$)

θ_{wk} = Capacidade do k -ésimo silo localizado na unidade industrial ou na unidade de armazenagem w , $w \in W_1 \cup W_3 \cup V_E$ (t)

ρ_{wk} = Capacidade do k -ésimo tanque localizado na unidade industrial ou na unidade de armazenagem w , $w \in W \cup V_E$ (t)

σ_{wk} = Capacidade do k -ésimo armazém geral localizado na unidade industrial ou na unidade de armazenagem w , $w \in W \cup V_E$ (t)

Em relação às variáveis do problema, é necessário incluir, tanto para os silos quanto para os tanques, dois novos conjuntos de variáveis. Um conjunto de variáveis binárias é usado para a atribuição de um produto à estrutura física considerada e, caso essa estrutura seja utilizada, um outro conjunto de variáveis é usado para indicar a quantidade em estoque, pois a estrutura pode não estar com sua capacidade totalmente utilizada. No caso dos armazéns gerais, como todos os produtos podem ser estocados simultaneamente, é preciso usar um conjunto de variáveis apenas para a indicação da quantidade de cada produto que está em estoque em cada período ao longo do horizonte de planejamento.

$n'_{pwk} = \begin{cases} 1, & \text{se o produto } p \text{ é alocado ao } k\text{-ésimo silo localizado em } w \text{ no período } t \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases}$

- u_{pwk}^t = Quantidade do produto p em estoque no k -ésimo silo localizado em w no período t
 (t)
- o_{pwk}^t = $\begin{cases} 1, & \text{se o produto } p \text{ é alocado ao } k - \text{ésimo tanque localizado em } w \text{ no período } t \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases}$
- v_{pwk}^t = Quantidade do produto p em estoque no k -ésimo tanque localizado em w no período t (t)
- e_{pwk}^t = Quantidade do produto p em estoque no k -ésimo armazém geral localizado em w no período t (t)

A formulação matemática para o problema de gestão de operações de curto prazo no complexo agroindustrial da soja com alocação de estoques é dado pelas equações (5.40), (5.41) a (5.49) e (5.50) a (5.54), além das equações (5.19) a (3.39), a seguir:

$$\begin{aligned}
 \text{Min} \quad & \sum_{p \in P} \sum_{(i,j) \in A_7 \setminus \{A_2 \cup A_3\}} \sum_{t \in T} c_{pij}^t x_{pij}^t + \sum_{(i,j) \in A_2 \cup A_3} \sum_{t \in T} \sum_{r=1}^R (C_{ijr}^t \sum_{p \in P} X_{pijr}^t + \beta_{ijr}^t y_{ijr}^t) + \sum_{p \in P} \sum_{w \in W} \sum_{t \in T} f_{pw}^t z_{pw}^t \\
 & \sum_{p \in P} \sum_{w \in W_1 \cup W_3 \cup V_E} \sum_{k \in K_1} \sum_{t \in T} h_{(1)pw}^t u_{pwk}^t + \sum_{p \in P} \sum_{w \in W \cup V_E} \sum_{k \in K_2} \sum_{t \in T} h_{(2)pw}^t v_{pwk}^t + \sum_{p \in P} \sum_{w \in W \cup V_E} \sum_{k \in K_3} \sum_{t \in T} h_{(3)pw}^t e_{pwk}^t \\
 & + \sum_{p \in P} \sum_{j \in V_D} \sum_{t \in T} g_{pj}^t b_{pj}^t \tag{5.40}
 \end{aligned}$$

Sujeito a:

$$\sum_{j \in V \setminus (i,j) \in A'_D} x_{pij}^t \leq a_i^t \quad p = \mathbf{G}, \forall i \in V_O, \forall t \in T \tag{5.18}$$

$$\sum_{i \in V \setminus (i,j) \in A'_D} x_{pij}^{t-\gamma_{ij}} + b_{pi}^t = d_{pi}^t + b_{pi}^{t-1} \quad \forall p \in P, \forall j \in V_D, \forall t \in T \tag{5.19}$$

$$s_{pw}^{t-1} + \sum_{i \in V \setminus (i,w) \in A} x_{piw}^{t-\gamma_{iw}} = s_{pw}^t + z_{pw}^t \quad p = \mathbf{G}, \forall w \in W_1 \cup W_3, \forall t \in T \tag{5.20}$$

$$s_{qw}^{t-1} + \alpha_q z_{pw}^{t-\delta_{pw}} = s_{qw}^t + \sum_{j \in V \setminus (w,j) \in A} x_{qwj}^t \quad p = \mathbf{G}, q = \mathbf{F}, \forall w \in W_1 \cup W_3, \forall t \in T \tag{5.21}$$

$$s_{qw}^{t-1} + \alpha_q z_{pw}^{t-\delta_{pw}} = s_{qw}^t + \sum_{j \in V \setminus (w,j) \in A} x_{qwj}^t \quad p = \mathbf{G}, q = \mathbf{B}, \forall w \in W_1, \forall t \in T \tag{5.22}$$

$$s_{pw}^{t-1} + \sum_{i \in V|(i,w) \in A} x_{piw}^{t-\gamma_{iw}} = s_{pw}^t + z_{pw}^t \quad p = \mathbf{B}, \forall w \in W_2, \forall t \in T \quad (5.23)$$

$$s_{qw}^{t-1} + \sum_{i \in V|(i,w) \in A} x_{qiw}^{t-\gamma_{iw}} + \alpha_q z_{pw}^{t-\delta_{pw}} = s_{qw}^t + \sum_{j \in V|(w,j) \in A} x_{qwj}^t + z_{qw}^t \quad p = \mathbf{G}, q = \mathbf{B}, \forall w \in W_3, \forall t \in T \quad (5.24)$$

$$s_{qw}^{t-1} + \alpha_q z_{pw}^{t-\delta_{pw}} = s_{qw}^t + \sum_{j \in V|(w,j) \in A} x_{qwj}^t \quad p = \mathbf{B}, q = \mathbf{R}, \forall w \in W_2 \cup W_3, \forall t \in T \quad (5.25)$$

$$\sum_{i \in V|(i,l) \in A} x_{pil}^{t-\gamma_{il}} = \sum_{j \in V|(l,j) \in A} x_{plj}^t \quad \forall p \in P, \forall l \in V_T, \forall t \in T \quad (5.26)$$

$$\sum_{i \in V|(i,l) \in A'} x_{pil}^{t-\gamma_{il}} + s_{pl}^{t-1} = s_{pl}^t + \sum_{j \in V|(l,j) \in A'} x_{plj}^t \quad \forall p \in P, \forall l \in V_E, \forall t \in T \quad (5.27)$$

$$\sum_{p \in P} x_{pij}^t \leq \mu_{ij} \quad \forall (i,j) \in A_T, \forall t \in T \quad (5.28)$$

$$z_{pw}^t \leq \lambda_{pw} \quad \forall p \in MP, \forall w \in W, \forall t \in T \quad (5.29)$$

$$\sum_{p \in P} s_{pl}^t \leq \theta_l \quad \forall l \in V_E, \forall t \in T \quad (5.30)$$

$$s_{pl}^t \geq S_{pl} \quad \forall p \in P, \forall l \in V_E \quad (5.31)$$

$$\sum_{p \in P_1} n_{pwk}^t \leq 1 \quad \forall w \in W_1 \cup W_3 \cup V_E, \forall k \in K_{1w}, \forall t \in T \quad (5.41)$$

$$u_{pwk}^t \leq \rho_{wk} n_{pwk}^t \quad \forall p \in P_1, \forall w \in W_1 \cup W_3 \cup V_E, \forall k \in K_{1w}, \forall t \in T \quad (5.42)$$

$$s_{pw}^t = \sum_{k \in K_{1w}} u_{pwk}^t + \sum_{k \in K_{3w}} e_{pwk}^t \quad \forall p \in P_1, \forall w \in W_1 \cup W_3 \cup V_E, \forall t \in T \quad (5.43)$$

$$n_{pwk}^t \leq u_{pwk}^t \quad \forall p \in P_1, \forall w \in W_1 \cup W_3 \cup V_E, \forall k \in K_{1w}, \forall t \in T \quad (5.44)$$

$$\sum_{p \in P_3} o_{pwk}^t \leq 1 \quad \forall w \in W \cup V_E, \forall k \in K_{2w}, \forall t \in T \quad (5.45)$$

$$v_{pwk}^t \leq \sigma_{wk} o_{pwk}^t \quad \forall p \in P_2, \forall w \in W \cup V_E, \forall k \in K_{2w}, \forall t \in T \quad (5.46)$$

$$s_{pw}^t = \sum_{k \in K_{2w}} v_{pwk}^t + \sum_{k \in K_{3w}} e_{pwk}^t \quad \forall p \in P_2, \forall w \in W \cup V_E, \forall t \in T \quad (5.47)$$

$$o_{pwk}^t \leq v_{pwk}^t \quad \forall p \in P_2, \forall w \in W \cup V_E, \forall k \in K_{2w}, \forall t \in T \quad (5.48)$$

$$\sum_{p \in P} e_{pwk}^t \leq \theta_{wk} \quad \forall w \in W \cup V_E, \forall k \in K_{3w}, \forall t \in T \quad (5.49)$$

$$L_{ij}^{r-1} y_{ijr}^t \leq \sum_{p \in P} X_{pijr}^t \leq L_{ij}^r y_{ijr}^t \quad \forall (i, j) \in A_2 \cup A_3, \forall t \in T, r = 1, 2, \dots, R \quad (5.32)$$

$$\sum_{r=1}^R y_{ijr}^t \leq 1 \quad \forall (i, j) \in A_2 \cup A_3, \forall t \in T \quad (5.33)$$

$$x_{pij}^t = \sum_{r=1}^R X_{pijr}^t \quad \forall p \in P, \forall (i, j) \in A_2 \cup A_3, \forall t \in T \quad (5.34)$$

$$x_{pij}^t \geq 0 \quad \forall p \in P, \forall (i, j) \in A, \forall t \in T \quad (5.35)$$

$$z_{pw}^t \geq 0 \quad \forall p \in MP, \forall w \in W, \forall t \in T \quad (5.36)$$

$$s_{pl}^t \geq 0 \quad \forall p \in P, \forall l \in V_E, \forall t \in T \quad (5.37)$$

$$u_{pwk}^t \geq 0 \quad \forall p \in P_1, \forall w \in W_1 \cup W_3 \cup V_E, \forall k \in K_{1w}, \forall t \in T \quad (5.50)$$

$$n_{pwk}^t \in \{0, 1\} \quad \forall p \in P_1, \forall w \in W_1 \cup W_3 \cup V_E, \forall k \in K_{1w}, \forall t \in T \quad (5.51)$$

$$v_{pwk}^t \geq 0 \quad \forall p \in P_2, \forall w \in W \cup V_E, \forall k \in K_{2w}, \forall t \in T \quad (5.52)$$

$$o_{pwk}^t \in \{0, 1\} \quad \forall p \in P_2, \forall w \in W \cup V_E, \forall k \in K_{2w}, \forall t \in T \quad (5.53)$$

$$e_{pwk}^t \geq 0 \quad \forall p \in P, \forall w \in W \cup V_E, \forall k \in K_{3w}, \forall t \in T \quad (5.54)$$

$$b_{pj}^t \geq 0 \quad \forall p \in P, \forall j \in V_D, \forall t \in T \quad (5.38)$$

$$y_{ijr}^t \in \{0, 1\} \quad \forall (i, j) \in A_2 \cup A_3, \forall t \in T, r = 1, 2, \dots, R \quad (5.39)$$

A função objetivo (5.40), novamente, visa à minimização dos custos totais em todos os períodos de planejamento. Na primeira e na segunda parcelas, têm-se os custos de transporte e transbordo, incluindo a possibilidade de obtenção de economias de escala nos modais ferroviário e hidroviário fluvial. Na terceira parcela, têm-se os custos de processamento das matérias-primas nas indústrias, de acordo com os lotes de produção executados. As modificações realizadas em relação ao modelo anterior se encontram nas três parcelas seguintes, e se referem à consideração, neste caso, dos custos de estoque nos silos, tanques e armazéns gerais disponíveis, ao invés de um custo médio de estoque. Na última parcela, computam-se os custos de não atendimento das demandas por todos os produtos dentro dos prazos estabelecidos.

De (5.41) a (5.49) são realizadas as alocações de produtos aos tipos de instalações de estocagem disponíveis. Em (5.41), cada um dos silos disponíveis em cada uma das

processadoras em cada período é atribuído a um único produto, no máximo. Em (5.42), garante-se que se um silo está alocado a um granel sólido, a quantidade desse produto armazenada nesse silo deve respeitar os limites de capacidade, ou, caso contrário, a quantidade armazenada deve ser nula. Em (5.43), divide-se a quantidade de cada granel sólido estocado em cada processadora ou unidade de armazenagem em cada período nos silos e armazéns gerais disponíveis. Em (5.44), obriga-se a não alocação de silos não utilizados. De (5.45) a (5.48), as mesmas restrições são escritas para a alocação de granéis líquidos nos tanques. Em (5.49), garante-se que as capacidades dos armazéns gerais sejam respeitadas na alocação dos estoques de todos os produtos em todas as processadoras e unidades de armazenagem em todos os períodos. Nas equações (5.50) a (5.54) são definidos os domínios das novas variáveis, sendo binárias as variáveis de atribuição de granéis sólidos aos silos, n_{pwk}^t , e de atribuição de granéis líquidos aos tanques, o_{pwk}^t , dadas por (5.51) e (5.53), respectivamente. As demais variáveis que foram introduzidas no modelo são não negativas.

O modelo formulado para o problema de gestão de operações de curto prazo do complexo agroindustrial da soja com alocação de estoques é um problema de fluxos multiproduto, com consideração de múltiplos modais de transporte e múltiplos períodos de planejamento integrado com a alocação de produtos aos diferentes tipos de estrutura de armazenagem. Esse modelo de programação inteira mista também é NP-difícil (AHUJA et al., 1993). Na Tabela 5.5 são exibidos alguns dados utilizados para exprimir o porte desse problema, tais como número de parâmetros, variáveis e restrições. Para o cálculo do número de restrições do problema foram desconsideradas as restrições de definição de domínio e de canalização de variáveis, dadas pelas equações (5.28) a (5.31), (5.35) a (5.39) e (5.50) a (5.54).

Esse modelo, apesar de considerar a alocação de granéis sólidos e líquidos aos silos e tanques disponíveis, não considera custos ou tempos de troca de produtos (*setup*), como é usualmente feito na literatura para problemas que envolvem o dimensionamento e a programação de lotes de produção com múltiplos produtos. Normalmente, nesses casos, a troca entre produtos na linha de produção gera resíduos que devem ser totalmente eliminados antes de se passar ao produto seguinte. E também pode envolver tempos e custos dependentes da sequência de produção escolhida. No caso da designação de produtos a silos ou tanques, a limpeza a ser realizada é extremamente simples e não apresenta diferenças significativas de tempos ou custos de execução para a troca de produtos. Nos casos em que esses tempos ou custos de *setup* sejam

importantes, essa seria uma possível extensão do modelo formulado. Caso se deseje que esses custos sejam incluídos, basta associá-los às variáveis de atribuição de produtos aos silos e tanques, n'_{pwk} e o'_{pwk} , somando-se essas parcelas à função objetivo.

Tabela 5.5 – Porte do problema de gestão de operações de curto prazo na agroindústria da soja com alocação de estoques

Parâmetros		$4\tau(2 V_D +3 V_E +3 W + W_1 + W_3 + A'_O + A'_D + A_1 $ $+ A_4 + A_I)+ A_T +\tau V_O +9 V_E +13 W +R(A_2 + A_3)(2\tau+1)$ $+\sum_{w \in W_1 \cup W_3 \cup V_E} K_{1w} + \sum_{w \in W \cup V_E} K_{2w} + \sum_{w \in W \cup V_E} K_{3w} $
Variáveis	Não Negativas	$4\tau[V_D + V_E +2 W + A_T +R(A_2 + A_3)]+2\tau \sum_{w \in W_1 \cup W_3 \cup V_E} K_{1w} $ $+2\tau \sum_{w \in W \cup V_E} K_{2w} +4\tau \sum_{w \in W \cup V_E} K_{3w} $
	Binárias	$R\tau(A_2 + A_3)+2\tau \sum_{w \in W_1 \cup W_3 \cup V_E} K_{1w} +2\tau \sum_{w \in W \cup V_E} K_{2w} +4\tau \sum_{w \in W \cup V_E} K_{3w} $
	Totais	$4\tau[V_D + V_E +2 W + A_T +R(A_2 + A_3)]+R\tau(A_2 + A_3)$ $+4\tau \sum_{w \in W_1 \cup W_3 \cup V_E} K_{1w} +4\tau \sum_{w \in W \cup V_E} K_{2w} +8\tau \sum_{w \in W \cup V_E} K_{3w} $
Restrições		$\tau[V_O +4 V_D +4 V_T +4 V_E +3 W_1 +2 W_2 +4 W_3 $ $+(A_2 + A_3)(R+5)]+7\tau \sum_{w \in W_1 \cup W_3 \cup V_E} K_{1w} +7\tau \sum_{w \in W \cup V_E} K_{2w} +\tau \sum_{w \in W \cup V_E} K_{3w} $

5.3. Considerações Gerais

Neste capítulo foram propostos quatro modelos para auxílio à gestão de operações de curto prazo das empresas atuantes no complexo agroindustrial da soja, sendo úteis tanto para as empresas interessadas apenas na exportação da soja em grão, quanto para aquelas atuantes também na sua industrialização. As decisões apoiadas dizem respeito apenas aos interesses de empresas, não envolvendo o contexto governamental da exportação da soja e seus derivados. Uma série de premissas reais do complexo agroindustrial da soja no Brasil estão bem representadas nesses modelos, tais como a possibilidade de obtenção de economias de escala no transporte ferroviário e hidroviário fluvial, a possibilidade de realização conjunta ou separada das

etapas de esmagamento da soja e o refino do óleo bruto, além da possibilidade de uso de diferentes estruturas de armazenagem para os produtos do complexo da soja.

Do ponto de vista de modelagem, esses modelos propostos estão apoiados em teorias consolidadas, resultando em modelos de fluxos em redes monoproduto e multiproduto. Esses modelos também estão apoiados sobre a estrutura de rede proposta do capítulo anterior, que apresenta uma estrutura altamente esparsa. Todos eles apresentam a consideração de múltiplos modais de transporte e períodos de planejamento. Enquanto o primeiro modelo, voltado à roteirização do transporte da soja para exportação no curto prazo é totalmente linear, e tido como de fácil solução computacionalmente, os demais são formulações de programação inteira mista e considerados de difícil solução. É importante ressaltar que esses modelos são de grande porte e necessitam de grandes quantidades de dados para a sua alimentação, o que pode resultar em dificuldades de estimação acurada de dados referentes aos tempos, custos e capacidades de transporte, transbordo, esmagamento e refino; e de custos e capacidades de armazenagem nos silos, tanques e armazéns.

O modelo para transporte intermodal da soja em grão está voltado apenas à exportação da soja, considerando apenas custos lineares. Como vantagem, esse modelo apresenta a menor necessidade de dados entre os quatro modelos apresentados, mas, ao mesmo tempo, captura bem as premissas do sistema representado e fornece informações bastante detalhadas a respeito da gestão de transporte e armazenagem em períodos de curto prazo. O segundo modelo, que inclui a possibilidade de obtenção de economias de escala nos transporte ferroviário e hidroviário fluvial, proporciona a análise dessa oportunidade, pouco explorada na prática e na literatura relacionada ao agronegócio da soja no Brasil. O modelo de dimensionamento de lotes de produção e planejamento do transporte intermodal na agroindústria da soja incorpora as funções dos modelos anteriores, mas também apoia decisões de empresas que atuam na industrialização da soja. Essas considerações são úteis não só pela inclusão do processo industrial, mas também pela possibilidade de planejamento do atendimento às demandas domésticas de farelo, óleo bruto e óleo refinado. O quarto e último modelo apresentado nesse capítulo apoia decisões de curto prazo para toda o complexo agroindustrial da soja, alocando os estoques aos silos, tanques e armazéns, capturando melhor as diferenças entre grânéis sólidos e líquidos.

Algumas considerações desses problemas são originais, no sentido de que não se tem conhecimento de relatos na literatura relacionadas ao tratamento semelhante ao dado no complexo agroindustrial da soja nesses modelos. Dentre eles, destaca-se o fato do foco do decisor recair sobre a administração de uma empresa, sendo os demais modelos publicados no contexto do agronegócio da soja no Brasil voltados a decisões tomadas em caráter governamental. Quando comparados aos demais trabalhos, tanto nacionais quanto internacionais, também se observa que no caso desta tese os problemas foram modelados em um único estágio, ao passo que na maior parte dos trabalhos publicados, os complexos de produção e transporte são divididas em dois ou mais estágios. A divisão dos problemas aqui tratados em vários estágios não se faz pertinente, na medida em que a soja em grão, tanto nos casos das empresas exportadoras ou que incluem os processos de industrialização, pode sair das áreas de oferta diretamente para os portos, não passando por estágios intermediários de transbordo ou industrialização.

Além disso, os modelos propostos também possibilitam a consideração de formação de contratos de transporte sem tarifação das rotas nas mudanças de concessionárias de ferrovias, que é uma possibilidade de ganho prático que foi identificada, apenas acrescentando-se arcos à rede para representar essas novas transações. Em relação ao escopo considerado, a presente tese também se destaca em relação aos relatos da literatura, por apoiar decisões de empresas com diferentes focos de atuação e em diferentes horizontes de tempo. Esse amplo escopo dado à modelagem também possibilita à sua fácil adaptação para outros sistemas, não necessariamente envolvidos com o agronegócio, que possuem a mesma lógica de escoamento. Todos esses modelos foram implementados em uma linguagem de modelagem e foram aplicados para resolver problemas testes usando um *software* de otimização, com a finalidade de testar a sua coerência e aplicabilidade. Os resultados desses experimentos estão reportados no Capítulo 7.

6 PLANEJAMENTO DE CAPACIDADE NO COMPLEXO AGROINDUSTRIAL DA SOJA

O planejamento de capacidade no complexo agroindustrial da soja envolve decisões relativas à programação dos investimentos a serem realizados em instalações ao longo do complexo agroindustrial. Os tipos de instalações mais comumente considerados nesses estudos incluem os terminais intermodais, os armazéns e as unidades industriais. Esses investimentos devem ser integrados a um processo decisório que parte da necessidade de ampliação da estrutura e configuração física já disponível. Qualquer que seja o foco de atuação das empresas, o objetivo é determinar as melhores localizações e também o dimensionamento dessas instalações, minimizando os custos totais de investimento e de uso de toda a estrutura física, que inclui os terminais intermodais, as fábricas e os armazéns.

Assim como no caso do planejamento de operações de curto prazo estudado no Capítulo 5, o planejamento de capacidade também envolve decisões bastante complexas, ainda focadas nas atividades de transporte intermodal, manutenção e movimentação de estoques e dimensionamento da produção de derivados da soja nas unidades industriais disponíveis. Porém, nesse caso, é possível, dentro de um horizonte de planejamento de médio a longo prazo, inserir e ativar novos terminais intermodais, armazéns e fábricas, de forma a melhorar o fluxo dos produtos e reduzir os respectivos custos a eles associados.

Como já foi dito no Capítulo 3, apesar das empresas atuantes no complexo agroindustrial da soja podem ser detentoras de muitas instalações necessárias à realização de suas atividades, existem fatores externos ao controle dessas empresas que podem tornar úteis estudos de investimento em novas estruturas. Partindo das áreas produtoras de soja, observa-se que as plantações, desde que iniciadas em escala comercial na década de 1970, vêm se movimentando para o Centro-Oeste do país e para o Norte. Devido a essa movimentação, novos desafios se impõem a essas empresas, como o aumento considerável no comprimento das rotas de transporte da soja e seus derivados. Em resposta à interiorização do desenvolvimento do agronegócio, o governo investiu e investe na construção, ampliação e conservação de rodovias, de forma a integrar as zonas de produção e de consumo. Mais recentemente, com os Programas de Aceleração do Crescimento (PAC) I e II, também se observam esforços no sentido de ampliar o

uso de ferrovias e hidrovias fluviais, que podem baratear os custos de transporte de produtos agrícolas, fertilizantes e produtos minero metalúrgicos, principalmente (PAC, 2012).

Voltando à atuação das empresas do agronegócio da soja, os investimentos mais antigos em esmagadoras e refinarias foram realizados próximos às plantações e aos mercados consumidores, como as indústrias alimentícias e de ração animal, ou dos portos, facilitando a exportação desses produtos. Porém, além do deslocamento das plantações, ocorreram mudanças nos perfis de consumo da soja em grão e dos seus derivados ao longo do tempo. Por exemplo, a China construiu o seu próprio parque industrial, passando a importar a soja em grão, e não mais o óleo refinado e o farelo de soja. A União Europeia, depois de sanções que impedem a alimentação do gado com rações que possuam proteína animal em sua formulação, passou a demandar grandes quantidades do farelo de soja brasileiro. Internamente, houve a diversificação e a expansão da pecuária intensiva, além de grande aporte de investimentos em combustíveis alternativos. Com isso, a demanda interna por farelo também aumentou e surgiu um novo mercado para o óleo de soja bruto, que é a fabricação de biodiesel. Outra mudança importante no cenário mais à jusante no complexo foi a ampliação de portos com terminais de exportação de grãos, muitas vezes oferecendo incentivos fiscais e de redução de custos para instalação ou uso de instalações desse tipo (PAC, 2012).

No que diz respeito à própria realidade das empresas que atuam no complexo agroindustrial da soja no Brasil, outras possibilidades de análise de situações que exigem investimentos em estrutura física podem ser citadas. Algumas dessas empresas, apesar de possuírem uma estrutura bem distribuída e dimensionada, podem comprar outras empresas menores que, ao serem incorporadas, geram novos problemas de integração e capacidade. As cooperativas, ao admitir mais cooperados, sofrem principalmente com a falta de estruturas de armazenagem, mas também podem conseguir unir esforços para a construção de fábricas e terminais intermodais próprios. Outras empresas, com o surgimento de uma estrutura de transporte mais favorável, podem optar por expandir sua área de atuação, que pode estar bastante concentrada ou não, em relação à demanda interna, por exemplo.

Como a soja possui um ciclo sazonal de produção e colheita, com picos nos meses de março e abril, o horizonte de planejamento, mesmo nesse contexto estratégico, é discretizado em períodos mensais. Dessa forma, é possível representar não só as sazonalidades da oferta de soja, como também tendências de crescimento ou decréscimo de demandas futuras. Ao se

planejar os investimentos em novas unidades industriais e de estoque em um horizonte de 5 anos, por exemplo, é possível, por meio dos modelos propostos, prever o mês mais adequado para que essas instalações entrem em funcionamento, absorvendo as demandas pelos serviços disponibilizados a partir desse momento.

No caso do planejamento em investimentos de localização de novos terminais intermodais, podem-se considerar locais candidatos na rede que passem por ferrovias e hidrovias ainda em projeto, permitindo a construção do terminal simultaneamente à sua via de acesso e a utilização dessas novas rotas assim que entrarem em funcionamento. Essa estratégia pode gerar vantagens competitivas para a empresa em termos de absorção de ofertas próximas, ou em relação a ganhos nos tempos e custos requeridos para escoamento dos seus produtos.

Assim, o objetivo desse capítulo é o de formalizar um conjunto de modelos matemáticos para auxílio ao planejamento de capacidade, com a previsão de investimentos em instalações de transbordo, estoque, esmagamento de soja e refino de óleo bruto. Da mesma forma como o capítulo anterior foi organizado, os dois primeiros modelos estão relacionados às atividades de empresas que negociam apenas a soja em grão, resultando em modelos de fluxos monoproduto, na Seção 6.1. Os dois últimos modelos, formulados na Seção 6.2, estão relacionados àquelas empresas que também realizam a transformação da soja em derivados, resultando em modelos de fluxos multiproduto. Para cada tipo de empresa, é formulado um modelo de localização de instalações em que, para cada local candidato, uma única alternativa de investimento em capacidade é considerada. E também um segundo modelo, que consiste em uma extensão do primeiro, em que alternativas discretas de investimento em capacidade são avaliadas. Essa extensão permite que várias alternativas possam ser avaliadas simultaneamente, levando em consideração não só o local em que o investimento em um determinado tipo de instalação é realizado, mas também a intensidade dos investimentos que devem ser feitos. Ao final do capítulo, são destacados alguns aspectos relevantes desses modelos, assim como algumas de suas contribuições teóricas e práticas.

6.1 Empresas Exportadoras da Soja em Grão

Para as empresas que atuam somente no mercado de exportação da soja em grão, os investimentos previstos nos modelos apresentados nas seções que se seguem dizem respeito apenas à construção de novos terminais intermodais e armazéns gerais, uma vez que esses podem ser privados. Devido ao fato dessas empresas atuarem somente no mercado de exportação, seus maiores desafios estão relacionados à conciliação do atendimento da demanda que, em geral, é razoavelmente constante, com a oferta, que é sazonal e apresenta pico anual para a colheita da soja. A Figura 6.1 destaca o foco dessas empresas, reforçando a ideia de que os seus maiores desafios são o de integrar as áreas de produção e consumo a um custo mínimo, ao mesmo tempo em que equilibra diferenças sazonais em relação às quantidades ofertadas e demandadas. Portanto, os modelos dessa seção tratam de investimentos em transporte, dados pela instalação de novos terminais intermodais, e em armazenagem, pela instalação de armazéns gerais.

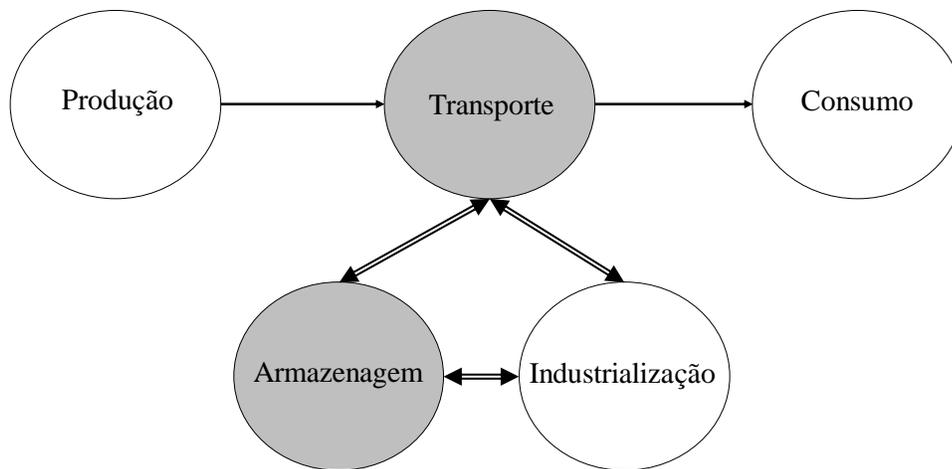


Figura 6.1 – Foco do planejamento de capacidade de empresas exportadoras da soja em grão

No primeiro modelo, proposto na subseção 6.1.1, considera-se que para cada local candidato, apenas uma alternativa de instalação é dada. Dessa forma, o maior foco está em definir a localização para novos terminais intermodais e armazéns gerais. Esse modelo fornece, além da localização da respectiva instalação, o melhor momento no horizonte de planejamento para a abertura desse terminal intermodal ou armazém geral. Esse melhor momento para abertura pode coincidir com um crescimento do fluxo de soja em grão em uma determinada direção, com a abertura de uma ferrovia ou hidrovia, ou ainda com uma mudança nos padrões de oferta ou

demanda. No segundo modelo, proposto na subseção 6.1.2, um conjunto de alternativas de investimento é avaliado para cada local candidato a instalação de um terminal ou armazém. Dessa forma, esse modelo permite avaliar se a construção, por exemplo, de um grande armazém em um determinado local pode trazer mais benefícios, dentro do horizonte planejado, do que a construção de dois ou mais armazéns menores em locais dispersos.

6.1.1 Localização de terminais intermodais e armazéns gerais (Modelo 5)

O modelo de localização de terminais intermodais e armazéns gerais é basicamente um modelo de localização de instalações com custos fixos de investimento em um horizonte de planejamento discreto, no qual se indica o momento mais adequado para a abertura de uma instalação, que pode ser um armazém geral ou um terminal intermodal. Todos os custos são considerados lineares, sendo os custos de uso da estrutura proporcionais às quantidades de soja transportada, transbordada e armazenada, enquanto os custos de investimento em instalações são proporcionais à sua capacidade e ao local candidato, que pode ser mais ou menos valorizado.

A representação da rede de transporte também segue a mesma representação em múltiplos níveis, considerada no Capítulo 4. Porém, no contexto agora de médio a longo prazo de decisões que se deseja apoiar, ao contrário do Capítulo 5, não é mais apropriado considerar os tempos de transporte e transbordo, nem as quantidades de demanda que não poderão ser atendidas nos prazos estabelecidos em contrato. As atividades da empresa, no horizonte de planejamento agora considerado, são planejadas de forma agregada e supõe-se que seja possível realizar dentro do mês etapas de transporte, transbordo, armazenagem e embarque da soja no porto, adequadamente.

Os dados necessários à formulação do modelo são mostrados a seguir:

Conjuntos:

V_0 = Vértices de oferta

V_D = Vértices de demanda

- V_m = Vértices de cada um dos modais considerados, $m = \{1, 2, 3, 4\}$
 V_E = Vértices que representam os armazéns de soja
 V_T = Vértices da rede de transporte, $V_T = \bigcup_{m=1}^4 V_m$
 A'_O = Arcos que ligam os vértices de oferta de soja à rede de transporte, formado pelos elementos não nulos da submatriz $V_{O \times V_I}$
 A'_D = Arcos que ligam a rede de transporte aos vértices de demanda, ou seja, elementos não nulos da submatriz $V_{T \times V_D}$
 A'_E = Arcos que ligam os armazéns à rede de transporte, formado pelos elementos não nulos das submatrizes $V_{I \times V_E}$ e $V_{E \times V_I}$
 A_m = Arcos de cada uma das redes de transporte, formados pelos elementos das submatrizes $V_m \times V_m$, $m = \{1, 2, 3, 4\}$
 A_I = Arcos que representam os terminais intermodais, formados pelos elementos das submatrizes $V_1 \times V_2$, $V_1 \times V_3$, $V_1 \times V_4$, $V_2 \times V_1$, $V_2 \times V_3$, $V_2 \times V_4$, $V_3 \times V_1$, $V_3 \times V_2$ e $V_3 \times V_4$
 A_T = Arcos da rede de transporte, $A_T = \left(\bigcup_{m=1}^4 A_m \right) \cup A_I \cup A'_O \cup A'_D$
 T = Períodos de planejamento, $T = 1, 2, \dots, \tau$

Parâmetros:

- c_{ij}^t = Custo de transporte no arco (i, j) , $(i, j) \in A_T$ no período t (R\$)
 a_i^t = Quantidade de soja em grão ofertada na origem i , $i \in V_O$ no período t (t)
 d_j^t = Quantidade de soja em grão demandada pelo destino j , $j \in V_D$ no período t (t)
 f_{ij}^t = Custo de instalar um terminal intermodal no arco (i, j) , $(i, j) \in A_I$ no período t (R\$)
 H_l^t = Custo de instalar um armazém no local l , $l \in V_E$ no período t (R\$)
 h_l^t = Custo de estoque no armazém l , $l \in V_E$ no período t (R\$)
 u_{ij} = Capacidade do terminal intermodal a ser instalado em (i, j) , $(i, j) \in A_I$ (t)

v_l = Capacidade do armazém a ser instalado em l , $l \in V_E$ (t)

São definidas as seguintes variáveis de decisão:

x_{ij}^t = Fluxo de transporte no arco (i, j) , $(i, j) \in A_T$ no período t (t)

s_l^t = Quantidade estocada no terminal intermodal l , $l \in V_E$ ao final do período t (t)

y_{ij}^t = $\begin{cases} 1, & \text{se um terminal intermodal for instalado no arco } (i, j) \text{ no período } t \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases}$

Y_l^t = $\begin{cases} 1, & \text{se um armazém for instalado no arco } (i, j) \text{ no período } t \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases}$

O modelo matemático pode, então, ser descrito pelas equações (6.1) a (6.13), a seguir:

$$\text{Min} \sum_{(i,j) \in A_T} \sum_{t \in T} c_{ij}^t x_{ij}^t + \sum_{(i,j) \in A_T} \sum_{t \in T} f_{ij}^t (y_{ij}^t - y_{ij}^{t-1}) + \sum_{l \in V_E} \sum_{t \in T} h_l^t s_l^t + \sum_{l \in V_E} \sum_{t \in T} H_l^t (Y_l^t - Y_l^{t-1}) \quad (6.1)$$

Sujeito a:

$$\sum_{j(i,j) \in A'_o} x_{ij}^t \leq a_i^t \quad \forall i \in V_o, \forall t \in T \quad (6.2)$$

$$\sum_{i(i,j) \in A'_d} x_{ij}^t = d_j \quad \forall i \in V_D, \forall t \in T \quad (6.3)$$

$$\sum_{i(i,k) \in A_T} x_{ik}^t = \sum_{j(k,j) \in A_T} x_{kj}^t \quad \forall k \in V_T, \forall t \in T \quad (6.4)$$

$$\sum_{i(i,j) \in A'_E} x_{ij}^t + s_l^{t-1} = s_l^t + \sum_{j(i,j) \in A'_E} x_{ij}^t \quad \forall l \in V_E, \forall t \in T \quad (6.5)$$

$$x_{ij}^t \leq u_{ij} y_{ij}^t \quad \forall (i, j) \in A_T, \forall t \in T \quad (6.6)$$

$$s_l^t \leq v_l Y_l^t \quad \forall l \in V_E, \forall t \in T \quad (6.7)$$

$$y_{ij}^{t-1} \leq y_{ij}^t \quad \forall (i, j) \in A_T, \forall t \in T \quad (6.8)$$

$$Y_l^{t-1} \leq Y_l^t \quad \forall l \in V_E, \forall t \in T \quad (6.9)$$

$$x_{ij}^t \geq 0 \quad \forall (i, j) \in A_T, \forall t \in T \quad (6.10)$$

$$s_l^t \geq 0 \quad \forall l \in V_E, \forall t \in T \quad (6.11)$$

$$y_{ij}^t \in \{0,1\} \quad \forall (i, j) \in A_I, \forall t \in T \quad (6.12)$$

$$Y_l^t \in \{0,1\} \quad \forall l \in V_E, \forall t \in T \quad (6.13)$$

A função objetivo (6.1) visa à minimização dos custos de transporte, armazenagem e investimentos em terminais intermodais e armazéns gerais. Na primeira parcela, têm-se os custos referentes às operações de transporte e transbordo na rede. Na segunda parcela, são computados os custos fixos de investimento em terminais intermodais. No momento em que um terminal intermodal é aberto, em algum período dentro do horizonte de planejamento, a diferença $y_{ij}^t - y_{ij}^{t-1} = 1$ e faz com que os custos de instalação sejam cobrados apenas nesse primeiro período em que o terminal intermodal estiver disponível no arco respectivo arco (i, j) . No caso de um terminal intermodal ser ativado em um determinado arco (i, j) , tanto nos períodos anteriores quanto posteriores à sua abertura, a diferença $y_{ij}^t - y_{ij}^{t-1} = 0$. Antes do período t de abertura do terminal, ambas as variáveis são nulas. Depois da abertura do terminal, as duas variáveis assumem valor igual a um. A terceira parcela diz respeito aos custos de manutenção de estoques e a quarta e última parcela se refere aos custos de instalação de armazéns gerais ao longo da rede. Da mesma forma com o que ocorre com os terminais intermodais, os custos de instalação dos armazéns gerais são cobrados apenas no período em que o armazém geral é instalado e entra em operação.

As restrições (6.2) e (6.3) fazem o balanço de ofertas e demandas, garantindo o atendimento das últimas. A seguir, nas restrições (6.4) se tem o balanço de massa nos vértices da rede de transporte, enquanto nas restrições (6.5) ocorre o balanço de estoque de soja nos armazéns gerais. As restrições (6.6) e (6.7) servem para garantir que as capacidades nos terminais intermodais e armazéns sejam respeitadas, respectivamente, caso os mesmos tenham sido instalados. Caso contrário, as quantidades de soja transbordadas ou armazenadas devem ser nulas. As restrições (6.8) e (6.9) garantem que, uma vez abertos, os terminais intermodais e armazéns gerais devem permanecer em operação até o final do horizonte de planejamento. Em (6.10),

(6.11), (6.12) e (6.13) são definidos os domínios das variáveis, sendo que as duas primeiras são não negativas e as duas últimas, binárias.

O modelo de localização de terminais intermodais e armazéns gerais é uma extensão para o modelo de localização de instalações com custos fixos e, portanto, é considerado NP-difícil (DASKIN, 1995). Na Tabela 6.1 é possível visualizar alguns dados que exprimem o porte desse modelo, tais como o número de parâmetros, variáveis e restrições. Para o cálculo do número de restrições do problema foram desconsideradas as restrições de canalização e definição de domínio de variáveis, dadas pelas equações (6.6) a (6.13).

Tabela 6.1 – Porte do problema de localização de terminais intermodais e armazéns gerais

Parâmetros		$\tau(V_O + V_D + 2 V_E + A_T + A_I) + A_I + V_E $
Variáveis	Não Negativas	$\tau(V_E + A_T)$
	Binárias	$\tau(V_E + A_I)$
	Totais	$\tau(2 V_E + A_T + A_I)$
Restrições		$\tau(V_O + V_D + V_T + V_E)$

Apesar da simplicidade de formulação, esse modelo é capaz de representar dois importantes desafios relacionados ao planejamento de capacidade das empresas exportadoras de soja: o de melhorar a configuração da sua rede de armazenagem e o de integrar suas rotas de transporte a modais mais baratos que o rodoviário. A modelagem de problemas de investimento em estruturas de armazenagem e integração da rede de transporte intermodal, por meio da instalação de terminais intermodais sob o ponto de vista das empresas atuantes no complexo da soja, não foi anteriormente tratada na literatura em nenhum trabalho de que se tenha conhecimento. Porém, faz parte do planejamento de médio a longo prazo de muitas empresas e cooperativas atuantes no agronegócio da soja.

6.1.2 Localização de terminais intermodais e armazéns gerais com alternativas discretas de investimento (Modelo 6)

Em alguns casos, além da previsão da melhor localização para investimento em um determinado tipo de instalação, isto é, em terminais intermodais ou armazéns gerais, pode ser

necessário avaliar o tamanho do investimento que deve ser realizado. Por exemplo, ao se construir um armazém para estocar soja em uma determinada localização, pode-se ser necessário decidir pela construção de um armazém de pequeno, médio ou grande porte. Por outro lado, também é possível, ao invés de se construir um único armazém de grande porte em um determinado local, construir dois armazéns, um de pequeno e outro de médio porte, sendo um deles em outra localidade ao longo da rede. A extensão para o modelo de localização de terminais intermodais e armazéns gerais, apresentada a seguir, permite a avaliação desses tipos de opções de investimento por meio da análise de algumas alternativas discretas de capacidade em cada local candidato à realização desses investimentos.

As modificações nos dados necessárias à inclusão das alternativas discretas de capacidade são mostrados a seguir:

Conjuntos:

- N_{α} = Alternativas discretas de capacidade para os terminais intermodais a serem instalados
 N_{β} = Alternativas discretas de capacidade para os armazéns a serem instalados

Parâmetros:

- $f_{ij\alpha}^t$ = Custo de instalar um terminal intermodal no arco (i, j) , $(i, j) \in A_t$ considerando a alternativa α de capacidade no período t (R\$)
 $H_{l\beta}^t$ = Custo de instalar um armazém considerando a alternativa de capacidade β no local l , $l \in V_E$ no período t (R\$)
 $u_{ij\alpha}$ = Capacidade do α -ésimo terminal intermodal a ser instalado em (i, j) , $(i, j) \in A_t$ (t)
 $v_{l\beta}$ = Capacidade do β -ésimo armazém a ser instalado em l , $l \in V_E$ (t)

Variáveis:

$$y_{ij\alpha}^t = \begin{cases} 1, & \text{se um terminal intermodal considerando a alternativa } \alpha \text{ for instalado no arco} \\ & (i, j) \text{ no período } t \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases}$$

$$Y_{l\beta}^t = \begin{cases} 1, & \text{se um armazém considerando a alternativa } \beta \text{ for instalado no arco } (i, j) \text{ no} \\ & \text{período } t \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases}$$

O modelo matemático pode então ser formulado pelas equações (6.14) a (6.22), além das equações (6.2) a (6.5) e (6.10) a (6.11), do modelo anterior:

$$\text{Min} \sum_{(i,j) \in A_T} \sum_{t \in T} c_{ij}^t x_{ij}^t + \sum_{(i,j) \in A_I} \sum_{\alpha \in N_\alpha} \sum_{t \in T} f_{ij\alpha}^t (y_{ij\alpha}^t - y_{ij\alpha}^{t-1}) + \sum_{l \in V_E} \sum_{t \in T} h_l^t s_l^t + \sum_{l \in V_E} \sum_{\beta \in N_\beta} \sum_{t \in T} H_{l\beta}^t (Y_{l\beta}^t - Y_{l\beta}^{t-1}) \quad (6.14)$$

Sujeito a:

$$\sum_{j|(i,j) \in A'_0} x_{ij}^t \leq a_i^t \quad \forall i \in V_0, \forall t \in T \quad (6.2)$$

$$\sum_{i|(i,j) \in A'_0} x_{ij}^t = d_j \quad \forall i \in V_D, \forall t \in T \quad (6.3)$$

$$\sum_{i|(i,k) \in A_T} x_{ik}^t = \sum_{j|(k,j) \in A_T} x_{kj}^t \quad \forall k \in V_T, \forall t \in T \quad (6.4)$$

$$\sum_{i|(i,j) \in A'_E} x_{ij}^t + s_l^{t-1} = s_l^t + \sum_{j|(i,j) \in A'_E} x_{ij}^t \quad \forall l \in V_E, \forall t \in T \quad (6.5)$$

$$x_{ij}^t \leq \sum_{\alpha \in N_\alpha} u_{ij\alpha} y_{ij\alpha}^t \quad \forall (i,j) \in A_I, \forall t \in T \quad (6.15)$$

$$s_{l\beta}^t \leq \sum_{\beta \in N_\beta} v_{l\beta} Y_{l\beta}^t \quad \forall l \in V_E, \forall t \in T \quad (6.16)$$

$$\sum_{\alpha \in N_\alpha} y_{ij\alpha}^t \leq 1 \quad \forall (i,j) \in A_I, \forall t \in T \quad (6.17)$$

$$\sum_{\beta \in N_\beta} y_{ij\beta}^t \leq 1 \quad \forall l \in V_E, \forall t \in T \quad (6.18)$$

$$y_{ij\alpha}^{t-1} \leq y_{ij\alpha}^t \quad \forall (i,j) \in A_I, \forall \alpha \in N_\alpha, \forall t \in T \quad (6.19)$$

$$Y_{l\beta}^{t-1} \leq Y_{l\beta}^t \quad \forall l \in V_E, \forall \beta \in N_\beta, \forall t \in T \quad (6.20)$$

$$x_{ij}^t \geq 0 \quad \forall (i, j) \in A_T, \forall t \in T \quad (6.10)$$

$$s_l^t \geq 0 \quad \forall l \in V_E, \forall t \in T \quad (6.11)$$

$$y_{ij\alpha}^t \in \{0,1\} \quad \forall (i, j) \in A_T, \forall \alpha \in N_\alpha, \forall t \in T \quad (6.21)$$

$$Y_{l\beta}^t \in \{0,1\} \quad \forall l \in V_E, \forall \beta \in N_\beta, \forall t \in T \quad (6.22)$$

A função objetivo (6.14), da mesma forma como no modelo anterior, visa à minimização dos custos de transporte, armazenagem e investimentos em terminais intermodais e armazéns gerais. As diferenças entre as duas funções podem ser visualizadas na segunda e na quarta parcelas. Os investimentos realizados, agora, são limitados a um conjunto de alternativas discretas de investimento em capacidade para os terminais intermodais e para os armazéns gerais. Cada uma dessas alternativas possui um custo de instalação e uma capacidade distintos dos demais elementos do mesmo conjunto de opções para um mesmo local. Note que essas diferenças de custos podem estar associadas à obtenção de economias de escala obtidas para a construção de terminais intermodais ou armazéns de grande porte, ou até mesmo em relação ao uso de diferentes tecnologias de transbordo, limpeza e conservação da soja em grão.

As restrições de conservação de fluxo nos vértices da rede, dadas por (6.2) a (6.5), permanecem inalteradas. As restrições (6.15) servem para garantir que se alguma alternativa discreta de investimento α for selecionada para o terminal intermodal localizado no arco (i, j) em algum período t , sua capacidade de transbordo deve ser respeitada na passagem da soja em grão por este terminal. Caso esse mesmo terminal não esteja aberto, o fluxo de soja por ele deve ser nulo. As restrições descritas em (6.16) exercem a mesma função para o caso dos armazéns gerais. As restrições descritas em (6.17) e (6.18) servem para garantir que, no máximo, uma alternativa discreta seja selecionada para investimento em terminais intermodais e em armazéns em um local específico, respectivamente. As restrições (6.19) e (6.20) garantem que, uma vez abertos, os terminais intermodais e armazéns gerais devem permanecer em operação até o final do horizonte de planejamento. Em (6.10), (6.11), (6.21) e (6.22) são definidos os domínios das variáveis. Em (6.10) e (6.11) são definidas as variáveis não negativas que representam os fluxos na rede de transporte e as quantidades em estoque nos armazéns. Em (6.21) (6.22) são definidas as variáveis binárias que representam as decisões de instalar ou não os terminais intermodais e os armazéns gerais na rede.

O modelo de localização de terminais intermodais e armazéns gerais com alternativas discretas de investimento também é considerado NP-difícil, por ser uma extensão do modelo de localização de instalações com custos fixos (DASKIN, 1995). Na Tabela 6.2 são apresentados dados que exprimem o porte desse modelo, tais como o número de parâmetros, variáveis e restrições. Para o cálculo do número de restrições do problema foram desconsideradas as restrições de canalização e definição de domínio de variáveis, dadas pelas equações (6.10) e (6.11) e (6.15) a (6.22).

Tabela 6.2 – Porte do problema de localização de terminais intermodais e armazéns gerais com alternativas discretas de investimento

Parâmetros		$\tau[V_O + V_D + V_E (N_\beta + 1) + A_T + A_I \times N_\alpha] + A_I \times N_\alpha + V_E \times N_\beta $
Variáveis	Não Negativas	$\tau(V_E + A_T)$
	Binárias	$\tau(V_E \times N_\beta + A_I \times N_\alpha)$
	Totais	$\tau[V_E (2 + N_\beta) + A_T + A_I \times N_\alpha]$
Restrições		$\tau(V_O + V_D + V_T + V_E)$

O uso de alternativas discretas de investimento em terminais intermodais e armazéns não é uma ideia nova, mas que aparece na literatura em outros contextos, como, por exemplo, em projetos de sistemas de manufatura (BITRAN e MORABITO, 1996; MORABITO, 1998). No contexto do planejamento médio a longo prazo do agronegócio da soja, essa ideia é muito útil por permitir a avaliação de diferentes alternativas de capacidade das instalações candidatas em cada local escolhido, como é o caso de terminais intermodais e armazéns gerais. O nível de realidade que essa ideia captura não se limita à simples enumeração de alguns custos e capacidades relacionados a cada candidato, mas pode incluir a avaliação de diferentes tecnologias operacionais e a obtenção de economias de escala na construção de instalações maiores, dentre outras possibilidades.

6.2 Empresas Atuantes no Complexo Produtivo da Soja

As empresas atuantes em toda o complexo produtiva da soja, por participarem das etapas de transformação da soja em grão em seus produtos derivados, também possuem interesse em investir em unidades industriais de esmagamento e refino, além do investimento já tratado na seção anterior em terminais intermodais e em armazéns gerais. Com a inclusão dessas possibilidades de investimento, o foco dessas empresas, quando se trata do planejamento de capacidade, é mostrado na Figura 6.2. A partir dos modelos já formalizados na seção anterior, a etapa de industrialização é tratada nas subseções que se seguem. Na subseção 6.2.1, consideram-se decisões de investimento em unidades industriais, para a realização de ambos os processos que podem ser disponibilizados, o esmagamento da soja em grão e o refino do óleo bruto. Na subseção 6.2.2, o mesmo modelo é estendido para os casos em que se deseja avaliar alternativas discretas de investimento, da mesma forma como foi feito para as empresas exportadoras de soja.

6.2.1 Localização de terminais intermodais, armazéns, esmagadoras e refinarias (Modelo 7)

O problema de localização de terminais intermodais, armazéns, esmagadoras e refinarias é basicamente uma extensão do modelo formulado na Seção 6.1.1. Porém, consideram-se as possibilidades de investimento em unidades de processamento de soja e de refino de óleo bruto, mas não de ambas ao mesmo tempo. Como no Capítulo 5 as unidades industriais eram divididas em subconjuntos, W_1 , W_2 e W_3 do conjunto W , ter-se-iam igualmente três conjuntos de locais candidatos à instalação de um tipo de fábrica, para esmagamento da soja em grão, para refino do óleo bruto e para a realização de ambos os serviços. Porém, por simplicidade, são consideradas apenas as possibilidades de investimento em unidades de esmagamento e refino, podendo ser abertas simultaneamente no mesmo local ou não. Dessa forma, com dois conjuntos de variáveis de decisão, se consideram as possibilidades de abertura dos três tipos de fábrica já definidas nos capítulos anteriores.

Os dados de entrada necessários à formulação do modelo, e que não foram apresentados nos modelos anteriores deste capítulo, são:

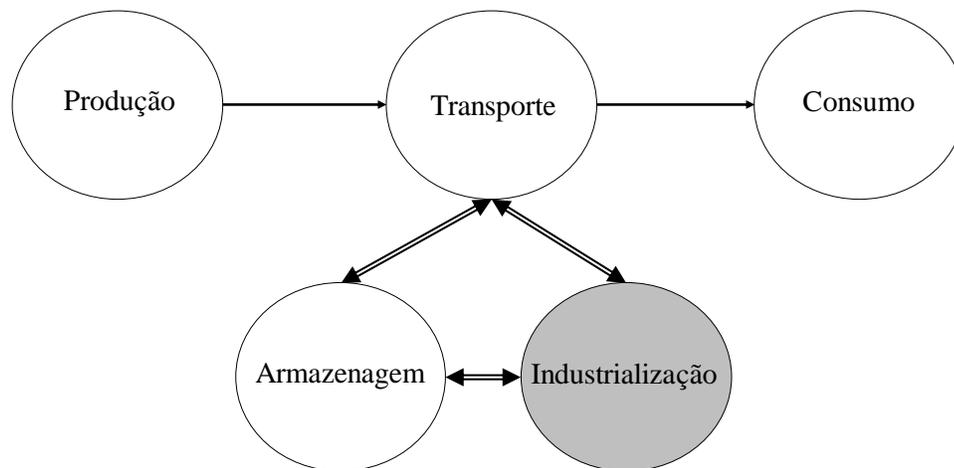


Figura 6.2 – Foco do planejamento de capacidade das empresas atuantes no complexo produtiva da soja

Conjuntos:

P = Produtos

MP = Matérias-primas

W = Vértices com unidades industriais

W_1 = Vértices que representam as unidades esmagadoras de soja

W_2 = Vértices que representam as unidades refinadoras de óleo bruto

W_3 = Vértices que representam as unidades que realizam esmagamento e refino

Parâmetros:

g_{pw}^t = Custo de processar a matéria-prima p na unidade industrial w no período t (R\$)

G_w^t = Custo de instalar uma esmagadora no local w no período t (R\$)

G_w^{rt} = Custo de instalar uma refinaria no local w no período t (R\$)

H_l^t = Custo de instalar um armazém no local l no período t (R\$)

h_l^t = Custo de estoque no armazém l no período t (R\$)

- λ'_{pw} = Capacidade de esmagamento de soja ($p = \mathbf{G}$) na unidade industrial w (t)
 λ''_{pw} = Capacidade de refino do óleo bruto ($p = \mathbf{B}$) na unidade industrial w (t)
 λ_{pw} = Capacidade de processamento da matéria-prima p na unidade industrial w (t)

São definidas as seguintes variáveis adicionais:

- z^t_{pw} = Quantidade da matéria-prima p processada na unidade industrial w no período t
 y^t_w = $\begin{cases} 1, & \text{se uma unidade esmagadora é instalada em } w \text{ no período } t \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases}$
 y^t_w = $\begin{cases} 1, & \text{se uma refinaria é instalada em } w \text{ no período } t \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases}$

O modelo matemático pode ser descrito pelas equações (2.23) a (2.48):

$$\begin{aligned}
 \text{Min} \sum_{p \in P} \sum_{(i,j) \in A} \sum_{t \in T} c^t_{pij} x^t_{pij} + \sum_{(i,j) \in A_i} \sum_{t \in T} f^t_{ij} (y^t_{ij} - y^{t-1}_{ij}) + \sum_{p \in MP} \sum_{w \in W} \sum_{t \in T} g^t_{pw} z^t_{pw} + \sum_{w \in W_1} \sum_{t \in T} G^t_w (y^t_w - y^{t-1}_w) \\
 + \sum_{w \in W_2} \sum_{t \in T} G^{t'}_w (y^{t'}_w - y^{t-1}_{w'}) + \sum_{l \in V_E} \sum_{t \in T} h^t_l s^t_l + \sum_{l \in V_E} \sum_{t \in T} H^t_l (Y^t_l - Y^{t-1}_l)
 \end{aligned} \quad (6.23)$$

Sujeito a:

$$\sum_{j \in V|(i,j) \in A_0} x^t_{pij} \leq a^t_i \quad p = \mathbf{G}, \forall i \in V_0, \forall t \in T \quad (6.24)$$

$$\sum_{i \in V|(i,j) \in A_b} x^t_{pij} \leq d^t_{pj} \quad \forall p \in P, \forall j \in V_D, \forall t \in T \quad (6.25)$$

$$s^{t-1}_{pw} + \sum_{i \in V|(i,w) \in A} x^t_{piw} = s^t_{pw} + z^t_{pw} \quad p = \mathbf{G}, \forall w \in W_1 \cup W_3, \forall t \in T \quad (6.26)$$

$$s^{t-1}_{qw} + \alpha_q z^t_{pw} = s^t_{qw} + \sum_{j \in V|(w,j) \in A} x^t_{qwj} \quad p = \mathbf{G}, q = \mathbf{F}, \forall w \in W_1 \cup W_3, \forall t \in T \quad (6.27)$$

$$s^{t-1}_{qw} + \alpha_q z^t_{pw} = s^t_{qw} + \sum_{j \in V|(w,j) \in A} x^t_{qwj} \quad p = \mathbf{G}, q = \mathbf{B}, \forall w \in W_1, \forall t \in T \quad (6.28)$$

$$s^{t-1}_{pw} + \sum_{i \in V|(i,w) \in A} x^t_{piw} = s^t_{pw} + z^t_{pw} \quad p = \mathbf{B}, \forall w \in W_2, \forall t \in T \quad (6.29)$$

$$s_{qw}^{t-1} + \sum_{i \in V|(i,w) \in A} x_{qw}^t + \alpha_q z_{pw}^t = s_{qw}^t + \sum_{j \in V|(w,j) \in A} x_{qw}^t + z_{qw}^t \quad p = \mathbf{G}, q = \mathbf{B}, \forall w \in W_3, \forall t \in T \quad (6.30)$$

$$s_{qw}^{t-1} + \alpha_q z_{pw}^t = s_{qw}^t + \sum_{j \in V|(w,j) \in A} x_{qw}^t \quad p = \mathbf{B}, q = \mathbf{R}, \forall w \in W_2 \cup W_3, \forall t \in T \quad (6.31)$$

$$\sum_{i|(i,j) \in A} x_{ik}^i = \sum_{j|(i,j) \in A} x_{kj}^t \quad \forall p \in P, \forall l \in V_T, \forall t \in T \quad (6.32)$$

$$\sum_{i|(i,j) \in A_E} x_{il}^t + s_l^{t-1} = s_l^t + \sum_{j|(i,j) \in A_E} x_{ij}^t \quad \forall p \in P, \forall l \in V_E, \forall t \in T \quad (6.33)$$

$$x_{ij}^t \leq u_{ij} y_{ij}^t \quad \forall (i, j) \in A_T, \forall t \in T \quad (6.34)$$

$$s_l^t \leq v_l Y_l^t \quad \forall l \in V_E, \forall t \in T \quad (6.35)$$

$$z_{pw}^t \leq \lambda'_{pw} y_w'' \quad \forall p \in \mathbf{G}, \forall w \in W_1, \forall t \in T \quad (3.36)$$

$$z_{pw}^t \leq \lambda''_{pw} y_w''' \quad \forall p \in \mathbf{B}, \forall w \in W_3, \forall t \in T \quad (3.37)$$

$$z_{pw}^t \leq \lambda_{pw} \quad \forall p \in MP, \forall w \in W_3, \forall t \in T \quad (3.38)$$

$$y_{ij}^{t-1} \leq y_{ij}^t \quad \forall (i, j) \in A_T, \forall t \in T \quad (6.39)$$

$$Y_l^{t-1} \leq Y_l^t \quad \forall l \in V_E, \forall t \in T \quad (6.40)$$

$$y_w'' \leq y_w''^{t-1} \quad \forall w \in W_1, \forall t \in T \quad (6.41)$$

$$y_w''' \leq y_w'''^{t-1} \quad \forall w \in W_2, \forall t \in T \quad (6.42)$$

$$x_{ij}^t \geq 0 \quad \forall (i, j) \in A, \forall t \in T \quad (6.43)$$

$$s_l^t \geq 0 \quad \forall l \in V_E, \forall t \in T \quad (6.44)$$

$$y_{ij}^t \in \{0,1\} \quad \forall (i, j) \in A_T, \forall t \in T \quad (6.45)$$

$$Y_l^t \in \{0,1\} \quad \forall l \in V_E, \forall t \in T \quad (6.46)$$

$$y_w'' \in \{0,1\} \quad \forall w \in W_1, \forall t \in T \quad (6.47)$$

$$y_w''' \in \{0,1\} \quad \forall w \in W_2, \forall t \in T \quad (6.48)$$

A função objetivo (6.23) visa à minimização dos custos de transporte e transbordo, industrialização e armazenagem, além dos custos fixos em investimentos em terminais

intermodais, indústrias esmagadoras e de refino e armazéns gerais. Em (6.24) e (6.25) são feitos os balanços de oferta e demanda, enquanto que em (6.26) a (6.31) ocorre o balanço de massa para as matérias-primas e para os produtos derivados nas indústrias de esmagamento, de refino ou que oferecem os dois serviços. As restrições (6.32) fazem o balanço de massa nos vértices da rede de transporte, enquanto as restrições (6.33) se referem ao balanço de estoque da soja e seus derivados nos armazéns gerais. As restrições (6.34) e (6.35) servem para garantir que as capacidades nos terminais intermodais e armazéns sejam respeitadas, respectivamente, caso os mesmos tenham sido instalados. Caso contrário, as quantidades de soja transbordadas ou armazenadas devem ser nulas. As restrições (3.36) a (3.38) garantem as mesmas considerações, porém para as unidades que realizam esmagamento, refino ou ambas.

No caso das indústrias de esmagamento e refino, não há a variável de abertura de uma instalação, pela simplificação já comentada. Caso alguma unidade desse tipo seja candidata à instalação, deve-se em um mesmo local, considerar a instalação de uma esmagadora e também de uma refinaria. Caso uma fábrica do tipo W_3 seja aberta em algum período do horizonte de planejamento, ter-se-á, para um único local, as variáveis y_w'' e y_w''' simultaneamente iguais a 1. Também é necessário respeitar as capacidades de processamento de soja em grão e óleo bruto nas equações (3.36) e (3.37), respectivamente. As restrições (6.39) a (6.42) garantem que, uma vez abertos, os terminais intermodais, armazéns gerais, esmagadoras e refinarias devem permanecer em operação até o final do horizonte de planejamento, não podendo ser fechados. Em (6.43) a (6.48) são definidos os domínios das variáveis, sendo que as duas primeiras são não negativas e as quatro últimas, binárias.

O modelo de localização de terminais intermodais, armazéns gerais, esmagadoras e refinarias também é considerado NP-difícil, por ser uma extensão do modelo de localização de instalações com custos fixos (DASKIN, 1995). Na Tabela 6.3 são apresentados dados que exprimem o porte desse modelo, tais como o número de parâmetros, variáveis e restrições. Para o cálculo do número de restrições do problema foram desconsideradas as restrições de canalização e definição de domínio de variáveis, dadas pelas equações (6.34) a (6.48).

O modelo de localização de terminais intermodais, armazéns, esmagadoras e refinarias contempla a maior parte dos investimentos que as empresas que atuam na agroindústria da soja podem realizar. Quando se compara esse modelo de planejamento de capacidade aos modelos de planejamento de operações de curto prazo propostos no Capítulo 5, percebe-se que

esse modelo não contempla a possibilidade de investimentos em silos, tanques e armazéns. Normalmente, essas decisões podem ser tomadas num horizonte tático, dentro de um período anual, por exemplo. Primeiramente, são tomadas as decisões de investimento em armazenagem de forma agregada para todos os produtos, o que pode ser feito com a construção de um armazém geral. Depois, em um horizonte de planejamento menor, essa capacidade pode ser desagregada em cada local em que se deve investir, avaliando, de acordo com as demandas e fluxos de produtos no local, quais são os melhores capacidades para cada um dos tipos de unidades de armazenagem a serem construídas.

Tabela 6.3 – Porte do problema de planejamento do transporte intermodal da soja em grão

Parâmetros		$\tau(V_O + V_D + 2 V_E + A_T + A_I) + A_I + V_E + 8 W + \tau(2 W_1 + 2 W_2 + 2 W_3)$
Variáveis	Não Negativas	$\tau(V_E + A_T + 2 W)$
	Binárias	$\tau(V_E + A_I + W_1 + W_2)$
	Totais	$\tau(2 V_E + A_T + A_I + 2 W + W_1 + W_2)$
Restrições		$\tau(V_O + 4 V_D + 4 V_T + 4 V_E + 3 W_1 + 2 W_2 + 4 W_3)$

6.2.2 Localização de terminais intermodais, armazéns, esmagadoras e refinarias com alternativas discretas de investimento (Modelo 8)

Nesse caso, avaliam-se, por meio um conjunto de alternativas discretas, a intensidade de investimentos que devem ser feitos em terminais intermodais, esmagadoras, refinarias e armazéns gerais. Assim como no caso das empresas que atuam na exportação da soja, as empresas atuantes na agroindústria também podem se beneficiar dessa extensão como ferramenta de auxílio ao seu planejamento de capacidade. As modificações nos dados de entrada necessários à formulação do modelo são:

Conjuntos:

N_λ = Alternativas discretas de capacidade para as esmagadoras a serem instaladas

N_θ = Alternativas discretas de capacidade para as refinarias a serem instalados

Parâmetros:

- $G_{w\theta}''$ = Custo de instalar uma esmagadora no local w no período t segundo a alternativa θ de investimento (R\$)
- $G_{w\phi}''$ = Custo de instalar uma refinaria no local w no período t segundo a alternativa ϕ de investimento (R\$)
- $\lambda_{pw\theta}'$ = Capacidade de esmagamento de soja p na unidade industrial w , de acordo com a alternativa de investimento θ (t)
- $\lambda_{pw\phi}''$ = Capacidade de refino do óleo p na unidade industrial w , de acordo com a alternativa de investimento ϕ (t)

São definidas as seguintes variáveis adicionais:

- $Y_{w\theta}''$ = $\begin{cases} 1, & \text{se uma esmagadora considerando a alternativa } \theta \text{ é instalada em } w \text{ no período } t \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases}$
- $Y_{w\phi}'''$ = $\begin{cases} 1, & \text{se uma refinaria considerando a alternativa } \phi \text{ é instalada em } w \text{ no período } t \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases}$

O modelo matemático pode ser descrito pelas equações (6.49) a (6.57) a seguir, além de (6.15) a (6.22), (6.24) a (6.33), (6.38), (6.43) e (6.44) do modelo anterior:

$$\begin{aligned} \text{Min} \quad & \sum_{(i,j) \in A} \sum_{t \in T} c_{ij}^t x_{ij}^t + \sum_{(i,j) \notin A_T} \sum_{\alpha \in N_\alpha} \sum_{t \in T} f_{ij\alpha}^t (y_{ij\alpha}^t - y_{ij\alpha}^{t-1}) + \sum_{w \in W} \sum_{t \in T} g_{pw}^t z_{pw}^t + \sum_{w \in W_1} \sum_{\theta \in N_\theta} \sum_{t \in T} G_{w\theta}'' (Y_{w\theta}'' - Y_{w\theta}''^{t-1}) \\ & + \sum_{w \in W_2} \sum_{\phi \in N_\phi} \sum_{t \in T} G_{w\phi}''' (Y_{w\phi}''' - Y_{w\phi}'''^{t-1}) + \sum_{l \in V_E} \sum_{t \in T} h_{(1)l}^t s_l^t + \sum_{l \in V_E} \sum_{\beta \in N_\beta} \sum_{t \in T} F_{l\beta}^t (Y_{l\beta}^t - Y_{l\beta}^{t-1}) \end{aligned} \quad (6.49)$$

Sujeito a:

$$\sum_{j \in V(i,j) \in A_\phi} x_{pij}^t \leq a_i^t \quad p = \mathbf{G}, \forall i \in V_0, \forall t \in T \quad (6.24)$$

$$\sum_{i \in V|(i,j) \in A_p} x_{pij}^t \leq d_{pj}^t \quad \forall p \in P, \forall j \in V_D, \forall t \in T \quad (6.25)$$

$$s_{pw}^{t-1} + \sum_{i \in V|(i,w) \in A} x_{piw}^t = s_{pw}^t + z_{pw}^t \quad p = \mathbf{G}, \forall w \in W_1 \cup W_3, \forall t \in T \quad (6.26)$$

$$s_{qw}^{t-1} + \alpha_q z_{pw}^t = s_{qw}^t + \sum_{j \in V|(w,j) \in A} x_{qwj}^t \quad p = \mathbf{G}, q = \mathbf{F}, \forall w \in W_1 \cup W_3, \forall t \in T \quad (6.27)$$

$$s_{qw}^{t-1} + \alpha_q z_{pw}^t = s_{qw}^t + \sum_{j \in V|(w,j) \in A} x_{qwj}^t \quad p = \mathbf{G}, q = \mathbf{B}, \forall w \in W_1, \forall t \in T \quad (6.28)$$

$$s_{pw}^{t-1} + \sum_{i \in V|(i,w) \in A} x_{piw}^t = s_{pw}^t + z_{pw}^t \quad p = \mathbf{B}, \forall w \in W_2, \forall t \in T \quad (6.29)$$

$$s_{qw}^{t-1} + \sum_{i \in V|(i,w) \in A} x_{qiw}^t + \alpha_q z_{pw}^t = s_{qw}^t + \sum_{j \in V|(w,j) \in A} x_{qwj}^t + z_{qw}^t \quad p = \mathbf{G}, q = \mathbf{B}, \forall w \in W_3, \forall t \in T \quad (6.30)$$

$$s_{qw}^{t-1} + \alpha_q z_{pw}^t = s_{qw}^t + \sum_{j \in V|(w,j) \in A} x_{qwj}^t \quad p = \mathbf{B}, q = \mathbf{R}, \forall w \in W_2 \cup W_3, \forall t \in T \quad (6.31)$$

$$\sum_{i|(i,j) \in A} x_{ik}^i = \sum_{j|(i,j) \in A} x_{kj}^t \quad \forall p \in P, \forall l \in V_T, \forall t \in T \quad (6.32)$$

$$\sum_{i|(i,j) \in A_E} x_{il}^t + s_l^{t-1} = s_l^t + \sum_{j|(i,j) \in A_E} x_{ij}^t \quad \forall p \in P, \forall l \in V_E, \forall t \in T \quad (6.33)$$

$$x_{ij}^t \leq \sum_{\alpha \in N_\alpha} u_{ij\alpha} y_{ij\alpha}^t \quad \forall (i,j) \in A_T, \forall t \in T \quad (6.15)$$

$$s_l^t \leq \sum_{\beta \in N_\beta} v_{l\beta} Y_{l\beta}^t \quad \forall l \in V_E, \forall t \in T \quad (6.16)$$

$$z_{pw}^t \leq \sum_{\theta \in N_\theta} \lambda'_{pw\theta} \psi_{w\theta}^t \quad \forall p \in \mathbf{G}, \forall w \in W_1, \forall t \in T \quad (3.50)$$

$$z_{pw}^t \leq \sum_{\phi \in N_\phi} \lambda''_{pw\phi} \psi_{w\phi}^t \quad \forall p \in \mathbf{B}, \forall w \in W_3, \forall t \in T \quad (3.51)$$

$$z_{pw}^t \leq \lambda_{pw} \quad \forall p \in MP, \forall w \in W_3, \forall t \in T \quad (3.38)$$

$$\sum_{\alpha \in N_\alpha} y_{ij\alpha}^t \leq 1 \quad \forall (i,j) \in A_T, \forall t \in T \quad (6.17)$$

$$\sum_{\beta \in N_\beta} y_{ij\beta}^t \leq 1 \quad \forall l \in V_E, \forall t \in T \quad (6.18)$$

$$\sum_{\theta \in N_\theta} \psi_{w\theta}^t \leq 1 \quad \forall w \in W_1, \forall t \in T \quad (6.52)$$

$$\sum_{\phi \in N_\phi} \psi_{w\phi}^t \leq 1 \quad \forall w \in W_2, \forall t \in T \quad (6.53)$$

$$y_{ij\alpha}^{t-1} \leq y_{ij\alpha}^t \quad \forall (i, j) \in A_T, \forall t \in T \quad (6.19)$$

$$Y_{l\beta}^{t-1} \leq Y_{l\beta}^t \quad \forall l \in V_E, \forall t \in T \quad (6.20)$$

$$y_{w\theta}'' \leq y_{w\theta}''^{t-1} \quad \forall w \in W_1, \forall t \in T \quad (6.54)$$

$$y_{w\phi}''' \leq y_{w\phi}'''^{t-1} \quad \forall w \in W_2, \forall t \in T \quad (6.55)$$

$$x_{ij}^t \geq 0 \quad \forall (i, j) \in A, \forall t \in T \quad (6.43)$$

$$s_l^t \geq 0 \quad \forall l \in V_E, \forall t \in T \quad (6.44)$$

$$y_{ij\alpha}^t \in \{0,1\} \quad \forall \alpha \in N_\alpha, \forall (i, j) \in A_T, \forall t \in T \quad (6.21)$$

$$Y_{l\beta}^t \in \{0,1\} \quad \forall \beta \in N_\beta, \forall l \in V_E, \forall t \in T \quad (6.22)$$

$$y_{w\theta}'' \in \{0,1\} \quad \forall \theta \in N_\theta, \forall w \in W_1, \forall t \in T \quad (6.56)$$

$$y_{w\phi}''' \in \{0,1\} \quad \forall \phi \in N_\phi, \forall w \in W_2, \forall t \in T \quad (6.57)$$

A função objetivo (6.49) visa à minimização dos custos de transporte e transbordo, industrialização e armazenagem, além dos custos fixos em investimentos em terminais intermodais, indústrias esmagadoras e de refino e armazéns gerais. As restrições (6.50) e (6.51) servem para garantir que as capacidades nas esmagadoras e refinarias sejam respeitadas, de acordo com as alternativas de investimento selecionadas, respectivamente, caso os mesmos tenham sido instalados. Caso contrário, as quantidades de soja transbordadas ou armazenadas devem ser nulas. As restrições (6.52) e (6.53) garantem que no máximo uma alternativa discreta seja selecionada para a instalação de esmagadoras e refinarias, respectivamente. (6.54) e (6.55) garantem que, uma vez abertas, as esmagadoras e refinarias devem permanecer em operação até o final do horizonte de planejamento. Em (6.56) e (6.57) são definidos os domínios das variáveis binárias $y_{w\theta}''$ e $y_{w\phi}'''$, relacionadas à abertura de esmagadoras e refinarias.

O modelo de localização de terminais intermodais, armazéns gerais, esmagadoras e refinarias com alternativas discretas de investimento, assim como os demais modelos desse capítulo, também é considerado NP-difícil, por ser uma extensão do modelo de localização de instalações com custos fixos (DASKIN, 1995). Na Tabela 6.4 são apresentados dados que exprimem o porte desse modelo, tais como o número de parâmetros, variáveis e restrições. Para o

cálculo do número de restrições do problema foram desconsideradas as restrições de canalização e definição de domínio de variáveis, dadas pelas equações (6.19) a (6.22), (6.43) e (6.44), e (6.54) a (6.57).

Tabela 6.4 – Porte do problema de planejamento do transporte intermodal da soja em grão

Parâmetros		$\tau(V_O + V_D + 2 V_E + A_T + A_I) + A_I + V_E + 8 W + \tau(2 N_\theta \times W_1 + 2 N_\phi \times W_2 + 2 W_3)$
Variáveis	Não Negativas	$\tau(V_E + A_T + 2 W)$
	Binárias	$\tau(V_E + A_I + N_\theta \times W_1 + N_\phi \times W_2)$
	Totais	$\tau(2 V_E + A_T + A_I + 2 W + N_\theta \times W_1 + N_\phi \times W_2)$
Restrições		$\tau(V_O + 4 V_D + 4 V_T + 4 V_E + 3 W_1 + 2 W_2 + 4 W_3)$

6.3 Considerações Gerais

Neste capítulo foram propostos quatro modelos de localização de instalações para auxílio ao planejamento de capacidade de empresas que atuam no complexo agroindustrial da soja no Brasil. Esses modelos são úteis para determinação da melhor localização e dimensionamento de capacidade para terminais intermodais, armazéns, esmagadoras e refinarias, incluindo-se os casos em que se deseja avaliar conjuntos com diferentes alternativas discretas de investimento. Novamente, esses modelos são úteis tanto para empresas especializadas na exportação de soja quanto para as empresas que também atuam no mercado de produtos derivados. Assim como no capítulo anterior, várias premissas práticas foram incorporadas, tais como a natureza dinâmica do mercado de soja e do sistema de transportes brasileiro. Para capturar essas mudanças, os modelos de auxílio ao planejamento de capacidade também possuem um horizonte discretizado em períodos mensais, para auxiliar na determinação do ponto no tempo em que as instalações devem ser abertas.

Do ponto de vista de modelagem, esses modelos, assim como os de auxílio ao planejamento operacional, estão apoiados em teoria bastante consolidada, resultando em modelos de fluxos integrados com localização e dimensionamento de instalações. Todos eles também apresentam múltiplos modais de transporte e períodos de planejamento. Devido à sua relação com os modelos de localização de instalações com custos fixos, todos esses modelos são

considerados de difícil solução. Esses modelos também são considerados de grande porte e necessitam de grandes quantidades de dados, assim como os do capítulo anterior. Porém, os dados necessários à alimentação dos modelos de planejamento de capacidade são bastante agregados, devido ao foco em investimentos de longo prazo. Esses modelos estão voltados para as empresas que atuam no complexo agroindustrial da soja no Brasil, divididas entre as que exportam apenas a soja em grão e aquelas que participam do processo industrial da soja.

O modelo de localização de terminais intermodais e armazéns gerais está voltado aos interesses de empresas exportadoras de soja. Por ser o mais simples de todos, esse modelo apresenta como vantagem a possibilidade de rápida realização de estudos de cenários em que os locais e as capacidades de terminais intermodais e armazéns são avaliadas, podendo-se medir seus impactos nos custos de operação da empresa na nova rede. O segundo modelo acrescenta a possibilidade de avaliar simultaneamente conjuntos de alternativas discretas de investimento, novamente, em terminais intermodais e armazéns. O terceiro modelo, voltado aos investimentos de empresas que também atuam na produção de derivados da soja, contempla a possibilidade de se instalar indústrias de esmagamento e refino, além de terminais intermodais e armazéns. Essa possibilidade também contempla, além do estudo de cenários relativos aos investimentos, a avaliação do impacto das novas instalações nos custos de operação da empresa. O quarto e último modelo permite a avaliação de alternativas discretas de investimento em terminais intermodais, armazéns, esmagadoras e refinarias.

Esses modelos são inéditos na literatura relacionada ao agronegócio da soja no Brasil, por tratarem decisões relativas a empresas privadas, não possuindo foco governamental. Apesar dos terminais intermodais e armazéns, muitas vezes, fazerem parte dos investimentos públicos, essas instalações também podem fazer parte do investimento privado de empresas e cooperativas agroindustriais. O grau de realidade que esses modelos conseguem captar é muito amplo, abrangendo não só os diferentes tipos de investimentos que podem ser feitos, em terminais intermodais, armazéns, esmagadoras e refinarias, mas também capturando a sazonalidade da oferta de soja, que não está equilibrada com a demanda ao longo dos meses do ano.

Além disso, esses modelos são capazes de avaliar o melhor período para abertura de uma instalação ao longo de alguns anos, absorvendo características reais de crescimento de safra e demanda e a introdução de novas vias de transporte que possam entrar em operação

durante o horizonte considerado. Os custos avaliados podem ser relacionados a análises de valor presente de diversas soluções encontradas em estudos de cenários, muito comuns em horizontes de longo prazo. Devido a esse grau de realismo, todos os modelos podem ser considerados de grande porte, sendo dependentes de grandes quantidades de dados do sistema de transporte disponível, das safras e demandas previstas, além de custos, capacidades e possibilidades de investimento por parte da empresa.

Porém, ainda é possível pensar em algumas extensões possíveis para os modelos de planejamento de capacidade com alternativas discretas de investimento. Por exemplo, por simplicidade, considera-se que cada local candidato à instalação de um tipo de estrutura física tenha o mesmo número de alternativas discretas dos demais locais candidatos a estruturas do mesmo tipo, ou seja, se um local candidato à instalação de um terminal intermodal tiver 3 alternativas discretas de investimento, os demais candidatos a terminais intermodais também o terão. Mas os locais candidatos à instalação de armazéns podem contemplar apenas 2 alternativas, de forma que o tamanho do conjunto de alternativas é determinado pelo tipo de instalação. Para que cada local tenha seu número específico de candidatos, basta adicionar um índice referente ao local no conjunto de alternativas, de forma que um local **A**, candidato à instalação de uma esmagadora possa ter 4 alternativas diferentes de investimento, enquanto um outro local **B**, também candidato à instalação de uma esmagadora, tenha apenas 3.

Outra extensão de fácil implementação consiste na diferenciação dos custos de investimento ao longo do tempo, embora essas instalações geralmente tenham preços mais ou menos constantes no tempo, mas muitas vezes fortemente diferenciados pelo local escolhido. Uma terceira opção, ainda, poderia permitir a introdução de mais de uma instalação do mesmo tipo no mesmo local, de forma a permitir, por exemplo, a instalação de um armazém pequeno e um grande, considerando que um armazém com essas capacidades somadas poderia custar mais caro em termos de construção que os dois menores. Uma quarta opção poderia ser, ainda, a possibilidade de fechamento de terminais intermodais, armazéns e fábricas durante o horizonte de planejamento. Essa variação seria interessante, especialmente, quando fossem consideradas algumas décadas no horizonte de planejamento. Muitas vezes, uma dessas estruturas, ao longo do tempo, deixa de receber fluxo de soja ou de seus derivados. Vários motivos podem explicar essa mudança, como o surgimento de novas rotas de transporte que impulsionam esses produtos para outros locais, como ocorreu com o porto de Paranaguá, que teve seu fluxo desviado para o porto

de Santos. Ou ocorre a mudança de cultura local, como se pode citar a substituição das lavouras de soja por cana-de-açúcar, como ocorreu no Triângulo Mineiro e vem ocorrendo em Goiás, Mato Grosso e na Região Norte, ou ainda, pela ocorrência uma mudança brusca nos padrões de demanda. Esses modelos também foram implementados em uma linguagem de modelagem e foram aplicados para resolver problemas testes usando um *software* de otimização, estando os resultados reportados no Capítulo 7.

7 EXPERIMENTOS COMPUTACIONAIS COM OS MODELOS

O objetivo desse capítulo é a avaliação da aplicabilidade e do desempenho computacional dos modelos matemáticos de auxílio às decisões dos planejamentos operacional e estratégico na cadeia agroindustrial da soja no Brasil, propostos nos Capítulos 5 e 6. Para facilitar a identificação dos modelos durante as discussões a respeito dos testes realizados, neste e no próximo capítulo, serão utilizados números, ao invés dos nomes dados aos modelos. Embora seja bastante rotineiro atribuir siglas aos modelos, optou-se pela utilização dos números, pela clareza de notação. Os números utilizados para a identificação dos modelos, bem como as páginas em que as respectivas formulações se encontram são apresentados na Tabela 7.2.

Tabela 7.1 – Identificação dos modelos matemáticos utilizados nos testes

Identificação	Modelo	Página
Modelo 1	Planejamento do transporte intermodal da soja em grão	81
Modelo 2	Planejamento do transporte intermodal da soja em grão com economias de escala nos modais ferroviário e hidroviário fluvial	88
Modelo 3	Dimensionamento de lotes de produção e planejamento do transporte intermodal na agroindústria da soja	96
Modelo 4	Planejamento operacional no complexo agroindustrial da soja com alocação de estoques	106
Modelo 5	Localização de terminais intermodais e armazéns gerais	120
Modelo 6	Localização de terminais intermodais e armazéns gerais com alternativas discretas de investimento	124
Modelo 7	Localização de terminais intermodais, armazéns, esmagadoras e refinarias	129
Modelo 8	Localização de terminais intermodais, armazéns, esmagadoras e refinarias com alternativas discretas de investimento	134

Para ilustrar e verificar a aplicabilidade dos modelos propostos, inicialmente foram realizados experimentos utilizando exemplos ilustrativos, construídos para verificar a coerência

dos modelos. Os resultados obtidos são discutidos na Seção 7.1, que tem por finalidade destacar o potencial e a importância prática da aplicação desses modelos.

Em seguida foram realizados experimentos utilizando exemplos de tamanhos mais realistas, que são analisados nas Seções 7.2 e 7.3. Na Seção 7.2 são apresentados e discutidos os resultados referentes ao esforço computacional necessário à solução dos modelos de planejamento de curto prazo, utilizando dados obtidos de fontes secundárias e baseados em estudos anteriores da literatura. Na Seção 7.3 descreve-se o programa gerador de dados aleatórios, construído com a finalidade de construir exemplares para testes dos modelos de planejamento de capacidade, bem como os resultados obtidos nos experimentos realizados. A Seção 7.4 resume os principais resultados práticos e relativos ao desempenho computacional dos modelos testados.

Todos os testes foram realizados em um microcomputador Intel Core i7-2640M 2.80 GHz, com 6 GB de memória RAM, com sistema operacional Windows 7 Professional 2009 64 bits. O *software* de otimização utilizado foi o AMPL/CPLEX, versão 11.1 (FOURER et al., 2003) e o programa gerador de instâncias foi implementado na linguagem C++, com o compilador DEV C++ 4.9.9.1.

7.1 Experimentos com Exemplos Ilustrativos para Verificação dos Modelos

Para avaliar a consistência dos modelos propostos, foram realizados alguns experimentos com exemplos simplificados, em que o tamanho da rede e da empresa considerados foram reduzidos, para possibilitar a verificação dos códigos dos modelos, do manuseio dos dados e a análise dos resultados obtidos em diferentes experimentos. A rede considerada possui 2 vértices de oferta, 2 vértices de demanda, sendo um de demanda interna e um de demanda de exportação. A rede de transportes é composta por apenas 4 vértices, 2 terminais intermodais – um rodo-ferroviário e um rodo-hidroviário, e existe apenas um porto. A empresa representada possui 3 fábricas, sendo uma de cada tipo, além de um armazém, como mostrado na Figura 7.1. Considerou-se um horizonte de planejamento igual a 7 períodos.

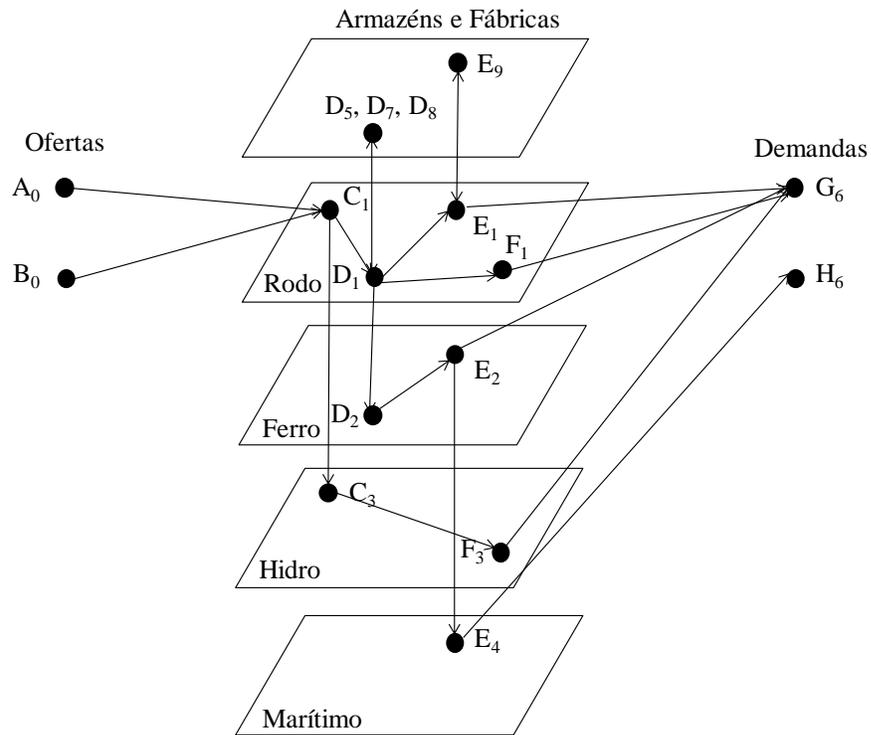


Figura 7.1 – Rede utilizada nos experimentos ilustrativos

7.1.1 Modelos 5 e 6

Para realização desses experimentos, nenhum dos terminais intermodais ou o porto foi considerado como instalado, sendo a mesma consideração feita para o armazém. Nos 7 meses de planejamento considerados, os dois vértices de demanda tiveram demandas constantes de 100 t de soja. As ofertas, no primeiro vértice de oferta se comportaram da mesma forma, mas no segundo vértice, teve suas distribuições alteradas para 900, 300, 200, 0, 0, 0, 0 t. A solução ótima encontrada para o Modelo 5 prevê a abertura de 2 terminais intermodais, em $D_1 \rightarrow D_2$ e $E_2 \rightarrow E_4$, a partir do 1º período e de um armazém, em D_5 , também no 1º período. Houve a formação de estoques em D_5 , nos valores de 400, 400, 400, 300, 200 e 100 t, também a partir do 1º período. Os fluxos de transporte e transbordos se concentraram nos seguintes arcos: $A_0 \rightarrow C_1$, $B_0 \rightarrow C_1$, $E_2 \rightarrow G_6$, $E_4 \rightarrow H_6$, $C_1 \rightarrow D_1$, $D_2 \rightarrow E_1$, $D_1 \rightarrow D_2$, $E_1 \rightarrow E_4$ e $D_5 \rightarrow D_1$. No caso do Modelo 6, foram acrescentadas 3 alternativas discretas de investimento, sendo que na solução ótima os terminais intermodais instalados foram de capacidade média, enquanto o armazém recebeu a maior capacidade possível.

7.1.2 Modelos 7 e 8

Nos Modelos 7 e 8, as decisões apoiadas dizem respeito às empresas que atuam sobre toda a cadeia agroindustrial, considerando também os processos de industrialização. Nos testes realizados, as ofertas foram mantidas como no exemplo anterior para a região de oferta A, enquanto a oferta B sofreu uma permutação de seus valores, da seguinte forma: 200, 300, 900, 0, 0, 0, 0 t. A demanda, assim como nos experimentos anteriores, foi mantida constante e homogênea entre as regiões de demanda. Para a soja em grão a demanda foi de 100 t, para o farelo de 78 t, para o óleo bruto de 10 t e para o óleo refinado, de 12 t, para cada região de oferta, em todos os períodos considerados. Na solução ótima para o Modelo 7, houve a abertura, conforme esperado de um armazém em D₅ a partir do 3º período. Como a fábrica, localizada em E₉, que oferece os serviços de esmagamento e refino iniciou os testes já em funcionamento, o modelo apontou a instalação apenas de uma esmagadora em D₇. Os terminais intermodais foram os mesmos dos experimentos anteriores. No Modelo 8, só houve a instalação de terminais intermodais, armazéns e fábricas de grande capacidade, dentre as 3 alternativas consideradas.

7.2 Resultados Obtidos com os Modelos de Planejamento de Curto Prazo

Os modelos de planejamento de curto prazo, descritos no Capítulo 5, estão voltados ao planejamento do transporte intermodal, à manutenção e à movimentação de estoques e ao dimensionamento dos lotes de produção nas fábricas disponíveis. Os dois primeiros modelos estão voltados às empresas dedicadas apenas à exportação de soja em grão, enquanto os dois últimos apoiam o planejamento operacional de empresas que também atuam no mercado de derivados da soja. O Modelo 1 é dedicado ao planejamento do transporte intermodal da soja em grão. O Modelo 2 inclui a consideração de economias de escala nos transportes ferroviário e hidroviário fluvial. O Modelo 3 faz o dimensionamento de lotes de produção e o planejamento do transporte intermodal na agroindústria da soja. O Modelo 4 acrescenta a alocação de granéis sólidos e líquidos aos silos e tanques, além da possibilidade de uso dos armazéns gerais disponíveis.

Como já foi dito, quando aplicados nas situações reais, esses modelos podem ser de grande porte e, à exceção do Modelo 1, os demais são em geral de difícil solução (NP-difíceis). É

interessante ressaltar que, nos Modelos 2 e 3, tem-se o mesmo número de variáveis binárias, que correspondem à atribuição dos custos côncavos lineares por partes, que representam as economias de escala nos modais ferroviário e hidroviário fluvial.

No Modelo 4, acrescentam-se ainda as variáveis binárias de alocação de grãos sólidos e líquidos aos silos e tanques. Como essas variáveis não estão relacionadas a custos de *setup* quando ocorre a mudança de produtos nos silos ou tanques, não possuem impacto na função objetivo. Dessa forma, tem-se que, para uma mesma empresa, os valores das funções objetivo dos Modelos 3 e 4 são os mesmos. Comparando-se esses resultados com os do Modelo 2, há o acréscimo dos custos de dimensionamento dos lotes de produção nas esmagadoras e refinarias.

Com base nessas informações, os testes de esforço computacional para os modelos operacionais foram realizados apenas com os Modelos 3 e 4. Devido à grande necessidade de dados para alimentar esses modelos e também à grande complexidade de informações relacionadas à rede de transporte e às empresas, não foi possível construir um gerador automático de exemplares para essa bateria de testes. Assim, os testes foram conduzidos utilizando-se problemas testes construídos com base em dados secundários e em informações de empresas do setor, de forma a construir exemplares realistas.

Foram realizados testes com períodos de planejamento variando de 30 a 60 dias, com intervalos incrementais de 5 dias. Esse horizonte de tempo, apesar de parecer longo para decisões de planejamento operacional, é condizente com o sistema de transporte brasileiro utilizado pelas empresas atuantes no agronegócio da soja, pois os tempos de viagem são relativamente longos para os arcos de ferrovias e hidrovias. Por exemplo, a viagem na hidrovia entre São Simão – GO e Pederneiras – SP dura 9 dias, enquanto algumas rotas entre as plantações e os portos podem durar até 25 dias.

7.2.1 Características dos exemplares utilizados nos testes dos modelos operacionais

Para a realização de testes com os modelos operacionais, utilizou-se uma rede obtida a partir do relatório do GEIPOT (2001), que descreve corredores de escoamento para a exportação de soja no Brasil. Na época, foram realizados levantamentos das principais rotas utilizadas no Brasil até o ano de 1999, com determinação das rotas de menor custo e previsão dos volumes

transportados por cada rota para os anos de 2000 e 2015. As cidades consideradas nos testes dessa seção encontram-se na Tabela 7.2, enquanto a rede de transporte é mostrada na Figura 7.2. São considerados 11 vértices de oferta, 9 de demanda, 4 indústrias e 12 terminais intermodais, dos quais 6 também funcionam como vértices de armazenagem. Alguns desses dados, como as indústrias, os armazéns e os vértices de demanda domésticas, isto é, de atendimento da demanda interna, foram acrescentados à rede original em GEIPOT (2001), que havia sido definida apenas em um contexto de minimização de custos de transporte de exportação de soja. Os vértices de oferta são CNP, NXA, PDL, RON, SOR, GOI, RVE, UBE, CGR, CDS e DOU. Os vértices de demanda externa incluem Rotterdam e Shanghai, enquanto as demandas domésticas se localizam em UBE, PGR, SSI, BOT, VIT, SAN e PAR.

As fábricas aqui consideradas se dividem em duas esmagadoras, localizadas em RVE e RON; uma refinaria, na cidade de UBE; além de uma indústria de esmagamento e refino, na cidade de PGR. Os terminais intermodais estão localizados nas cidades de XAM, EST, PVE, ATA, NXA, SSI, GOI, UBE, CDS, CGR, BOT, CAS e PGR, sendo que os terminais de ATA, SSI, UBE, CDS, BOT e PGR possuem instalações de estoque. Cada um dos locais de estoque pode ter de 2 a 3 silos e tanques, possuindo um armazém geral. São definidos 2 níveis de custos para a consideração de economias de escala. Os demais dados não serão aqui exibidos, mas é importante ressaltar que foram provenientes ou inspirados em informações de várias fontes secundárias, tais como IBGE (2012), ANTAQ (2009), ANTT (2009) e ABIOVE (2010).

7.2.2 Resultados dos experimentos com o Modelo 3

O porte dos exemplares utilizados nos testes com o Modelo 3 é apresentado na Tabela 7.3. A cada dia considerado no horizonte de planejamento, o número de variáveis binárias cresce $R(|A_2| + |A_3|)$, que é o número de opções de alternativas referentes à cobrança de custos de transporte de produtos nas diferentes combinações de trens e barcaças que trafegam nas ferrovias e hidrovias fluviais. Todos esses exemplares possuem porte compatível com o de empresas que atuam no agronegócio da soja no Brasil, em termos do número de variáveis binárias. Os resultados dos testes para esses problemas testes podem ser vistos na Tabela 7.4.

Tabela 7.2 – Nomes e siglas das localidades consideradas na cadeia agroindustrial

Sigla	Localidade	Sigla	Localidade
AAR	Alto Araguaia (MT)	NXA	Nova Xavantina (MT)
ATA	Alto Taquari (MT)	PAR	Paranaguá (PR)
BOT	Botucatu (SP)	PDL	Primavera do Leste (MT)
CAS	Cascavel (PR)	PGR	Ponta Grossa (PR)
CDS	Chapadão do Sul (MS)	RON	Rondonópolis (MT)
CGR	Campo Grande (MS)	RVE	Rio Verde (GO)
CNP	Campo Novo do Parecis (MT)	SAN	Santos (SP)
DOU	Dourados (MS)	SOR	Sorriso (MT)
EST	Estreito (MA)	SSI	São Simão (GO)
GOI	Goiânia (GO)	UBE	Uberlândia (MG)
ITC	Itacoatiara (AM)	VIT	Vitória (ES)
ITQ	Itaqui (MA)	XAM	Xambioá (TO)

É possível verificar que os tempos necessários à obtenção das soluções ótimas para todos os exemplares podem ser considerados aceitáveis para apoiar as decisões envolvidas em um contexto de planejamento de curto prazo. Nenhum dos testes ultrapassou 16 minutos de processamento total, incluindo os tempos utilizados para carregar o problema na memória, encontrar e provar a otimalidade da solução, além de escrever a solução encontrada em um arquivo de texto.

A segunda parte da tabela apresenta os resultados para os mesmos problemas, considerando a relaxação linear dos modelos de programação inteira mista, ou seja, as variáveis binárias tiveram suas restrições de integralidade relaxadas e seus domínios alterados para valores entre 0 e 1. Os tempos de processamento foram consideravelmente baixos, não chegando a 0,5 segundos em nenhum teste. Em relação à formulação original, os GAPs de otimalidade, dados por $\frac{(fo^* - fo_{RL}) \times 100\%}{fo^*}$, em que é fo^* a solução ótima do problema original e fo_{RL} é a solução ótima

do problema relaxado, foram muito pequenos, mostrando que o limite fornecido pela relaxação linear é bastante justo.

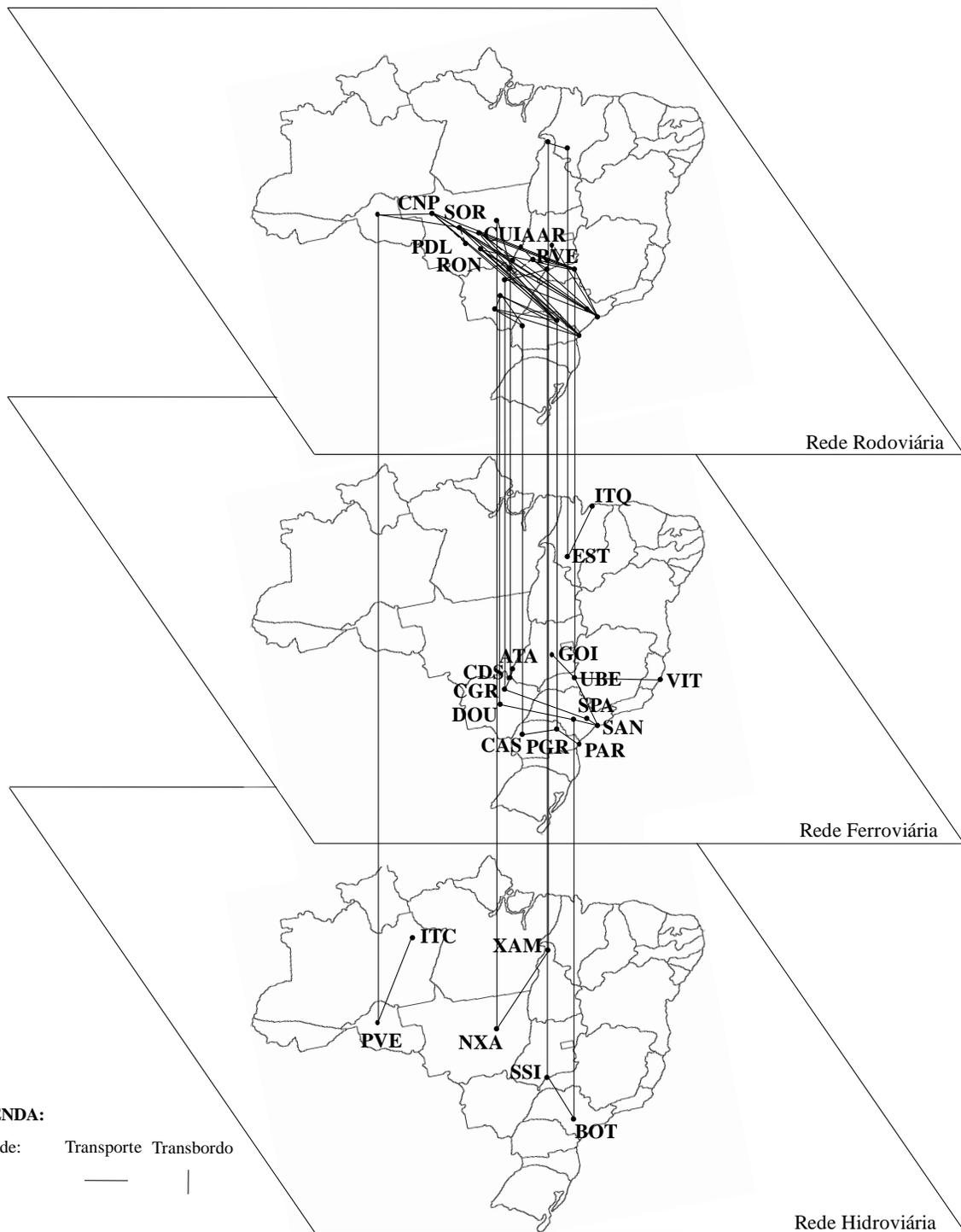


Figura 7.2 – Rede de transporte considerada nos testes com os modelos operacionais

Tabela 7.3 – Características dos exemplares do Modelo 3

Teste	Horizonte (dias)	Número de Variáveis			Número de Restrições
		Economias de Escala	Binárias	Totais	
9	30	720	720	22.620	7.527
10	35	840	840	26.390	8.782
11	40	960	960	30.160	10.036
12	45	1.080	1.080	33.930	11.291
13	50	1.200	1.200	37.700	12.545
14	55	1.320	1.320	41.470	13.800
15	60	1.440	1.440	45.240	15.055

Tabela 7.4 – Resultados obtidos para os testes com o Modelo 3

Teste	Horizonte (dias)	Função Objetivo (R\$)	Tempo (s)	Relaxação Linear		
				Tempo (s)	Função Objetivo (R\$)	GAP
9	30	3.061.240.834	8,425	0,167	3.047.910.579	0,435%
10	35	3.599.088.189	21,763	0,226	3.543.480.023	0,439%
11	40	3.916.275.050	36,528	0,251	3.898.269.479	0,460%
12	45	4.371.820.083	59,993	0,320	4.351.664.905	0,461%
13	50	4.690.511.482	241,129	0,413	4.666.260.658	0,517%
14	55	5.018.664.399	508,322	0,451	4.991.023.095	0,551%
15	60	5.393.406.380	919,513	0,483	5.363.760.364	0,550%

Outros experimentos computacionais foram realizados com o Modelo 3, a fim de determinar o crescimento do tempo de processamento com o aumento do número de variáveis binárias. Por simplicidade, os períodos foram novamente aumentados, em incrementos de 5 dias, como já havia sido mostrado anteriormente. Para um problema com 1.920 variáveis binárias, conseguidas com 80 dias de planejamento, o tempo necessário à obtenção da solução ótima foi de 24.343,463 s, o que ultrapassa 6 horas e 45 minutos de processamento. Com o acréscimo de 120 variáveis binárias, somando um total de 2.080 variáveis para o problema, o que representou 85 dias de planejamento, o *software* utilizado abortou o processamento após 8.157,261 s, ou cerca de 2 horas e meia, sem encontrar nenhuma solução inteira factível.

7.2.3 Resultados dos experimentos com o Modelo 4

Os experimentos com o Modelo 4 foram conduzidos com problemas testes baseados nos mesmos exemplares utilizados para o Modelo 3. Foram acrescentados silos e tanques aos locais de estoque, em quantidades diferentes para cada local. Esses dados foram inspirados em informações de empresas do setor, tais como Abiove (2012), Caramuru (2012) e Cargil (2012). A Tabela 7.5 descreve as características dos problemas resultantes dessas alterações. Agora, além das variáveis binárias utilizadas para representar as economias de escala que podem ser obtidas nos transportes ferroviário e hidroviário fluvial, existem variáveis binárias para representar a alocação de granéis sólidos aos silos e granéis líquidos aos tanques disponíveis nos locais em que pode haver estoque. Em comparação com o Modelo 3, os exemplares utilizados para teste do Modelo 4 são, significativamente, de maior porte. Se compararmos, por exemplo, os problemas referentes a 60 dias de planejamento, foram geradas 47,5% mais variáveis binárias, e 96,2% mais restrições.

Tabela 7.5 – Características dos exemplares-base do Modelo 4

Teste	Horizonte (dias)	Número de Variáveis				Número de Restrições
		Economias de Escala	Alocação	Binárias	Totais	
16	30	720	2.700	3.420	25.320	14.765
17	35	840	3.100	3.940	29.540	17.226
18	40	960	3.600	4.560	33.760	19.687
19	45	1.080	4.050	5.130	37.980	22.148
20	50	1.200	4.500	5.700	42.200	24.608
21	55	1.320	4.950	6.270	46.420	27.069
22	60	1.440	5.400	6.840	50.640	29.530

Os resultados obtidos para os exemplares da Tabela 7.5, que compõem o conjunto de exemplares-base para o Modelo 4, são apresentados na Tabela 7.6. Os tempos de processamento necessários à obtenção da solução ótima, mais uma vez, se apresentaram dentro de limites aceitáveis para análises de problemas de planejamento operacional. O maior problema, com 60 dias de planejamento, foi solucionado em 1.463,665 s, o que equivale a menos de meia hora. A segunda parte da tabela corresponde às relaxações lineares dos problemas teste. Como os valores das variáveis binárias não influenciam na avaliação da função objetivo, é possível observar que os valores encontrados para essa bateria de testes foram os mesmos daqueles observados para o Modelo 3. Os GAPs medidos também foram os mesmos, pois tanto os valores da função objetivo

do problema original quanto do problema relaxado são idênticos nos Modelos 3 e 4, apesar do aumento do número de variáveis binárias do problema.

Tabela 7.6 – Resultados obtidos para exemplares-base do Modelo 4

Teste	Horizonte (dias)	Função Objetivo (R\$)	Tempo (s)	Relaxação Linear		
				Tempo (s)	Função Objetivo (R\$)	GAP
16	30	3.061.240.834	16,288	0,207	3.047.910.579	0,435%
17	35	3.599.088.189	12,858	0,300	3.543.480.023	0,439%
18	40	3.916.275.050	31,268	0,304	3.898.269.479	0,460%
19	45	4.371.820.083	88,054	0,348	4.351.664.905	0,461%
20	50	4.690.511.482	481,610	0,604	4.666.260.658	0,517%
21	55	5.018.664.399	1.313,675	0,533	4.991.023.095	0,551%
22	60	5.393.406.380	1.463,665	0,581	5.363.760.161	0,550%

A partir desse conjunto de problemas, foram montados outros dois conjuntos de exemplares testes para o Modelo 4. No primeiro momento, o número de silos e de tanques no sistema foi dobrado, resultando em problemas com as características mostradas na Tabela 7.7. Em cada local em que existem estoques, o número total de silos e de tanques foi dobrado, mas a capacidade total, somando-se todos os silos ou todos os tanques, permaneceu inalterada. Note que o número de variáveis de economia de escala permanece inalterado, sendo dobradas apenas as variáveis de alocação. Os resultados para esses testes são apresentados na Tabela 7.8.

Pela observação dos tempos de processamento encontrados, mostrados na Tabela 7.8, é possível perceber que não houve aumento nos tempos de processamento para o problema original, mas uma pequena queda. Essa queda sugere que o aumento do número de silos e tanques leva a uma alocação mais fácil dos granéis sólidos nos silos e dos granéis líquidos nos tanques. Porém, ao se observarem os tempos de processamento do problema relaxado, observa-se um ligeiro aumento nos tempos de processamento. Esse aumento se deve ao aumento no porte do problema, expresso pelo aumento do número total de variáveis e de restrições.

Um terceiro conjunto de testes, adicionalmente, foi realizado para o Modelo 4. Esse conjunto de testes contempla o triplo de silos e de tanques dos exemplares-base, novamente, sem alteração na capacidade total de armazenagem. O porte desses exemplares é exibido na Tabela 7.9. Percebe-se, nesse caso, que até mesmo para o exemplar com 30 dias de planejamento, o número de variáveis binárias é bastante significativo, ficando próximo de 9.000.

Tabela 7.7 – Características dos exemplares com o dobro de silos e tanques no Modelo 4

Teste	Horizonte (dias)	Número de Variáveis				Número de Restrições
		Economias de Escala	Alocação	Binárias	Totais	
18	30	720	5.400	6.120	36.120	21.780
19	35	840	6.200	7.040	42.140	25.410
20	40	960	7.200	8.160	48.160	29.040
21	45	1.080	8.100	9.180	54.180	32.670
22	50	1.200	9.000	10.200	60.200	36.300
23	55	1.320	9.900	11.220	66.220	39.930
24	60	1.440	10.800	12.240	72.240	43.560

Tabela 7.8 – Resultados obtidos para exemplares com o dobro de silos e tanques no Modelo 4

Teste	Horizonte (dias)	Função Objetivo (R\$)	Tempo (s)	Relaxação Linear		
				Tempo (s)	Função Objetivo (R\$)	GAP
18	30	3.061.240.834	9,622	0,254	3.047.910.579	0,435%
19	35	3.599.088.189	16,387	0,342	3.543.480.023	0,439%
20	40	3.916.275.050	29,826	0,400	3.898.269.479	0,460%
21	45	4.371.820.083	85,608	0,483	4.351.664.905	0,461%
22	50	4.690.511.482	256,569	0,586	4.666.260.658	0,517%
23	55	5.018.664.399	273,545	0,615	4.991.023.095	0,551%
24	60	5.393.406.380	1.405,674	0,702	5.363.760.364	0,550%

Os resultados obtidos para essa bateria de testes se encontram na Tabela 7.10. Nota-se que ainda é possível resolver esses problemas em um tempo computacional aceitável, sempre inferior à uma hora. Nota-se também que houve aumento nos tempos de processamento nessa bateria de testes, tanto em relação aos exemplares-base quanto em relação àqueles que possuem o dobro de silos e tanques. Esse resultado sugere que o aumento do número de variáveis de alocação não pode, indefinidamente, tornar a alocação mais fácil. Em relação à relaxação linear do Modelo 4, observou-se o aumento progressivo do tempo necessário para a solução dos exemplares testados, devido ao aumento do porte dos problemas testes.

Outros testes foram realizados, explorando outros possíveis cenários para os problemas por meio de exemplares de maior porte, a fim de se verificar os limites de utilização do *software* de otimização e do computador para a obtenção da solução ótima desses problemas. Com a rede utilizada nos exemplares-base, o limite de resolução foi de 1.800 variáveis relacionadas às economias de escala e 6.750 variáveis de alocação, cuja solução ótima foi encontrada após 14.997,424 s de processamento. Nos testes a partir de 1.920 variáveis de economias de escala e

7.200 variáveis de alocação, o *software* abortou os testes por falta de memória, sem obter solução inteira factível. Com o dobro de silos e tanques, com 1.920 variáveis de economia de escala e 14.400 de alocação, a solução ótima foi obtida em 34.445,456 s. Com o triplo de silos e tanques, o *software* abortou o processamento sem solução inteira factível para 1.920 variáveis de economia de escala e 21.600 variáveis de alocação.

Tabela 7.9 – Características dos exemplares com o triplo de silos e tanques no Modelo 4

Teste	Horizonte (dias)	Número de Variáveis				Número de Restrições
		Economias de Escala	Alocação	Binárias	Totais	
25	30	720	8.100	8.820	44.220	28.795
26	35	840	9.300	10.140	51.590	33.594
27	40	960	10.800	11.760	58.960	38.393
28	45	1.080	12.150	13.230	66.330	43.193
29	50	1.200	13.500	14.700	73.700	47.992
30	55	1.320	14.850	16.170	81.070	52.791
31	60	1.440	16.200	17.640	88.440	57.590

Ao se observar os resultados obtidos para esses problemas, nota-se que existe uma hierarquia entre as decisões que são apoiadas pelos modelos de planejamento de curto prazo. Embora seja difícil ilustrar essa afirmação, devido à complexidade e porte das soluções que deveriam ser mostradas e analisadas em detalhes, as decisões de fluxo de transporte e industrialização se sobrepõem às decisões de estoque.

Tabela 7.10 – Resultados obtidos para exemplares com o triplo de silos e tanques no Modelo 4

Teste	Horizonte (dias)	Função Objetivo (R\$)	Tempo (s)	Relaxação Linear		
				Tempo (s)	Função Objetivo (R\$)	GAP
25	30	3.061.240.834	17,462	0,382	3.047.910.579	0,435%
26	35	3.599.088.189	29,961	0,433	3.543.480.023	0,439%
27	40	3.916.275.050	41,181	0,480	3.898.269.479	0,460%
28	45	4.371.820.083	144,339	0,633	4.351.664.905	0,461%
29	50	4.690.511.482	349,895	0,712	4.666.260.658	0,517%
30	55	5.018.664.399	2.276,973	0,749	4.991.023.095	0,551%
31	60	5.393.406.380	2.362,094	0,789	5.363.760.364	0,550%

Uma vez que os fluxos da soja e seus derivados sejam planejados para as vias de transporte e fábricas disponíveis, a alocação de estoques se torna um subproblema a ser resolvido

para cada um dos estoques presentes nesse caminho. As demais estruturas de estoques fora desse caminho são mantidas vazias para todos os períodos, a menos que não haja capacidade suficiente entre aqueles que se encontram nos vértices percorridos pelos fluxos de custo mínimo. Nesse caso, estoques podem ser alocados a outros estoques da rede.

Outro ponto importante em relação ao comportamento dos modelos operacionais é a possibilidade de se obterem soluções factíveis rapidamente. Por exemplo, para o Teste 16, a primeira solução inteira factível foi obtida no 95º nó da árvore de *branch-and-cut* do CPLEX. Essa primeira solução integral para o problema já é muito boa, com GAP de otimalidade menor que 0,01%. Esse mesmo comportamento se repetiu para todos os testes com os Modelos 3 e 4, mostrando que as primeiras soluções inteiras factíveis podem ser consideradas boas e demandam um esforço computacional relativamente pequeno para serem obtidas. Esse comportamento é bastante vantajoso em contextos operacionais, pois permite a avaliação rápida de diferentes cenários para o problema, por exemplo, caso ocorram mudanças na carteira de pedidos a serem atendidos ou haja necessidade de adiantamento de algum pedido já confirmado.

7.3. Experimentos com os Modelos de Planejamento de Capacidade

Os modelos de planejamento de capacidade, descritos no Capítulo 6, estão voltados ao planejamento de investimentos a serem feitos em novos terminais intermodais, armazéns, esmagadoras e refinarias. Os dois primeiros modelos estão voltados às empresas dedicadas apenas à exportação de soja, enquanto os dois últimos apoiam o planejamento estratégico de empresas que também atuam no mercado de derivados da soja. O Modelo 5, é dedicado à localização de terminais intermodais e armazéns. O Modelo 6 acrescenta um conjunto de alternativas discretas de investimentos a cada um dos candidatos a terminais intermodais e armazéns. O Modelo 7 considera também o investimento em esmagadoras e refinarias, além dos armazéns e terminais intermodais. O Modelo 8 contempla alternativas discretas de investimento ao Modelo 7. Conforme discutido no Capítulo 6, esses modelos são considerados de difícil solução, por serem variações do modelo de localização de instalações com custos fixos. Além disso, são em geral de grande escala nas situações práticas, sendo que o número de variáveis binárias varia com o aumento dos tipos de instalações a serem instaladas e com as quantidades de alternativas discretas consideradas.

Os testes realizados para todos os modelos foram feitos com exemplares construídos a partir de um gerador automático de exemplares aleatórios. Esse gerador foi desenvolvido em linguagem C++ e, a partir de distribuições uniformes de probabilidade. Foram criadas redes intermodais com as características descritas no Capítulo 4, além de dados de empresas com características realistas baseados em fontes secundárias, tais como ABIOVE (2012), Bünge (2012), Cargil (2012), IBGE (2012), SIFRECA (2012), dado o contexto do agronegócio da soja no Brasil. Depois disso, os dados dos exemplares foram gravados em arquivos de texto, já no formato adequado para leitura pelo AMPL/CPLEX. Devido à possibilidade de variação de várias características dos problemas gerados, foram realizadas baterias de teste para avaliação do comportamento dos modelos com o aumento do número de variáveis binárias dos exemplares e quando se consideram restrições mais apertadas de capacidade.

7.3.1 O gerador automático de exemplares

Os exemplares utilizados para teste dos modelos de investimento em capacidade foram gerados por um programa computacional construído para esse fim. O programa foi construído de forma que possam ser variados diversos parâmetros que caracterizam tanto a rede física como a empresa atuante no agronegócio da soja. A partir desse conjunto de parâmetros de entrada, o programa gera exemplares a partir de dados baseados em números aleatórios, para todos os modelos de planejamento de capacidade, ou seja, para o Modelo 5, o Modelo 6, o Modelo 7 e o Modelo 8. A Figura 7.3 ilustra resumidamente os principais passos para a construção de um exemplo. Para mais detalhes deste procedimento gerador, o Apêndice 1 mostra parte do código construído, que gera dados para um problema relacionado ao Modelo 8.

7.3.2 Características dos exemplares utilizados nos testes dos modelos estratégicos

Como o gerador automático de exemplares gera simultaneamente exemplos testes para os 4 modelos de planejamento de investimentos em capacidade, a partir de um dado conjunto de características determinadas pelo usuário, optou-se por realizar vários blocos de testes,

controlando-se algumas características. Primeiramente, foram realizados testes com exemplares de porte realista considerando algumas empresas brasileiras. Dessa forma, foram definidos problemas testes com variação nas seguintes características:

Início	
1	Sorteia localizações para os vértices de oferta, transporte e demanda no plano x,y
2	Calcula matriz de distâncias euclidianas entre todos os vértices do plano x,y
3	Para todos os vértices de transporte
4	Sorteia localizações de candidatos a terminais intermodais
5	Sorteia localizações de candidatos a armazéns
6	Sorteia localizações de candidatos a esmagadoras
7	Sorteia localizações de candidatos a refinarias
8	Sorteia localizações de indústrias que realizam esmagamento e refine
9	Calcula custos aleatoriamente, de acordo com os parâmetros fornecidos
10	Calcula capacidades aleatoriamente, de acordo com os parâmetros fornecidos
11	Escreve arquivos de dados
Fim	

Figura 7.3 – Passos principais para a construção de exemplares teste

- **Número de vértices de oferta e demanda:** foram variados de 10 em 10, partindo-se de 10 e chegando-se a 50. Essas quantidades de vértices de oferta e demanda são capazes de atender à realidade de empresas de pequeno até grande porte existentes no Brasil, em especial no caso das exportadoras de soja. As demandas foram divididas entre clientes domésticos e de exportação em todos os exemplares gerados;
- **Número de vértices intermediários:** o número de vértices intermediários está relacionado a uma série de características da rede e da empresa a ser representada, como já foi explicado no Capítulo 4. Em relação à rede de transporte, o número de vértices intermediários define o nível de vértices considerados em cada modal, além das possíveis ligações entre modais, que são os candidatos a terminais intermodais. Quanto maior o número de vértices intermediários considerados, maior também é a diversidade de possíveis localizações para armazéns, esmagadoras e refinarias. Para capturar

características de empresas de porte semelhante às empresas existentes no Brasil, o número de vértices intermediários também foi variado de 10 em 10, mas partindo-se de 30 e chegando-se a 50;

- **Períodos de planejamento:** o número de períodos de planejamento está relacionado ao tamanho do horizonte em que a empresa deseja investir em estrutura física, sendo comum o planejamento estratégico para alguns anos. Na primeira bateria de testes, dedicados à avaliação do esforço computacional necessário à resolução de problemas realistas, considerou-se um período de investimento de 3 anos, divididos em 36 meses;
- **Número de alternativas discretas de investimento:** o número de alternativas discretas define níveis de capacidade e de custos para investimento em terminais intermodais, armazéns, esmagadoras e refinarias. Apesar de esse número ser independente, para cada tipo de instalação a ser planejada, normalmente o número de opções considerado é pequeno para cada local candidato. Por isso, optou-se pela avaliação de 3 ou 5 alternativas para todos os tipos de instalação. É importante lembrar que os Modelos 5 e 7 são casos particulares dos Modelos 6 e 8, em que apenas uma alternativa de investimento é analisada.

Inicialmente, quatro conjuntos de testes, um para cada modelo, com as diversas combinações dessas variações de características foram conduzidos, sem grande preocupação com as restrições de capacidade para as instalações a serem planejadas. Nos modelos que contemplam alternativas discretas, a folga de capacidade se faz pela existência de pelo menos uma alternativa que apresente capacidades significativamente maiores que aquelas encontradas em empresas reais. Em seguida, a mesma variação de combinações referentes ao número de vértices de oferta e demanda, vértices intermediários e alternativas discretas, com o horizonte fixo em 36 meses, foi utilizada para gerar exemplares com restrições bastante apertadas de capacidade, obrigando à instalação de vários terminais intermodais, armazéns, esmagadoras e refinarias para o atendimento das demandas dadas.

Devido ao fato já mencionado dos Modelos 5 e 7 serem casos particulares dos Modelos 6 e 8, a variação de alternativas discretas não faz sentido. Nesses casos, os exemplares

gerados possuem, para cada candidato a localização de terminais intermodais, armazéns, esmagadoras e refinarias, apenas uma opção de custo de instalação e de capacidade. Dessa forma, ao se gerar problemas com 3 ou 5 alternativas discretas, os exemplares dos Modelos 5 e 7 apresentam diferenças na rede e na empresa gerada, devido à aleatoriedade de construção do problema, mas continuam possuindo apenas um candidato para cada tipo de instalação considerada, em cada local candidato. Os resultados obtidos para esses testes são apresentados nas subseções 7.3.3, 7.3.4, 7.3.5 e 7.3.6, dedicadas, respectivamente aos Modelos 5, 6, 7 e 8.

Outra bateria de testes foi realizada com o propósito de avaliar os limites de utilização do *software* de otimização e do computador utilizado para a resolução desses problemas. Nesses testes, os exemplares tiveram suas características principais variadas da seguinte forma:

- **Número de vértices de oferta e demanda:** 50 a 200 vértices de oferta e demanda, também divididos entre demanda doméstica e de exportação, variando-se de 50 em 50;
- **Número de vértices intermediários:** também variando de 50 a 200, de 50 em 50 vértices intermediários;
- **Períodos de planejamento:** 3 anos (36 meses), 4 anos (48 meses) e 5 anos (60 meses);
- **Número de alternativas discretas de investimento:** 5 ou 10 alternativas.

Os resultados para esses testes estão reportados na subseção 7.3.7.

7.3.3 Resultados dos experimentos com o Modelo 5

Os resultados obtidos nos experimentos realizados com o Modelo 5 são mostrados na Tabela 7.11. Para cada dimensão de rede, medida pela variação do número de vértices de oferta e demanda e de vértices intermediários, em um horizonte de planejamento de 36 meses, foram

criados quatro exemplares, totalizando 60 testes. Dois deles contêm restrições de capacidade folgada e dois contêm restrições apertadas de capacidade. Todos os testes foram concluídos em poucos segundos, sendo a solução ótima encontrada para todos os problemas. Não houve relação direta entre os tempos de processamento observados para os problemas com capacidades mais ou menos restritas. Devido à aleatoriedade na geração dos problemas testes, os desvios padrão dos tempos de execução são bastante altos quando comparados com os tempos médios de processamento.

Esses resultados sugerem que empresas que atuam na exportação de soja no Brasil podem fazer o uso de um *software* de otimização para resolver problemas reais de planejamento de investimento em capacidade, considerando períodos de investimento de 3 anos, ou 36 meses. Na prática dessas empresas, o número de locais candidatos à instalação de terminais intermodais é relativamente pequeno, existindo muito mais candidatos à instalação de armazéns gerais.

Tabela 7.11 – Resultados obtidos para os exemplares do Modelo 5

$V_o - V_d$	V_I	Testes	Função Objetivo Média (R\$)	Tempo Médio (s)	Desvio Padrão (s)
10	30	32, 33, 34 e 35	2.442.297.283	16,409	17,104
20		36, 37, 38 e 39	2.832.786.106	7,293	2,280
30		40, 41, 42 e 43	4.249.013.831	12,690	4,181
40		44, 45, 46 e 47	5.665.733.760	19,137	13,905
50		48, 49, 50 e 51	6.981.970.777	22,297	16,305
10	40	52, 53, 54 e 55	1.468.936.094	36,430	47,301
20		56, 57, 58 e 59	2.839.330.363	63,597	28,924
30		60, 61, 62 e 63	4.249.077.129	26,395	15,222
40		64, 65, 66 e 67	5.605.026.230	10,452	3,547
50		68, 69, 70 e 71	7.051.708.579	9,492	2,046
10	50	72, 73, 74 e 75	1.460.977.604	32,440	11,405
20		76, 77, 78 e 79	2.810.239.325	18,193	7,676
30		80, 81, 82 e 83	4.231.048.810	39,830	19,232
40		84, 85, 86 e 87	5.633.723.446	35,601	17,496
50		88, 89, 90 e 91	7.688.180.027	41,712	28,229

7.3.4 Resultados dos experimentos com o Modelo 6

Os testes realizados com o Modelo 6, da mesma forma como ocorreu para o Modelo 5, também incluíram exemplares com restrições de capacidade folgada e apertada. Foram testadas duas possibilidades de alternativas discretas de investimento em terminais intermodais e armazéns gerais: $N_\alpha = N_\beta = 3$ e $N_\alpha = N_\beta = 5$. A Tabela 7.12 mostra os resultados obtidos para 3 alternativas discretas de investimento. Na primeira parte da tabela, estão os resultados obtidos para os exemplares com capacidade folgada e na segunda parte, os exemplares de capacidade restrita.

Todos os testes foram resolvidos na otimalidade em um tempo computacional razoável, com média de 96,486 s. No pior caso, observado no Teste 120, a solução ótima foi encontrada em menos de 7 minutos de processamento. A média de tempo de resolução dos testes de capacidade folgada ficou em 61,543 s, com desvio padrão de 54,965 s. Já para os testes com capacidades restritas, o tempo médio de obtenção da solução ótima foi de 131,428 s, com desvio padrão de 120,264 s. Esses resultados sugerem que, para esses conjuntos de 3 alternativas discretas de investimento, a restrição das capacidades dos terminais intermodais e armazéns a serem instalados aumenta o tempo de processamento. Os tempos observados de resolução foram, em média, mais de duas vezes maiores para os exemplares com restrições de capacidade apertadas.

Tabela 7.12 – Resultados obtidos para os exemplares do Modelo 6 com 3 alternativas discretas

$V_o - V_d$	V_I	Capacidade Folgada			Capacidade Apertada		
		Teste	F. Objetivo (R\$)	Tempo (s)	Teste	F. Objetivo (R\$)	Tempo (s)
10	30	91	1.378.099.491	4,461	92	1.378.355.224	27,034
20		93	2.832.601.734	114,106	94	2.833.003.559	31,324
30		95	4.248.848.764	25,646	96	4.249.269.568	47,720
40		97	5.665.147.921	27,066	98	5.666.053.750	289,832
50		99	6.980.820.392	10,748	100	6.982.526.048	45,957
10	40	101	1.468.603.259	54,444	102	1.469.043.254	29,328
20		103	2.838.668.398	201,302	104	2.839.703.904	106,984
30		105	4.248.831.242	67,302	106	4.249.269.907	105,167
40		107	5.604.797.569	20,467	108	5.605.619.310	35,855
50		109	7.051.188.648	20,966	110	7.051.669.891	94,589
10	50	111	1.460.547.243	34,491	112	1.461.236.746	53,258
20		113	2.802.405.956	80,043	114	2.802.868.992	231,091
30		115	4.230.729.275	138,325	116	4.231.016.991	173,971
40		117	5.633.430.618	87,368	118	5.634.058.441	291,096
50		119	7.036.131.961	36,410	120	7.037.099.891	408,221

A Tabela 7.13 mostra os resultados obtidos para os testes do Modelo 6 com 5 alternativas discretas de investimento. Da mesma forma como no caso anterior, foram comparados os resultados para os exemplares de capacidade folgada e apertada. O tempo médio necessário à obtenção das soluções ótimas foi de 74,938 s, que é menor que o encontrado para os exemplares com apenas 3 alternativas discretas. O maior tempo de resolução observado também foi menor que na bateria anterior, sendo de 331,796 s, que é inferior a 6 minutos, no Teste 134. As diferenças entre os conjuntos com capacidade folgada e apertada também foram menores. O tempo médio, nos casos de capacidade folgada, para a resolução dos problemas foi de 56,305 s, com desvio padrão de 37,821 s, enquanto para os exemplares com capacidade restrita, a média foi de 93,572 s, com desvio padrão de 101,180 s.

Tabela 7.13 – Resultados obtidos para os exemplares do Modelo 6 com 5 alternativas discretas

$V_o - V_d$	V_I	Capacidade Folgada			Capacidade Apertada		
		Teste	F. Objetivo (R\$)	Tempo (s)	Teste	F. Objetivo (R\$)	Tempo (s)
10	30	121	1.378.098.028	10,608	122	1.378.350.467	35,848
20		123	2.832.590.363	13,182	124	2.833.001.773	283,561
30		125	4.248.845.978	21,776	126	4.249.268.915	116,142
40		127	5.665.150.410	40,916	128	5.666.043.919	19,234
50		129	6.980.820.435	14,329	130	6.982.518.424	19,515
10	40	131	1.468.599.214	68,952	132	1.469.034.003	16,707
20		133	2.838.644.834	113,591	134	2.839.708.228	331,796
30		135	4.248.830.818	91,634	136	4.249.252.294	21,840
40		137	5.604.805.563	61,292	138	5.605.611.307	32,182
50		139	7.051.186.054	29,842	140	7.051.672.612	211,957
10	50	141	1.460.545.756	37,408	142	1.461.231.646	41,511
20		143	2.802.405.883	105,783	144	2.802.858.154	35,380
30		145	4.230.720.210	118,419	146	4.231.016.263	73,025
40		147	5.633.422.337	78,421	148	5.634.047.333	79,302
50		149	7.036.124.463	38,422	150	7.037.078.402	85,578

Quando comparados aos testes com 3 alternativas de investimento, os problemas com 5 alternativas foram resolvidos de forma mais rápida pelo *software* de otimização, mas ainda dentro de um tempo razoável, não ultrapassando alguns minutos. Dessa forma, pode-se afirmar que para estudos de cenários envolvendo investimentos de empresas brasileiras que atuam na

exportação de soja, mesmo quando são consideradas alternativas discretas de investimento, podem ser resolvidos utilizando-se um *software* de otimização como o CPLEX ou similar. Como os tempos computacionais necessários à obtenção da solução ótima são relativamente baixos, não há muita motivação para a pesquisa de métodos de resolução aproximados para o problema, da mesma forma como para o Modelo 5.

7.3.5 Resultados dos experimentos com o Modelo 7

Durante a realização dos testes com o Modelo 7, o processamento do *software* de otimização foi interrompido após o tempo limite estipulado de 1 hora de processamento. Todos os testes, cujos resultados são mostrados na Tabela 7.14, foram abortados após esse tempo limite, sem provar a otimalidade da solução para nenhum dos exemplares testados. Como o Modelo 7 não contempla alternativas discretas, a bateria de testes realizadas contém exemplares de porte e características diferenciados somente em relação ao número de vértices de oferta e demanda e vértices de intermediários, sendo que todos os exemplares se referem ao planejamento em um horizonte de 36 meses de investimento.

Os resultados mostram que, apesar da solução ótima não ter sido encontrada, o GAP final obtido pelo *software* foi consideravelmente baixo, com exceção do Teste 156, que teve um GAP final de 12,2%. Ainda observando o Teste 156, verifica-se que o GAP inicial também foi alto, de 15,56%. Quando se consideram outros experimentos que tiveram GAPs iniciais altos, como o Teste 151, o Teste 158, o Teste 160 e o Teste 165, observa-se que houve efetiva redução de GAP até a parada do processamento após 1 hora, sendo os GAPs finais bastante razoáveis e alcançando, no máximo, 0,38%.

Quando se comparam esses resultados com a relaxação linear dos testes correspondentes, cujo resultado é reportado na Tabela 7.14, é possível verificar que bons limitantes inferiores podem ser obtidos para o valor da função objetivo desses exemplares em tempo computacional reduzido, poucas vezes ultrapassando 2 minutos de processamento. É importante frisar que os GAPs de relaxação linear, nessa tabela, não se referem à solução ótima, mas à melhor solução factível encontrada após 1 hora de processamento. Com exceção do Teste 156, os demais resultados foram bastante satisfatórios, com GAPs inferiores a 0,5%.

Tabela 7.14 – Características dos exemplares e resultados obtidos com o modelo 7

$V_o - V_d$	V_I	Teste	Função Objetivo (R\$)	GAP inicial	GAP final
10	30	151	1.100.083.471	11,830%	0,080%
20		152	2.256.530.864	0,140%	0,020%
30		153	3.389.814.182	0,100%	0,040%
40		154	4.533.637.757	0,210%	0,070%
50		155	5.591.017.759	0,270%	0,050%
10	40	156	1.334.584.405	15,560%	12,200%
20		157	2.264.013.127	0,070%	0,020%
30		158	3.395.361.454	8,180%	0,100%
40		159	4.476.148.577	0,240%	0,070%
50		160	5.652.969.976	5,870%	0,220%
10	50	161	1.163.273.253	1,810%	0,050%
20		162	2.234.886.647	0,200%	0,050%
30		163	3.378.728.179	2,970%	0,030%
40		164	4.500.477.473	1,800%	0,380%
50		165	5.631.022.738	5,730%	0,120%

Os resultados para os testes realizados com o Modelo 7 sugerem que o uso de *softwares* de otimização para a resolução de problemas de porte compatível com grande parte das empresas atuantes na agroindústria possui limitações. A primeira limitação está relacionada aos tempos necessários à obtenção de soluções ótimas, dado que uma hora não foi suficiente para a resolução de nenhum dos problemas teste na otimalidade. O segundo problema pode ocorrer com o abortamento do processamento do *software* de otimização por falta de memória, antes da obtenção de uma solução inteira factível. Isso ocorreu para o Teste 165, após 57.122,181 s, ou aproximadamente 15,87 horas de processamento.

Em relação à obtenção de soluções aproximadas, a relaxação linear é capaz de fornecer limitantes bastante justos, requerendo relativamente pouco esforço computacional. Para a resolução de testes com limitação do tempo de processamento, o comportamento observado nos testes sugere a possibilidade de se encontrar rapidamente boas soluções inteiras factíveis. Por exemplo, no caso do Teste 156, que foi o de pior desempenho nessa bateria de testes, o GAP final, de 12,318% é considerado alto, mas o mesmo não ocorreu nos demais casos. Dessa forma, a realização de um estudo de cenários poderia ser realizada com alguns dias de processamento, embora a construção de um método de resolução eficiente pudesse reduzir esse tempo e melhorar a qualidade das soluções geradas.

Tabela 7.15 – Relaxação linear dos testes com o Modelo 7

$V_o - V_d$	V_I	Teste	Função Objetivo (R\$)	GAP RL	Tempo RL (s)
10	30	151	1.097.940.646	0,195%	33,649
20		152	2.254.598.694	0,086%	29,078
30		153	3.386.583.408	0,095%	43,633
40		154	4.528.343.209	0,117%	48,765
50		155	5.585.639.113	0,096%	59,061
10	40	156	1.170.192.124	12,318%	54,397
20		157	2.262.113.528	0,084%	58,874
30		158	3.389.551.293	0,171%	68,156
40		159	4.471.017.475	0,115%	70,699
50		160	5.637.626.074	0,271%	67,548
10	50	161	1.161.397.894	0,161%	80,745
20		162	2.231.995.724	0,129%	128,981
30		163	3.376.188.603	0,075%	130,431
40		164	4.480.897.402	0,435%	198,307
50		165	5.621.895.054	0,162%	198,307

7.3.6 Resultados dos experimentos com o Modelo 8

Os experimentos realizados com o Modelo 8 contemplam variações no porte da rede e das empresas analisadas, do número de alternativas discretas de investimento em terminais intermodais, armazéns, esmagadoras e refinarias, mas mantendo-se um horizonte de 36 meses. O número de alternativas foi considerado o mesmo para todos os tipos de instalações e fixado em 3 ou 5 alternativas. Novamente, os tempos de processamento do *software* de otimização utilizado foi limitado em 1 hora. Assim como no caso do Modelo 7, todos os experimentos com o Modelo 8 foram abortados após esse tempo sem encontrar a solução ótima dos problemas teste.

Os resultados dos testes realizados com 3 alternativas de investimento são mostrados nas Tabelas 7.15 e 7.16. Observa-se que, apesar do GAP inicial ser considerado alto em alguns casos, com valores superiores a 5%, todos os GAPs obtidos após uma hora de processamento são considerados baixos, com valores até 0,05%. Os resultados obtidos para a relaxação linear do problema, mostrados na Tabela 7.16, também são considerados bastante satisfatórios. Os GAPs, que nesse caso são referentes à melhor solução inteira encontrada em 1 hora, possuem valores de

até 0,076%. Os tempos de processamento também são razoavelmente pequenos, não chegando a 2,5 minutos.

Tabela 7.16 – Resultados obtidos com o Modelo 8 com 3 alternativas discretas e após 1 hora de processamento

$V_o - V_d$	V_I	Teste	Função Objetivo (R\$)	GAP Inicial	GAP Final
10	30	166	1.098.176.714	0,07%	0,02%
20		167	2.257.650.674	3,74%	0,05%
30		168	3.389.283.638	0,03%	0,01%
40		169	4.526.319.642	0,04%	0,02%
50		170	5.586.762.089	2,18%	0,01%
10	40	171	1.170.148.064	4,25%	0,02%
20		172	2.261.270.999	7,29%	0,02%
30		173	3.392.157.634	5,13%	0,03%
40		174	4.475.859.846	2,90%	0,02%
50		175	5.635.253.712	5,82%	0,01%
10	50	176	1.162.445.919	12,11%	0,02%
20		177	2.232.757.156	4,73%	0,03%
30		178	3.376.864.340	9,91%	0,01%
40		179	4.482.598.998	1,83%	0,01%
50		180	4.482.603.134	1,83%	0,01%

Os resultados obtidos para a relaxação linear dos problemas também foram bastante satisfatórios, obtendo GAPs em relação à melhor solução inteira factível conhecida, de até 0,042%. Os tempos de processamento, embora se iniciem com valores muito próximos aos da Tabela 7.16, dos testes com 5 alternativas discretas, cresce mais rapidamente, terminando com valores 2 vezes maiores ou mais que no caso da consideração de 3 alternativas de investimento. Como os Testes 190 e 191 não resultaram na obtenção de uma solução inteira factível, não foi possível medir o GAP de relaxação linear para esses exemplares.

Por curiosidade, o Teste 195, o maior exemplar do Modelo 8, foi testado com diferentes limitações no tempo de processamento. Os testes foram abortados após 6 minutos, o que equivale a 10% do tempo já testado; com 12 minutos, isto é, 20% de uma hora e sem limitação do tempo de processamento. Em 6 minutos, nenhuma solução factível foi encontrada. Com 12 minutos, obteve-se uma solução com GAP de 3,64% do ótimo, sendo o valor da função objetivo de R\$ 5.838.852.968. Esse valor é 3,624% maior do que a melhor solução obtida em uma hora de

processamento. No caso sem limitação de tempo de processamento, o processamento foi abortado após 20.847,354 s, ou aproximadamente 5,79 horas, sem conseguir melhorar a solução obtida com 1 hora de processamento.

Quando se aumentou o número de alternativas discretas de investimento de 3 para 5, não se observaram grandes alterações nos resultados, como pode ser visto nas Tabelas 7.18 e 7.18. Na Tabela 7.18, dois testes foram abortados por falta de memória, sem obter solução inteira factível, o Teste 190 e o Teste 191. Nos demais testes, embora a solução ótima não tenha sido encontrada, os GAPs finais foram bastante baixos, não ultrapassando 0,03%, que é um pouco menor que o da bateria de testes anteriores, que ficou em 0,05%.

Os testes realizados com o Modelo 8 permitem afirmar que existem limitações no uso do *software* de otimização utilizado para resolver problemas de porte compatível com algumas das empresas atuantes na agroindústria da soja, da mesma forma como no caso do Modelo 7. O acréscimo de alternativas discretas de investimento, que constitui a diferença entre os Modelos 7 e 8, produziu GAPs finais menores que nos casos em que havia uma única opção de investimento para cada local candidato aos diferentes tipos de instalação consideradas.

Tabela 7.17 – Relaxação linear do Modelo 8 com 3 alternativas discretas

$V_o - V_d$	V_I	Teste	Função Objetivo (R\$)	GAP RL*	Tempo RL
10	30	166	1.097.371.464	0,073%	42,241
20		167	2.255.935.504	0,076%	52,152
30		168	3.388.308.828	0,029%	57,330
40		169	4.524.913.299	0,031%	89,044
50		170	5.585.756.911	0,018%	109,106
10	40	171	1.169.429.056	0,061%	70,792
20		172	2.260.424.925	0,037%	90,280
30		173	3.390.600.189	0,046%	121,093
40		174	4.474.160.014	0,038%	154,881
50		175	5.633.777.853	0,026%	157,173
10	50	176	1.161.638.750	0,069%	107,680
20		177	2.231.568.955	0,053%	198,644
30		178	3.375.875.680	0,029%	136,888
40		179	4.481.749.133	0,019%	131,390
50		180	4.481.749.133	0,019%	131,536

Apesar da impossibilidade de se obterem soluções ótimas dentro de 1 hora de processamento, a qualidade das soluções geradas foi promissora, com GAPs relativamente pequenos, tanto nos casos da limitação do tempo total de processamento quanto nos casos da relaxação linear. Devido aos GAPs reduzidos encontrados em todos os testes, podem-se utilizar essas abordagens em aplicações práticas. No entanto, os resultados mostram que essas soluções poderiam ser melhoradas com o uso de algum método de resolução que possibilitasse a obtenção de soluções de mesma qualidade, ou melhor, em menor tempo computacional.

Tabela 7.18 – Resultados obtidos com o Modelo 8 com 5 alternativas discretas e após 1 hora de processamento

$V_o - V_d$	V_I	Teste	Função Objetivo (R\$)	GAP Inicial	GAP Final	
10	30	181	1.097.899.199	0,040%	0,010%	
20		182	2.256.750.541	0,990%	0,020%	
30		183	3.388.806.282	3,490%	0,000%	
40		184	4.525.642.126	5,080%	0,010%	
50		185	5.586.555.963	0,040%	0,010%	
10	40	186	1.169.844.130	4,040%	0,010%	
20		187	2.260.869.729	3,100%	0,010%	
30		188	3.391.135.405	7,260%	0,010%	
40		189	4.474.816.788	0,030%	0,010%	
50		190	Abortado sem encontrar solução inteira factível.			
10	50	191	Abortado sem encontrar solução inteira factível.			
20		192	2.232.502.110	3,230%	0,030%	
30		193	3.376.444.781	2,570%	0,010%	
40		194	4.482.302.851	0,010%	0,010%	
50		195	5.627.272.183	3,640%	0,020%	

7.3.7 Resultados com exemplares de porte aumentado

Os experimentos realizados com os Modelos 5 a 8, cujos resultados foram mostrados nas subseções 7.3.3 a 7.3.6, utilizaram exemplares de porte compatível com grande parte das empresas que atuam na cadeia agroindustrial da soja no Brasil. Porém, algumas empresas podem apresentar redes de maior porte, principalmente no que se refere aos pontos a serem considerados na rede de transporte e armazenagem, devido à existência de muitos armazéns dispersos por várias

idades próximas às áreas de produção de soja. Com a finalidade de investigar e conhecer o comportamento computacional para esses casos, e também determinar portes limitantes no uso do *software* de otimização utilizado, foram realizados novos experimentos, com exemplares de porte aumentado em relação àqueles já testados.

Tabela 7.19 – Relaxação linear dos exemplares do Modelo 8 com 5 alternativas discretas de investimento

$V_o - V_d$	V_I	Teste	Função Objetivo (R\$)	GAP RL*	Tempo RL
10	30	181	1.097.371.463	0,048%	42,541
20		182	2.255.935.503	0,036%	60,060
30		183	3.388.308.828	0,015%	74,458
40		184	4.524.913.299	0,016%	85,940
50		185	5.585.756.911	0,014%	111,150
10	40	186	1.169.429.056	0,035%	77,048
20		187	2.260.849.523	0,001%	77,774
30		188	3.390.600.190	0,016%	78,499
40		189	4.474.160.015	0,015%	101,088
50		190	5.633.777.852	-	90,355
10	50	191	1.161.638.749	-	189,541
20		192	2.231.568.957	0,042%	244,102
30		193	3.375.875.680	0,017%	271,388
40		194	4.481.749.131	0,012%	271,397
50		195	5.626.371.819	0,016%	364,043

Para essa bateria de testes, o número de vértices de oferta e demanda, assim como os vértices intermediários, receberam valores de 50 a 250, com incrementos de 50 vértices. O horizonte de planejamento considerado variou entre 36, 48 e 60 meses. O número de alternativas discretas de investimento também foi o mesmo para todos os tipos de instalações, mas variou nos testes entre 5 e 10 alternativas. Para todos os modelos estratégicos, a bateria de testes foi abortada antes do fim das variações propostas para o crescimento da rede, devido à falta de memória para carregar os problemas, a partir de algum tamanho testado.

Os resultados obtidos nos testes do Modelo 5 são mostrados nas Tabelas 7.20, 7.21 e 7.22. Na Tabela 7.20, têm-se as características do problema e o *status* retornado pelo *software*. Nessa bateria de testes, a solução ótima foi encontrada para os quatro primeiros exemplares, sendo o limitante a rede com 100 vértices de oferta, 100 vértices de demanda, 100 vértices intermediários

e horizonte de planejamento de 3 anos. Nos casos em que o *status* é de aborto de processamento por falta de memória, nenhuma solução inteira factível foi encontrada. A partir do momento em que não houve memória suficiente para carregar o problema, os testes foram abandonados, o que ocorreu a partir de 150 vértices de oferta, demanda e intermediários, com horizonte de planejamento de 5 anos.

Tabela 7.20 – Características e *status* retornado pelo *software* nos testes com o Modelo 5

$V_o - V_d$	V_I	T	Teste	Status
50	50	36	196	Solução ótima encontrada
50	50	48	197	Solução ótima encontrada
50	50	60	198	Solução ótima encontrada
100	100	36	199	Solução ótima encontrada
100	100	48	200	Abortado por falta de memória
100	100	60	201	Abortado por falta de memória
150	150	36	202	Abortado por falta de memória
150	150	48	203	Abortado por falta de memória
150	150	60	204	Não carregado na memória

A Tabela 7.21 ilustra o porte do problema em termos do número de variáveis e restrições, após o tratamento pelo *presolver* do *software* utilizado. Em todos os casos, considerando todos os modelos e exemplares, o *presolver* não eliminou nenhuma restrição, somente uma porcentagem bastante reduzida do número de variáveis. É possível perceber que, apesar da bateria de testes ter sido iniciada com exemplares de porte compatível com a realidade de várias empresas, nem sempre consideradas de grande porte, o número de variáveis binárias já foi bastante elevado. A título de curiosidade, o tamanho do arquivo de dados também foi exibido, como uma medida do crescimento do número de parâmetros necessários à alimentação dos modelos. O maior arquivo de dados gerado, cujo problema não pôde ser carregado na memória, chegou quase a 500 MB, que é um tamanho considerado exagerado para um arquivo do tipo txt.

A Tabela 7.22 mostra os resultados obtidos para os testes do Modelo 5, incluindo aqueles relacionados à relaxação linear dos problemas. É possível perceber que, para os casos em que a solução ótima foi encontrada, os tempos de processamento ficaram baixos, não chegando a 1 minuto. Nos casos em que o processamento foi abortado por falta de memória antes de se obter uma solução inteira factível, o processamento também foi interrompido rapidamente. Os GAPs de relaxação linear, para os casos em que se conhece a solução ótima para o problema, foram muito

pequenos, estando o primeiro algarismo significativo na quarta ou quinta casa decimal. O processamento do problema relaxado também foi rápido, atingindo cerca de 8,7 minutos, no pior caso analisado.

Tabela 7.21 – Porte do problema e do arquivo de dados do Modelo 5

Teste	Variáveis Binárias	Total de Variáveis	Número de Restrições	Arquivo de Dados
196	14.544	293.292	31.168	3,120 MB
197	19.392	391.056	41.692	4,748 MB
198	24.240	488.820	52.216	5,886 MB
199	27.396	1.135.116	61.840	13,757 MB
200	36.528	1.513.452	82.719	18,082 MB
201	45.660	1.891.737	103.597	22,416 MB
202	43.020	2.555.658	92.783	30,904 MB
203	57.360	3.407.544	124.109	40,616 MB
204	-	-	-	50,305 MB

Os resultados obtidos para o Modelo 6 estão reportados nas Tabelas 7.23, 7.24 e 7.25. Com o aumento do porte do problema em relação ao Modelo 5, pela inclusão das alternativas discretas de investimento, o limite de obtenção da solução ótima foi reduzido em um nível da escala de crescimento dos exemplares. Nessa bateria de testes, os exemplares com 100 vértices de oferta, demanda e intermediários não puderam mais ser resolvidos, independente do horizonte de planejamento e do número de alternativas discretas consideradas. Porém, o limite de carregamento do problema na memória foi o mesmo do Modelo 5, mesmo com mais alternativas de investimento em terminais intermodais e armazéns.

Tabela 7.22 – Resultados obtidos nos testes com o Modelo 5

Teste	Tempo	Função Objetivo	Tempo RL	Função Objetivo RL	GAP RL
196	28,095 s	7.036.222.386	6,364 s	7.036.153.549	0,00098%
197	17,659 s	9.508.807.066	14,586 s	9.508.789.924	0,00018%
198	29,483 s	11.844.120.000	28,947 s	11.844.102.180	0,00015%
199	42,057 s	14.102.397.770	40,263 s	14.102.387.380	0,00007%
200	111,272 s	-	84,099 s	18.843.338.050	-
201	150,243 s	-	115,705 s	23.520.731.600	-
202	12,670 s	-	335,369 s	22.694.819.330	-
203	16,801 s	-	522,569 s	30.190.114.950	-
204	-	-	-	-	-

Tabela 7.23 – Características e *status* retornado pelo *software* nos testes com o Modelo 6

$V_o - V_d$	V_I	T	N_α, N_β	Teste	Status
50	50	36	5	205	Solução ótima encontrada
50	50	48	5	206	Solução ótima encontrada
50	50	60	5	207	Solução ótima encontrada
50	50	36	10	208	Solução ótima encontrada
50	50	48	10	209	Solução ótima encontrada
50	50	60	10	210	Solução ótima encontrada
100	100	36	5	211	Abortado por falta de memória
100	100	48	5	212	Abortado por falta de memória
100	100	60	5	213	Abortado por falta de memória
100	100	36	10	214	Abortado por falta de memória
100	100	48	10	215	Abortado por falta de memória
100	100	60	10	216	Abortado por falta de memória
150	150	36	5	217	Abortado por falta de memória
150	150	48	5	218	Abortado por falta de memória
150	150	60	5	219	Não carregado na memória

O porte dos exemplares testados, em termos do número de variáveis e restrições, bem como a aproximação da necessidade de dados ilustrada pelo tamanho do arquivo de parâmetros para alimentação dos modelos, é mostrado na Tabela 7.23. Quando se compara o limite de resolução dos Modelos 5 e 6 na otimalidade, verifica-se no caso do Modelo 6, que o número de variáveis binárias do Teste 210 é de 242.200, ao passo que para o Modelo 5, o maior exemplar resolvido foi o Teste 199, que contém 27.396 variáveis binárias. No que se refere ao número de variáveis totais, o Teste 199 apresenta 1.135.116 variáveis, contra 719.100 do Teste 210. No caso do Modelo 6, nenhuma solução inteira factível foi obtida para exemplares com mais de 1.000.000 de variáveis binárias.

Quando se observam os tempos de processamento dos exemplares testados, verifica-se que os tempos necessários à obtenção das soluções ótimas, quando isso é possível, são considerados bastante razoáveis para problemas de planejamento de investimento em capacidade, não chegando a 10 minutos, como mostrado na Tabela 7.24. Os limitantes fornecidos pela relaxação linear também são bastante justos. Os tempos de processamento foram baixos nos casos em que se obteve a solução ótima do problema, não chegando a 1 minuto. Na faixa de testes em que não se obteve solução inteira factível, esses tempos se elevaram, chegando a mais de meia hora, no último problema que pode ser carregado na memória, ou seja, para o Teste 218.

Tabela 7.24 – Porte do problema e do arquivo de dados do Modelo 6

Teste	Variáveis Binárias	Número de Variáveis	Número de Restrições	Arquivo de Dados
205	72.720	358.740	109.544	4,338 MB
206	96.960	478.320	146.732	5,685 MB
207	121.200	597.900	183.920	7,038 MB
208	145.440	431.460	180.244	5,229 MB
209	193.920	575.280	241.672	6,837 MB
210	242.400	719.100	303.100	8,451 MB
211	136.980	1.264.284	216.620	15,172 MB
212	182.640	1.686.252	290.719	19,933 MB
213	228.300	2.107.737	364.397	24,680 MB
214	273.960	1.407.852	356.200	16,908 MB
215	365.280	1.878.252	478.719	22,206 MB
216	456.600	2.347.737	600.397	27,473 MB
217	215.100	2.749.248	324.613	33,029 MB
218	286.800	3.665.664	434.809	43,379 MB
219	-	-	-	53,722 MB

Tabela 7.25 – Resultados obtidos nos testes com o Modelo 6

Teste	Tempo	Função Objetivo	Tempo RL	Função Objetivo RL	GAP RL
205	21,216 s	7.036.124.463	8,736 s	7.036.121.528	0,00004%
206	59,841 s	9.508.807.141	24,928 s	9.508.800.971	0,00006%
207	259,178 s	11.844.144.200	44,007 s	11.844.135.930	0,00007%
208	70,964 s	7.036.124.388	22,354 s	7.036.121.528	0,00004%
209	169,556 s	9.508.805.015	38,001 s	9.508.800.971	0,00004%
210	529,290 s	11.844.136.420	35,068 s	11.844.135.930	0,00000%
211	177,41 s	-	56,16 s	14.102.376.550	-
212	468,968 s	-	127,670 s	18.843.333.800	-
213	8,767 s	-	117,617 s	23.520.651.280	-
214	129,776 s	-	72,508 s	14.102.376.550	-
215	10,093 s	-	111,306 s	18.843.333.800	-
216	10,264 s	-	164,611 s	23.520.651.280	-
217	52,042 s	-	279,365 s	22.694.797.490	-
218	28,719 s	-	2.674,828 s	30.190.056.820	-
219	-	-	-	-	-

Os resultados para o Modelo 7 são mostrados nas Tabelas 7.26, 7.27 e 7.28. Pela Tabela 7.26 é possível perceber que a consideração das atividades de industrialização e a existência

de fluxos multiproduto, no caso das empresas que atuam sobre toda a cadeia agroindustrial da soja, restringem sobremaneira o porte dos problemas que podem ser tratados pelo *software* de otimização utilizado. Percebe-se que não foi possível encontrar solução inteira factível para nenhum exemplar de porte superior aos testados na subsecção 7.3.5. Também é possível perceber que o limite de carregamento desses problemas na memória do *software* foi muito limitado, tornando praticamente todos os problemas teste dessa subsecção, intratáveis computacionalmente.

Na Tabela 7.27, é possível perceber que o porte dos exemplares do Modelo 7 é significativamente maior do que os exemplares dos Modelos 5 e 6, considerando-se as mesmas características de entrada para o programa gerador de exemplares. Note que o Teste 220 já possui mais de 1.000.000 de variáveis, mesmo que só se tenham 16.344 variáveis binárias. O arquivo de dados do Teste 220 tem aproximadamente o triplo do tamanho do Teste 205, que tem as mesmas características de entrada para o gerador de exemplares, mas representa uma empresa que comercializa somente a soja em grão.

Tabela 7.26 – Características e *status* retornado pelo *software* nos testes com o Modelo 7

$V_o - V_d$	V_I	T	Teste	Status
50	50	36	220	Abortado após 1 h de processamento
50	50	48	221	Abortado por falta de memória
50	50	60	222	Abortado por falta de memória
100	100	36	223	Não carregado na memória

Tabela 7.27 – Porte do problema e do arquivo de dados do Modelo 7

Teste	Variáveis Binárias	Número de Variáveis	Número de Restrições	Arquivo de Dados
220	16.344	1.062.227	67.907	14,418 MB
221	21.792	1.416.335	90.743	18,999 MB
222	27.240	1.770.443	113.579	23,588 MB
223	-	-	-	55,104 MB

O único resultado obtido para os testes com o Modelo 7, reportado na Tabela 7.28, mostra que não foi possível obter a solução ótima para o problema em 1 hora de processamento. O GAP de relaxação linear, nesse caso, foi menor que 0,2% e o tempo necessário à sua obtenção foi de cerca de 5 minutos, o que pode ser considerado muito rápido, em relação ao processamento do problema original. Nos testes seguintes, Teste 221 e 222, o processamento foi abortado por falta de memória, sem que nenhuma solução factível tenha sido encontrada.

Tabela 7.28 – Resultados obtidos nos testes com o Modelo 7

Teste	Tempo	Função Objetivo	Tempo RL	Função Objetivo RL	GAP RL*
220	3612,016 s	5.631.022.738	295,214 s	5.621.895.054	0,16210%
221	494,103 s	-	322,202 s	7.590.043.329	-
222	907,905 s	-	473,800 s	9.472.136.618	-
223	-	-	-	-	-

Os resultados obtidos para o Modelo 8 são exibidos nas Tabelas 7.29, 7.30 e 7.31. Com o aumento do número de alternativas de investimento em terminais intermodais, armazéns, esmagadoras e refinarias, que ocorre na mudança entre os Modelos 7 e 8, os limites de resolução pelo *software* de otimização utilizado permanecem os mesmos. No primeiro teste, do mesmo porte dos exemplares da subseção 7.3.6, o processamento foi abortado após 1 hora de processamento. Mas, ao se aumentar apenas 1 ano no horizonte de planejamento, que é a diferença entre os Testes 224 e 225, o processamento é abortado por falta de memória, sem encontrar nenhuma solução factível. Ao se passar do Teste 227 para o Teste 228, não se tem mais memória suficiente para montar os problemas.

Tabela 7.29 – Características e *status* retornado pelo *software* nos testes com o Modelo 8

$V_o - V_d$	V_I	T	$N_\alpha, N_\beta, N_\theta, N_\phi$	Teste	Status
50	50	36	5	224	Abortado após 1 h de processamento
50	50	48	5	225	Abortado por falta de memória
50	50	60	5	226	Abortado por falta de memória
50	50	36	10	227	Abortado por falta de memória
50	50	48	10	228	Não carregado na memória

A Tabela 7.29 mostra que esses problemas são de grande porte, além de necessitarem de grandes necessidades de dados. A Tabela 7.30 mostra o resultado obtido para o Teste 224. Esse resultado, conforme já esperado, mostra que a relaxação linear produz uma boa aproximação para o Modelo 8, sendo obtida em tempo computacional bastante aceitável.

Os testes realizados com exemplares de porte aumentado acrescentam basicamente duas informações àquelas já obtidas em seções anteriores. Em relação aos Modelos 5 e 6, voltados às decisões estratégicas de empresas que atuam apenas na exportação da soja em grão, é possível perceber que antes de se atingir o limite de memória para uso do *software* de otimização, as

soluções ótimas para os exemplares testados puderam ser encontradas rapidamente. Esses limites se situam próximos de 50 vértices de oferta, demanda e de transporte. Em termos práticos, essa limitação possibilita o uso de *softwares* de otimização para auxílio ao planejamento estratégico de empresas de pequeno e médio porte. No caso de empresas de grande porte, que administram, por exemplo, armazéns em mais de 50 cidades, e que desejem avaliar investimento com um grande número de candidatos à localização de terminais intermodais e armazéns, ou em um horizonte de planejamento mais longo, o problema poderia ficar intratável computacionalmente.

Tabela 7.30 – Porte do problema e do arquivo de dados do Modelo 8

Teste	Variáveis Binárias	Número de Variáveis	Número de Restrições	Arquivo de Dados
224	81.720	1.143.875	165.683	15,318 MB
225	108.960	1.525.199	221.783	20,160 MB
226	136.200	1.906.523	277.883	25,018 MB
227	163.440	1.234.595	253.883	16,412 MB
228	-	-	-	21,575 MB

Tabela 7.31 – Resultados obtidos nos testes com o Modelo 8

Teste	Tempo	Função Objetivo	Tempo RL	Função Objetivo RL	GAP RL
224	3619,288 s	5.627.272.183	425,022 s	5.626.491.461	0,01387%
225	1223,617 s	-	726,77 s	7.585.770.595	-
226	794,782 s	-	1002,956 s	9.473.680.316	-
227	575,968 s	-	582,037 s	5.626.491.459	-
228	-	-	-	-	-

No que se refere aos Modelos 7 e 8, que apoiam decisões de investimento em infraestrutura de empresas que também atuam no mercado de derivados da soja, os limites em que os exemplares são computacionalmente tratáveis por um *software* de otimização são bem mais estreitos. Nos testes realizados, não foi possível identificar uma faixa de aumento do problema, em que se passa da obtenção de soluções ótimas para o abortamento do processamento do *software* de otimização sem encontrar solução inteira factível, depois do problema ter sido carregado na memória. Nos casos em que o problema é carregado na memória, não é possível encontrar a solução ótima em tempos inferiores a 1 hora, mas os GAPs de otimalidade das soluções obtidas são baixos, assim como da relaxação linear de todos os modelos.

7.4 Considerações Gerais

Neste capítulo, os modelos propostos nos Capítulos 5 e 6 foram testados computacionalmente. Primeiramente, foram executados testes com dados ilustrativos, a fim de se verificar a coerência e aplicabilidade dos mesmos. A partir daí, devido à falta de dados de fontes primárias dos sistemas reais, tornou-se necessário construir exemplares baseados em fontes secundárias de dados disponíveis, como as já citadas nesse capítulo, além de outras, referenciadas no Capítulo 3, para serem utilizados na construção dos exemplares. Duas abordagens foram utilizadas para a geração desses problemas testes. No caso dos modelos de planejamento operacional, devido às dificuldades de obtenção e à complexidade de dados, envolvendo informações bem desagregadas, tais como tempos de viagens para os modais de transporte e de processamento nas indústrias, optou-se pela construção de cenários a partir de dados secundários. A partir de um sistema de escoamento da soja em grãos, analisado anteriormente em GEIPOT (2001), outros dados foram acrescentados, com base em informações de diversas fontes, que incluem órgãos governamentais, empresas do setor e outras pesquisas já realizadas na área. Já no caso dos modelos de planejamento de investimento em capacidade, optou-se pela construção de um gerador automático de exemplares baseados em dados realistas sorteados a partir de distribuições de probabilidade uniformes. Essa abordagem permite maior flexibilidade e velocidade na construção de exemplares, a partir da variação de diversas características da rede de transporte e da empresa que se deseja representar.

A condução dos testes foi organizada de acordo com a geração de exemplares, de forma incremental para os modelos, dentro de cada contexto de planejamento, operacional ou estratégico. Embora algumas características tenham sido variadas, tais como tamanho da rede, número de instalações da empresa, níveis de restrição de capacidade, número de alternativas discretas a serem avaliadas e tamanho do horizonte considerado, a bateria de testes realizados não foi tão ampla quanto seria desejável. O principal fator que dificultou a realização de uma experimentação mais completa foi a própria complexidade dos problemas tratados. Com um número muito grande de características que poderiam ser controladas, torna-se complicado realizar um projeto de experimentos, com análise fatorial, por exemplo, mesmo utilizando técnicas de blocagem.

No entanto, os resultados obtidos com os testes realizados apontam para alguns comportamentos bastante interessantes desses modelos. Primeiramente, se verificou que todos os modelos podem ser de grande porte em situações reais, sendo apontados os limites em que ocorreram interrupções do processamento do *software* de otimização por falta de memória computacional ou de casos em que foi impossível carregar o problema na memória do computador utilizado. Nos casos em que soluções inteiras factíveis foram encontradas, normalmente o GAP de optimalidade foi baixo, alcançando valores inferiores a 0,1% já nos primeiros nós da árvore de busca do método *branch-and-cut*. A relaxação linear do problema forneceu limitantes inferiores bastante justos para todos os modelos, sendo obtidos em tempo computacional bastante reduzido.

Como perspectivas para pesquisa futura, a realização desses testes sugere que o desenvolvimento de métodos e estratégias de resolução específicos para esses problemas, poderiam ampliar os limites de obtenção de boas soluções inteiras factíveis para os exemplares, em tempo computacional aceitável na prática. Nos casos em que soluções factíveis, porém não ótimas fossem obtidas, o uso destes métodos e estratégias especificamente desenvolvidos poderiam refinar essas soluções, também com menor tempo de processamento. A realização de novos testes, com exemplares divididos em categorias, como por exemplo, variando-se as proporções entre o número de elementos nos conjuntos de vértices de oferta e demanda, de arcos de terminais intermodais, armazéns, esmagadoras e refinarias, poderia levar à descrição de características de comportamento computacional mais específicas. Assim, poderia ser possível identificar padrões para problemas de mais fácil ou difícil solução, dentro do universo de combinações de dados, uma vez que nenhum padrão de comportamento dessa natureza foi particularmente identificado nos experimentos realizados. Diante dessas perspectivas, foram desenvolvidas duas heurísticas de programação inteira a saber: *relax-and-fix* e *fix-and-optimize*, cujos fundamentos e resultados encontrados são descritos no Capítulo 8, a seguir.

8. MÉTODOS DE RESOLUÇÃO

O objetivo desse capítulo é a proposta de métodos de resolução para os modelos de planejamento estratégico, que foram formulados no Capítulo 6, mais especificamente para os Modelos 7 e 8. Esses modelos são considerados NP-difíceis, por estarem baseados no modelo de localização de instalações com custos fixos (DASKIN, 1995). Além disso, esses modelos podem ser considerados de grande porte na prática, apresentando fluxos multiproduto e multiperíodo em uma rede de transportes intermodal. Como foi visto no Capítulo 7, a avaliação de desempenho computacional desses modelos, embora baseada em uma bateria de testes limitada, mostrou que os tempos computacionais requeridos para a obtenção de soluções ótimas são altos. Adicionalmente, em muitos casos, o processamento foi abortado por falta de memória computacional para os cálculos do algoritmo *branch-and-cut*, ou mesmo para o carregamento do problema.

Sendo assim, neste capítulo são desenvolvidas duas heurísticas baseadas em programação inteira mista, *relax-and-fix* e *fix-and-optimize*, com a finalidade de se obter boas soluções para esses problemas em tempo computacional aceitável, em torno de 1 hora de processamento, como nos experimentos com o *software* de otimização; e, ainda, de se obterem soluções factíveis para os problemas em que não se obteve solução com o uso do *software* utilizado. Na Seção 8.1, discute-se brevemente a realização de estudos relacionados a métodos de resolução na literatura relacionada aos temas centrais desta tese, que são a modelagem do complexo agroindustrial da soja no Brasil, transporte intermodal e complexos de suprimento agro-alimentares. Na Seção 8.2, discute-se a heurística *relax-and-fix*, incluindo as estratégias desenvolvidas para a resolução dos exemplares dos Modelos 7 e 8. Na Seção 8.3, a heurística *fix-and-optimize* é discutida e a estratégia de implementação desenvolvida nesta tese é apresentada. A seguir, na Seção 8.4, os resultados obtidos com os experimentos realizados são discutidos, comparando-se as estratégias implementadas e em relação aos resultados do Capítulo 7. Os experimentos realizados, assim como no Capítulo 7, foram realizados para exemplares ilustrativos, de porte realista em relação às empresas atuantes no setor no Brasil, e de porte aumentado. Na Seção 8.5, conclui-se o capítulo, com os principais resultados e perspectivas ao uso das heurísticas *relax-and-fix* e *fix-and-optimize* para a resolução de problemas de investimento em capacidade, dados pelos Modelos 7 e 8.

8.1 Métodos de Resolução para Problemas no Complexo Agroindustrial da Soja no Brasil

Pouco se tem desenvolvido a respeito de métodos de resolução especificamente para o complexo agroindustrial da soja no Brasil. Todos os trabalhos relacionados, já citados no Capítulo 2, dizem respeito à modelagem de problemas. Como os casos estudados são, em geral, de pequeno porte, a sua resolução utilizando-se *softwares* de otimização é aceitável. Contudo, em casos de sistemas de grande porte, o desenvolvimento de métodos de resolução específicos para o problema pode ser interessante e recomendado. Em relação a toda a literatura revisada, quando se consideram os casos da modelagem de problemas de transporte intermodal e de complexos de suprimento agroindustriais de produtos não perecíveis, métodos de resolução específicos também são pouco frequentes.

Porém, é possível encontrar alguns exemplos, principalmente relacionados a problemas de transporte intermodal. Boardman et al. (1997), Arnold et al. (2004) e Groothed et al. (2005) propuseram heurísticas construtivas, baseadas em algoritmos de obtenção de caminhos mínimos para problemas de roteirização em redes de transporte intermodal, com exceção da Arnold et al. (2004), que estudaram um problema localização de terminais intermodais. Chang (2008), mais recentemente, propôs um método baseado em uma relaxação Lagrangeana para um problema de roteirização em uma rede de transporte intermodal internacional de exportação de monitores LCD.

Dessa forma, os métodos de resolução desenvolvidos para os modelos de auxílio ao planejamento estratégico de empresas atuantes no complexo agroindustrial da soja no Brasil estão baseados em estudos desenvolvidos para outras aplicações. Alguns trabalhos que podem ser consultados como referência à utilização da heurística *relax-and-fix* estão voltados à resolução de problemas de planejamento da produção. Por exemplo, têm-se Mercé e Fontan (2003), que abordaram o problema de dimensionamento de lotes monoestágio multi-item com limitações de capacidade e o problema de dimensionamento de lotes multiestágio com limitação de capacidade, que pode ser encontrado nos trabalhos de Stadtler (2003), Akartunali e Miller (2009) e Furlan (2011). Dentre os estudos voltados a aplicações específicas, destacam-se Araújo et al. (2008), aplicado a uma indústria de fundição; Ferreira et al. (2010), aplicado à indústria de bebidas; Toso et al. (2009), na indústria de ração animal; além de Santos e Almada-Lobo (2011), em uma indústria de papel e celulose. Para mais informações sobre a heurística *fix-and-optimize*, algumas

referências importantes são Sahling et al. (2009), Helber e Sahling (2010), James e Almada-Lobo (2010) e Santos e Almada-Lobo (2011).

8.2 A Heurística *Relax-and-Fix*

A heurística *relax-and-fix*, proposta por Pochet e Wolsey (2006), é um procedimento construtivo e iterativo, cuja ideia é, a cada passo, resolver um subproblema obtido a partir da decomposição do problema original com base em algum tipo de partição do conjunto de variáveis inteiras. Em cada passo, uma partição do conjunto de variáveis inteiras do problema é otimizada, enquanto as demais variáveis inteiras permanecem fixas ou são otimizadas de forma relaxada, utilizando limites lineares. As variáveis de partições já otimizadas devem ser fixadas nos valores encontrados na iteração correspondente, enquanto as variáveis de partições a serem otimizadas posteriormente devem ser relaxadas.

Considere o pseudocódigo mostrado na Figura 8.1, que constitui uma adaptação da proposta de Furlan (2011). Seja P o conjunto de todas as variáveis inteiras do problema. Uma partição P^n , $n = 1, 2, \dots, N$, desse conjunto é um subconjunto dessas variáveis, tal que $P = P^1 \cup P^2 \cup \dots \cup P^N$ e $P^1 \cap P^2 \cap \dots \cap P^N = \emptyset$. Na primeira iteração, resolve-se o problema de programação inteira mista (*MIP*) correspondente à primeira partição de variáveis inteiras MIP^1 , que contém as variáveis inteiras P^1 , enquanto as demais variáveis em $P^2 \cup \dots \cup P^N$ têm seus limites relaxados. Após a resolução do MIP^1 , que é limitada por um tempo máximo de processamento T_{\max} , as variáveis P^1 são fixadas no valor da solução encontrada, caso seja factível. Na segunda iteração, as variáveis P^2 são integralizadas, para que se resolva o MIP^2 , enquanto P^1 mantém seus valores fixados no passo anterior e as demais partições, $P^3 \cup \dots \cup P^N$, são mantidas relaxadas. A heurística segue, repetindo essa lógica, até que o conjunto P^N seja resolvido com suas variáveis consideradas inteiras. A solução do MIP^N é a solução da heurística, caso seja factível. Senão, não é possível encontrar uma solução para o *MIP* original correspondente, considerando a forma de particionamento utilizada para o conjunto das variáveis inteiras do problema.

Diversas estratégias de implementação computacional podem ser utilizadas para heurísticas do tipo *relax-and-fix*. Por exemplo, em relação ao fluxo iterativo, pode-se ter a iteração progressiva (*forward*), em que se parte da primeira para a última das partições consideradas. Ou, pode-se ter, também a iteração regressiva (*backward*), em que se processa da última para as primeiras partições consideradas. No que se refere às partições do conjunto de variáveis inteiras, P^n , também podem ser realizadas de várias formas, de acordo com o problema considerado. Alguns exemplos incluem partição por períodos de planejamento ou por tipos de variáveis de decisão. Pode-se, ainda, definir partições de sobreposição (*overlapping*), cujo princípio se constitui na definição de dois conjuntos de variáveis a terem seus domínios considerados inteiros a cada iteração, um de variáveis que devem ser apenas otimizadas e outro que deve ser fixada nos valores encontrados.

Início

- 1 Defina uma partição P^n , $n = 1, 2, \dots, N$
- 2 | Relaxe as restrições de integralidade de todas as variáveis binárias, definindo seus limitantes entre 0 e 1
- 3 Enquanto ($n < N$) e (MIP^n factível) faça
- 4 | $n = n + 1$
- 5 | Integralize novamente os domínios das variáveis do conjunto P^n
- 6 | Resolva o problema MIP^n com limite de tempo T_{\max}
- 7 | Fixe os valores inteiros encontrados para o conjunto de variáveis da partição P^n na solução encontrada
- 8 | Guarde a solução encontrada como solução inicial para o passo seguinte
- 9 Fim enquanto

Fim

Figura 8.1 – Pseudocódigo da heurística *relax-and-fix* implementada, adaptada de Furlan (2011)

Como já foi dito, algumas estratégias de partição podem gerar soluções infactíveis para os problemas MIP^n associados às partições P^n , $n = 1, 2, \dots, N$. Em alguns casos, como para os problemas de dimensionamentos de lote de produção e os próprios problemas estratégicos de investimento em terminais intermodais, armazéns, esmagadoras e refinarias formulados para empresas atuantes no complexo agroindustrial da soja no Brasil, a fixação apenas das variáveis inteiras, ou binárias quando for o caso, a cada passo, tornam a heurística mais flexível e pode garantir a geração de soluções factíveis. Isso ocorre porque, ao se fixar as variáveis binárias de

preparação de máquina, ou de abertura de instalações, por exemplo, mas não as variáveis não negativas relacionadas a outras decisões, como a formação de estoques, permite-se que sejam realizados ajustes que compatibilizam capacidade e demanda.

Nesta tese, inicialmente, foram implementadas 3 estratégias para a heurística *relax-and-fix*. Foram escolhidas 3 diferentes partições dos conjuntos de variáveis inteiras, todas orientadas por período de planejamento. Na primeira partição, os períodos considerados foram de 1 mês, o que corresponde a τ partições, ao longo do horizonte de planejamento considerado. Na segunda partição, os períodos de particionamento foram semestrais, resultando em $\tau/6$ partições ao todo. Na terceira e última partição considerada, os períodos foram agrupados em anos, resultando em $\tau/12$ partições. Cada uma dessas estratégias de particionamento foi implementada considerando o fluxo de iteração progressivo (*forward*) e regressivo (*backward*). A Figura 8.2 resume o planejamento dessas estratégias de implementação. Em todos os casos, apenas as variáveis inteiras dos problemas foram fixadas, deixando-se livres as variáveis não negativas, que incluem os fluxos de transporte e transbordo, o dimensionamento dos lotes de produção das esmagadoras e refinarias, e também as variáveis que controlam as quantidades de produtos em estoque.

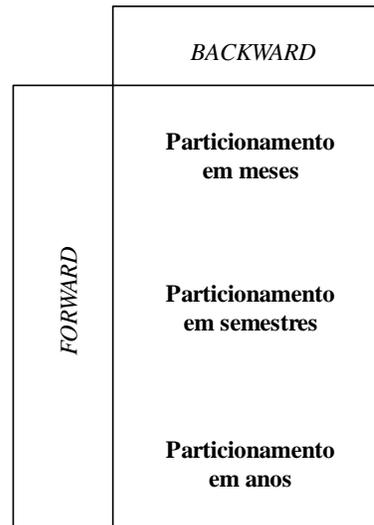


Figura 8.2 – Estratégias implementadas para a heurística *relax-and-fix*

Uma outra estratégia foi desenvolvida, a de partição com sobreposição (*overlapping*). Nessa estratégia, além de uma partição para integralização e fixação, a cada passo da heurística, é preciso definir também uma partição que será apenas integralizada, sendo seus valores dados como entrada apenas no passo seguinte, sem fixar os valores encontrados. Considere, por exemplo, a ilustração de fluxo *forward* com *overlapping* da Figura 8.3. Na iteração 1, as variáveis dos períodos $t = 1$ e $t = 2$ têm seus domínios considerados integrais no passo de resolução do MIP^1 . Se a solução encontrada for factível, as variáveis do período $t = 1$, em cinza, serão fixadas nos valores encontrados, mas não as do período $t = 2$, que terão seus valores dados como solução inicial para a iteração 2. Na iteração 2, as variáveis dos períodos $t = 2$ e $t = 3$ terão seus domínios integralizados para a resolução do problema MIP^2 . Se a solução for factível, as variáveis do período $t = 2$ terão seus valores fixados, mas não as do período $t = 3$, em branco, que terão seus valores considerados como iniciais para a iteração 3. E assim por diante.

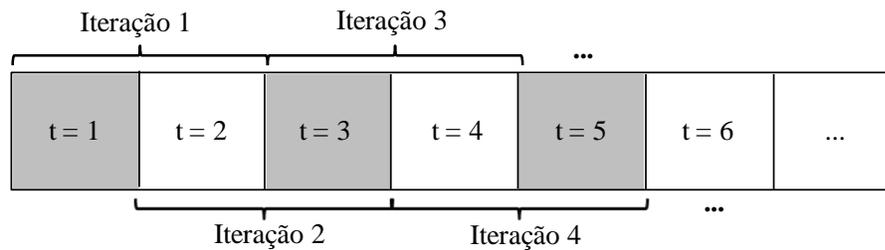


Figura 8.3 – Fluxo *forward* com *overlapping* para a heurística *relax-and-fix*

Por simplicidade, considerou-se apenas o caso em que essas partições possuem tamanhos iguais. A escolha do tamanho das partições foi decidida posteriormente à análise das 6 primeiras estratégias, de forma a aproveitar as informações obtidas pela avaliação das 6 primeiras estratégias definidas.

8.3 A Heurística *Fix-and-Optimize*

A heurística *fix-and-optimize*, proposta por Pochet e Wolsey (2006) e inicialmente chamada de *exchange*, foi usada inicialmente para melhoria de soluções geradas pela heurística *relax-and-fix*. A ideia básica da heurística é fixar conjuntos de variáveis inteiras em seus valores

correntes para tornar mais simples os subproblemas resultantes, pela redução do número de variáveis inteiras que devem ser otimizadas a cada passo.

O pseudocódigo da heurística *fix-and-optimize*, que também foi baseado na adaptação do trabalho de Furlan (2011), é mostrado na Figura 8.4. A partir de uma solução factível dada, o algoritmo inicia com a consideração desta solução como a melhor encontrada e a solução corrente, simultaneamente. Em seguida, a fixação dos valores das variáveis inteiras da partição P^1 considerada é desfeita e o problema é resolvido, mantendo-se os valores das variáveis das demais partições fixos. A partir daí, o algoritmo segue, iterativamente, otimizando cada uma das partições de variáveis inteiras do problema, mantendo-se a integralidade do domínio das variáveis da partição correspondente àquela iteração, enquanto os valores das variáveis inteiras fixados nos valores correntes, para as demais partições do problema. Se a solução gerada for melhor que a melhor solução encontrada, a melhor solução é atualizada. Senão, a solução corrente anterior é mantida. Feito isso, a partição de variáveis otimizada é fixada novamente.

```

Início
1 Melhor valor de solução = Valor da solução corrente = Valor da solução inicial
2 Fixa os valores das variáveis inteiras da Solução Corrente
3 Para (n de 1 até N, com passo 1) faça
4 |   Desfaz a fixação da partição corrente  $P^n$ 
5 |   Resolve o problema
6 |   Se (Valor da solução corrente < Valor da melhor solução) então
7 |   |   Melhor Solução = Solução Corrente
8 |   Senão
9 |   |   Solução Corrente = Melhor Solução
10 |   Fim se
11 |   Fixa novamente a partição  $P^n$  cuja fixação havia sido cancelada
12 Fim enquanto;
Fim.

```

Figura 8.4 – Pseudocódigo da heurística *fix-and-optimize implementada*, adaptado de Furlan (2011)

A heurística é encerrada quando todos os problemas gerados pelas partições P^n tiverem sido resolvidos, não sendo mais possível melhorar a solução encontrada. Diversas formas

de particionamento, da mesma forma como ocorre para a heurística *relax-and-fix*, podem ser feitos para a heurística *fix-and-optimize*. Nesta tese, optou-se pela fixação apenas das variáveis binárias, impedindo a fixação das variáveis de fluxo de transporte e transbordo, estoques e de dimensionamento de lotes nas esmagadoras e refinarias, o que poderia gerar infactibilidades entre períodos de planejamento, devido às restrições de capacidade consideradas. A partição das variáveis binárias foi feita por períodos, considerados de 2 em 2, com sobreposição entre os passos da heurística. Essa estratégia permite que, a cada iteração, o problema inteiro binário a ser resolvido seja bastante reduzido. Mas, ao mesmo tempo, a consideração de sobreposição de períodos a cada passo, permite que todas as relações de estoque e necessidade de abertura de instalações, existentes entre 2 períodos consecutivos, seja avaliada pela heurística. A Figura 8.5 ilustra o avanço dos passos da heurística *fix-and-optimize* implementada, mostrando como ocorre a sobreposição na otimização dos períodos, a cada iteração.

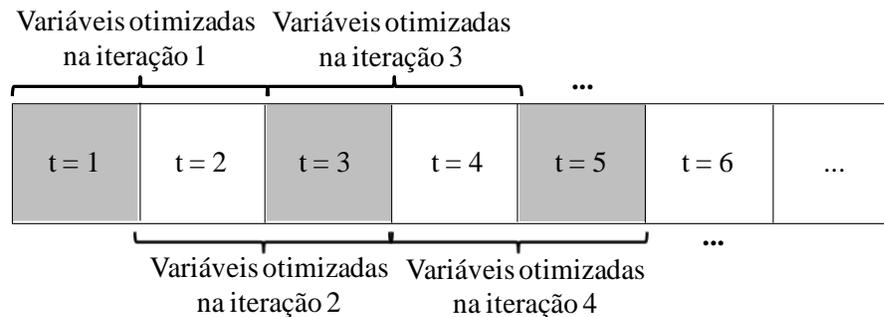


Figura 8.5 – Avanço da otimização dos períodos de planejamento na heurística *fix-and-optimize*

8.4 Resultados dos Experimentos

Da mesma forma como no Capítulo 7, os experimentos computacionais com os métodos de resolução também foram realizados para 3 conjuntos de exemplares. Primeiramente, foram utilizados exemplos ilustrativos, de forma que os cálculos pudessem ser acompanhados, passo a passo, a fim de verificar a consistência das heurísticas implementadas. A seguir, alguns exemplares de porte realista, utilizados no Capítulo 7, foram selecionados para uma etapa de calibração das estratégias implementadas para a heurística *relax-and-fix*.

A partir desses resultados, procedeu-se à avaliação de partição com *overlapping*, ainda para a heurística *relax-and-fix*, e à implementação da heurística *fix-and-optimize* com a estratégia que apresentou melhores resultados. Por último, exemplares de porte aumentado foram testados, primeiro com a heurística *relax-and-fix* e, em seguida, com a heurística *fix-and-optimize*, que recebeu a solução da primeira heurística como solução inicial. Os resultados obtidos são ilustrados nas subseções que se seguem, organizadas de acordo com o porte dos exemplares considerados.

8.4.1 Experimentos com Exemplares Ilustrativos

Para os exemplos ilustrativos, foram utilizados um exemplar do Modelo 7 e um exemplar do Modelo 8. Esses exemplares são bastante simples, contanto com 2 vértices de oferta; 2 vértices de demanda, sendo um de demanda interna e outro de demanda de exportação; 4 vértices na rede de transporte; 3 indústrias, distribuídas em uma esmagadora, uma refinaria e uma instalação que realiza esmagamento e refino, sendo que apenas a última inicia o horizonte de planejamento aberta, enquanto as duas primeiras são consideradas candidatas à instalação; 2 locais candidatos à instalação de armazéns e três candidatos a terminais intermodais. O horizonte de planejamento considerado foi de 7 meses, sendo que no Modelo 8 foram consideradas 3 alternativas discretas de capacidade e custos de instalação para cada tipo de instalação.

Os resultados obtidos nesses testes iniciais se mostraram consistentes, sendo possível encontrar a solução ótima para todos os quatro testes realizados. Nesse momento, para a heurística *relax-and-fix*, apenas a estratégia de partição por períodos de planejamento foi implementada, considerando-se tanto o fluxo iterativo *forward* quanto *backward*. Em ambos os casos, como o resultado para o Modelo 8, mostrados na Tabela 8.1, o valor da solução ótima foi encontrado rapidamente. Vale lembrar que apesar dos valores da solução ótima serem obtidos em iterações anteriores à última, esses resultados representam apenas limitantes inferiores para o problema, pois são resultados de partições em que ocorre a relaxação dos domínios das variáveis para as partições que serão otimizadas em iterações seguintes. Note que na estratégia de fluxo iterativo *forward*, a solução ótima para o problema é encontrada na terceira iteração da heurística. Isso ocorreu porque houve a abertura de um armazém nesse período de planejamento. Dessa forma, os custos anteriores a esse período são menores, porque os custos de instalação desse

armazém não haviam sido cobrados, bem como os custos relacionados ao seu uso. Quando se considera a estratégia *Backward*, em que o problema é particionado e resolvido a partir do último período de planejamento, a solução ótima foi encontrada na primeira iteração *relax-and-fix*.

Para os experimentos com a heurística *fix-and-optimize*, a solução, já ótima, encontrada pela heurística *relax-and-fix* não faz sentido como solução inicial, uma vez que não é possível melhorá-la. Uma solução inicial alternativa foi construída para que se pudesse verificar a coerência da heurística *fix-and-optimize*. Essa solução inicial, que pode ser considerada ruim, do ponto de vista prático, foi gerada ao se fixar todas as variáveis de instalação de todos os tipos de instalações candidatas – que incluem terminais intermodais, armazéns, esmagadoras e refinarias – em 1, a partir do primeiro período de planejamento. Em seguida, o modelo foi resolvido, para se determinar os valores das variáveis de fluxo de transporte e transbordo, estoque e dimensionamento de lotes de produção nas fábricas. No caso do Modelo 8, que possui um conjunto de alternativas discretas de capacidade e custos fixos para cada candidato, a opção fixada foi a da alternativa de maior capacidade e, conseqüentemente, custo de instalação. Mesmo nessas condições iniciais, foi possível encontrar a solução ótima para os quatro testes realizados.

Tabela 8.1 – Resultados da heurística *relax-and-fix* para os exemplares ilustrativos

Iteração da heurística	Estratégia <i>Forward</i>		Estratégia <i>Backward</i>	
	<i>t</i> Otimizado	Função Objetivo	<i>t</i> Otimizado	Função Objetivo
1	1	1.730.534	7	1.850.534
2	2	1.734.534	6	1.850.534
3	3	1.850.534	5	1.850.534
4	4	1.850.534	4	1.850.534
5	5	1.850.534	3	1.850.534
6	6	1.850.534	2	1.850.534
7	7	1.850.534	1	1.850.534

8.4.2 Experimentos com Exemplares de Porte Realista

Os exemplares de porte realista utilizados nessa bateria de testes foram selecionados a partir do conjunto de exemplares que foram testados no Capítulo 7. Foram selecionados 2 exemplares do Modelo 7 e 4 exemplares do Modelo 8. Em todos os casos, um

exemplar de GAP inicial alto e um de GAP inicial baixo foram escolhidos, sendo que no caso dos exemplares do Modelo 8, foram seleccionados 2 exemplares com 3 e ou 2 exemplares com 5 alternativas discretas de investimento. Os exemplares seleccionados foram o Teste 151, o Teste 157, o Teste 168, o Teste 176, o Teste 184 e o Teste 194. Mais informações sobre esses exemplares, tais como número de vértices da rede, número de períodos considerados e resultados obtidos nos testes com o software de otimização podem ser encontradas no Capítulo 7, na Seção 7.3, subsecções 7.3.5 e 7.3.6, respectivamente.

Os primeiros experimentos realizados tiveram como objetivo avaliar as estratégias implementadas para a heurística *relax-and-fix*. Cada um dos exemplares foi resolvido utilizando-se as seguintes estratégias: *forward* com partição por período, *backward* com partição por período, *forward* com partição por semestre, *backward* com partição por semestre, *forward* com partição por ano e *backward* com partição por ano. Os experimentos com as duas primeiras estratégias, *forward* e *backward* com partição por períodos não se mostraram promissores. Para todos os casos, a fim de se manter uma base de comparação com os experimentos do Capítulo 7, optou-se pela limitação do processamento das heurísticas em 1 hora. Dessa forma, os subproblemas gerados pelas partições por períodos deveriam ter que ser solucionados em até 100 s de processamento, para que fosse o possível resolver o problema para todas as 36 partições. Durante esse tempo de processamento, mesmo com os domínios das demais partições sendo relaxados, não foi possível a obtenção de uma solução factível. Nos testes realizados no Capítulo 7, para alguns dos exemplares dos Modelos 7 e 8, só foi possível encontrar a primeira solução inteira factível após 10 minutos de processamento.

Os resultados das outras quatro estratégias implementadas são mostrados na Figura 8.6. Em cada gráfico, se tem para cada um dos exemplares seleccionados, os valores das funções objetivo encontrados com cada uma das estratégias. Em todos os casos, a estratégia que gerou os piores resultados foi a *forward* com partição por semestre e a que gerou melhores resultados foi a estratégia *backward* com partição por ano. Os desempenhos intermediários variaram de um teste para outro, como era esperado, pela variabilidade dos dados considerados. Em geral, a partição por semestres foi menos efetiva que a partição por anos, enquanto o fluxo iterativo *backward* mostrou desempenho superior ao *forward*.

A partir desses resultados, a heurística *relax-and-fix* com *overlapping* foi testada apenas para a estratégia *backward* com partição por ano, por esta ter se mostrado mais eficiente

para os problemas considerados. Os resultados obtidos para essa bateria de testes estão reportados na Tabela 8.2. Os exemplares do Modelo 7 não puderam ser resolvidos, pois os experimentos foram abortados após o tempo limite de processamento do *software* de otimização para cada partição, sem conseguir encontrar uma solução inteira factível para o subproblema referente à primeira partição. Inicialmente, esse tempo foi definido como 1.200 s, de forma que três partições, uma para cada ano de planejamento, pudessem ser resolvidos em 1 h. Depois, esse tempo foi aumentado para 1.600 s, também sem que o *software* conseguisse encontrar uma solução factível nesse período de tempo, tanto para o Teste 151 como para o Teste 157.

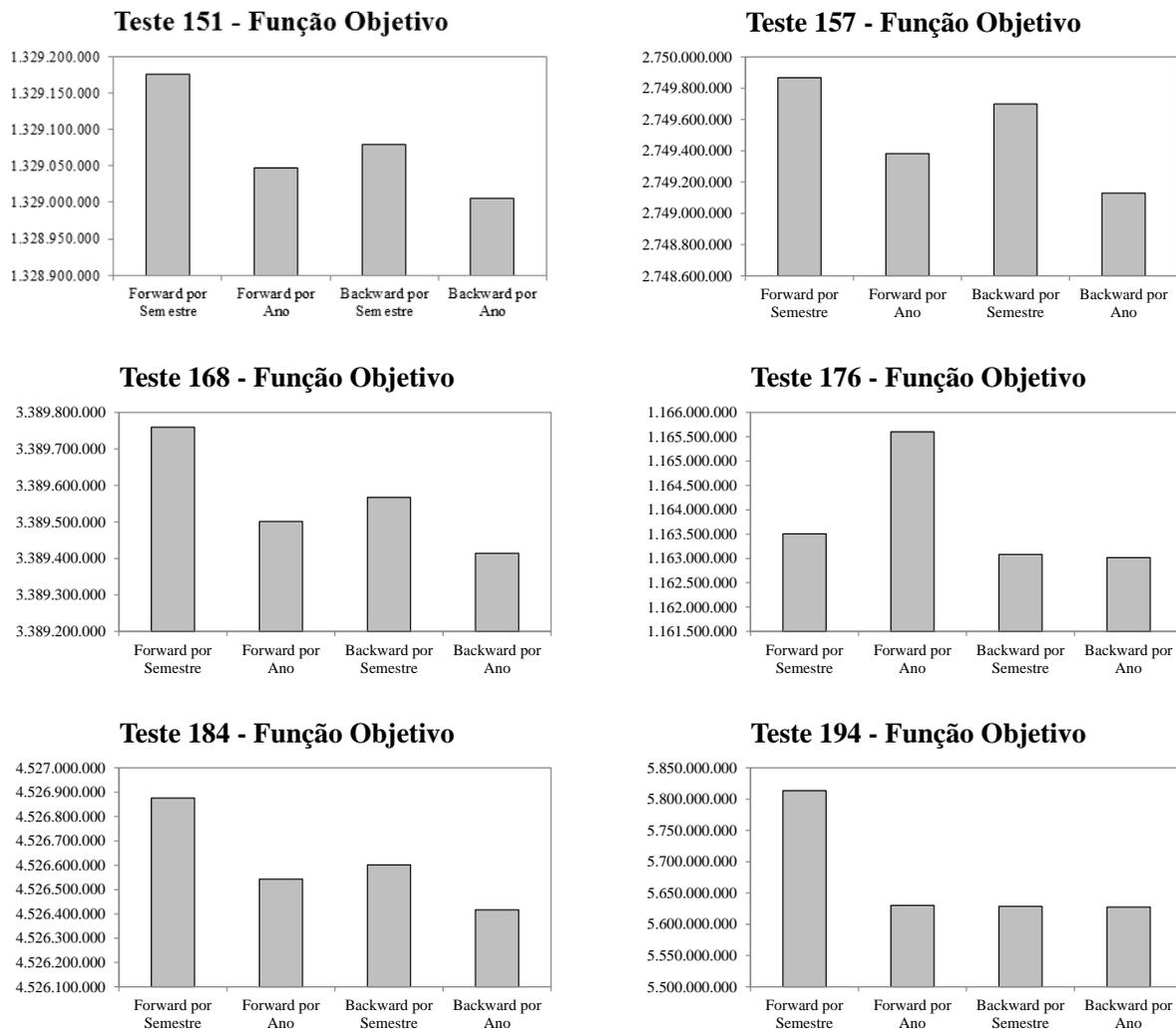


Figura 8.6 – Comparação entre as estratégias *relax-and-fix* implementadas

Para os exemplares do Modelo 8, foi possível encontrar resultados com a heurística *relax-and-fix* com *overlapping*. Ainda pela Tabela 8.2, é possível perceber que os resultados obtidos com a utilização de partição de sobreposição não foram melhores que os anteriormente encontrados, usando apenas o fluxo iterativo *backward* com partição por ano, para a maior parte dos testes. Apenas para o Teste 176, a partição de sobreposição conseguiu melhores resultados. Mesmo nesse caso, o ganho em termos da função objetivo não foi considerável, não chegando a R\$ 100.000,00 em um horizonte de 3 anos. O uso, no entanto da solução gerada pela estratégia com *overlapping* no Teste 194, levaria a um prejuízo de mais de meio milhão de reais em um mesmo período.

Quando se comparam esses resultados aos obtidos com aqueles gerados com o *software* de otimização, e reportados no Capítulo 7, as soluções obtidas com a heurística *relax-and-fix* não se mostraram tão competitivos em termos dos valores das funções objetivo encontradas, como pode ser visto na Tabela 8.3. Para os testes com o Modelo 7, mostrados nas duas primeiras linhas tabela, as diferenças percentuais, ou GAPS em relação à melhor solução conhecida para esses problemas foi bastante alto. Já para os casos dos exemplares do Modelo 8, as diferenças foram mínimas, com GAPS inferiores a 0,05%, o que mostra que a heurística, pode sim, ser competitiva em relação ao uso do *software* de otimização usado nos testes.

Tabela 8.2 – Resultados das estratégias *backward* com partição anual, com e sem *overlapping*

Exemplar	Sem <i>Overlapping</i> (R\$)	Com <i>Overlapping</i> (R\$)	Diferença (R\$)
Teste 151	1.329.005.790	-	-
Teste 157	2.749.129.244	-	-
Teste 168	3.389.414.186	3.389.509.766	-95.580
Teste 176	1.163.015.701	1.162.936.813	78.888
Teste 184	4.526.416.438	4.526.591.749	-175.311
Teste 194	5.627.745.159	5.628.335.075	-589.916

Tabela 8.3 – Comparação entre resultados do CPLEX e da heurística *relax-and-fix*

Exemplar	CPLEX	<i>Relax-and-Fix</i>	Diferença	Diferença Percentual
Teste 151	1.100.083.471	1.329.005.790	-228.922.319	-17,225%
Teste 157	2.264.013.127	2.749.129.244	-485.116.117	-17,646%
Teste 168	3.389.283.638	3.389.414.186	-130.548	-0,004%
Teste 176	1.162.445.919	1.163.015.701	-569.782	-0,049%
Teste 184	4.525.642.126	4.526.416.438	-774.312	-0,017%
Teste 194	5.627.272.183	5.627.745.159	-472.976	-0,008%

Como o principal parâmetro que poderia ser calibrado na heurística *relax-and-fix* implementada é o tempo de resolução dos subproblemas relacionados à partição em anos do problema original, determinou-se que um limite de 1.200 s, de forma que um problema com 3 anos de planejamento pudesse ser resolvido em torno de 1 hora. Ao se analisar os resultados da Tabela 8.2, a primeira ideia para melhorar as soluções obtidas foi o aumento desse limite de tempo, pelo menos para a primeira iteração da heurística. Analisando-se os resultados, obtidos, verificou-se que essa melhora é possível, pois em todos os casos testados para o Modelo 8, na primeira iteração, a solução para a partição P^1 foi definida após esse período de tempo, sendo as soluções para as partições P^2 e P^3 obtidas em tempos bem inferiores, como mostra a Tabela 8.4.

Tabela 8.4 – Tempos de execução (s) da heurística *relax-and-fix* com o Modelo 8

Partição	Teste 168	Teste 176	Teste 184	Teste 194
P^1	1.201,299	1.217,353	1.201,640	1.203,518
P^2	28,437	95,963	38,347	138,889
P^3	41,810	105,424	1341,793	185,582
Total	1.271,546	1.418,740	2.581,780	1.527,989

Para esses exemplares, a heurística *fix-and-optimize* foi testada utilizando-se a solução da heurística *relax-and-fix backward* com partição por anos como solução inicial. Em todos os casos, a heurística *fix-and-optimize* com a partição implementada, não foi capaz de melhorar a solução inicial. Os subproblemas das partições consideradas foram resolvidos rapidamente, com tempos inferiores a 60 s, mostrando que os subproblemas resultantes de cada partição são pequenos e podem ser solucionados facilmente.

8.4.3 Experimentos com Exemplares de Porte Aumentado

O terceiro conjunto de testes foi realizado com os exemplares de porte aumentado, apenas para o Modelo 8, e já testados no Capítulo 7. Os exemplares considerados foram o Teste 224, o Teste 225, o Teste 226 e o Teste 227, em que se obteve solução factível apenas para o primeiro, sendo os demais abortados por falta de memória para os cálculos do algoritmo *branch-and-cut*. Os exemplares do Modelo 7 não foram considerados, pois não foi possível obter

soluções factíveis para nenhum dos modelos de porte aumentado utilizando-se a heurística *relax-and-fix*. Nessa bateria de testes, cada um dos exemplares foi resolvido com a heurística *relax-and-fix backward* com partição por ano, e a sua resposta foi dada como solução inicial para a heurística *fix-and-optimize*. Os resultados obtidos são semelhantes aos do Capítulo 7 e estão reportados na Tabela 8.5.

O limite de intratabilidade computacional do *software* de otimização foi mantido nos experimentos realizados com as heurísticas. Isso mostra que a partição dos problemas testados não foi suficiente para que cada um dos subproblemas pudesse ser resolvido, devido a limitações de memória computacional para a realização dos cálculos do algoritmo de *branch-and-cut*. O único resultado obtido nessa bateria de testes confirma os resultados obtidos para os exemplares de porte realista. A heurística *relax-and-fix*, apesar de não ter conseguido obter uma solução melhor que a do *software* de otimização, atingiu um GAP de apenas 0,023%, o que equivale a R\$ 1.291.415,00. Acredita-se, da mesma forma que no caso dos exemplares de porte realista, que o aumento do tempo permitido para a otimização da partição P^1 levaria à obtenção de uma solução melhor, visto que o processamento foi abortado após 1.200 s, enquanto nas demais a solução ótima foi encontrada. A heurística *fix-and-optimize* não conseguiu, assim como no caso dos exemplares de porte realista, melhorar a solução inicial dada, mostrando que essa estrutura de partição não foi eficiente para os problemas testados.

Tabela 8.5 – Resultados obtidos para a função objetivo (R\$) com exemplares de porte aumentado

Exemplar	CPLEX	<i>Relax-and-Fix</i>	<i>Fix-and-Optimize</i>
Teste 224	5.627.272.183	5.628.563.598	5.628.563.598
Teste 225	-	-	-
Teste 226	-	-	-
Teste 227	-	-	-

8.5 Considerações Gerais

Neste capítulo, foram propostas duas heurísticas baseadas em programação inteira mista, com a finalidade de gerar boas soluções em tempo computacional aceitável para os Modelos 7 e 8, propostos no Capítulo 6. A principal motivação para investimento em métodos de

resolução para esses problemas foi o desempenho computacional obtido para esses modelos nos experimentos do Capítulo 7. Para esses dois modelos, verificou-se que a maior parte dos exemplares analisados pode ser considerado de grande porte, além desses modelos serem de difícil solução, conforme já comentado nos Capítulos 6 e 7.

Foram implementadas duas heurísticas baseadas em programação inteira, propostas por Pochet e Wolsey (2006), *relax-and-fix* e *fix-and-optimize*. Apesar de amplamente exploradas para problemas de planejamento da produção e logística, não se tem conhecimento de relatos científicos da sua utilização para problemas de logística de complexos agroindustriais ou problemas de transporte intermodal. As implementações realizadas tiveram como referência o trabalho de Furlan (2001), que utilizou a heurística *relax-and-fix* como heurística de construção e a heurística *fix-and-optimize* para refino das soluções da primeira, considerando o modelo de dimensionamento de lotes multiestágio com limitações de capacidade.

Foram implementadas seis estratégias para a heurística *relax-and-fix*, em que se variou o particionamento em períodos de 1 mês, 1 semestre e 1 ano, dentro do horizonte de planejamento estratégico em que estão inseridos os Modelos 7 e 8, combinadas com fluxos iterativos *forward* e *backward*. A melhor dessas estratégias, de acordo com os experimentos realizados, foi a estratégia *backward* com partição por ano, em ambos os Modelos. Essa estratégia também foi implementada com *overlapping*, sendo a sobreposição considerada de 1 ano, que não gerou resultados muito promissores na bateria de testes realizada. A heurística *fix-and-optimize* foi implementada, de forma a utilizar a solução gerada pela heurística *relax-and-fix* como solução inicial. Uma única estratégia foi implementada, considerando partições de 2 e 2 períodos de planejamento, que se sobrepõem durante a evolução do algoritmo, possibilitando a análise de mudanças nos valores das variáveis devido às suas interações entre dois períodos consecutivos de planejamento. Em ambos os casos, optou-se, como em Furlan (2011) pela fixação apenas das variáveis inteiras do problema, para se evitar infactibilidades decorrentes da fixação de variáveis não negativas de fluxo de transporte e transbordo, estoque e dimensionamento dos lotes de produção nas esmagadoras e refinarias.

Os experimentos computacionais realizados utilizaram exemplares que já haviam sido testados no Capítulo 7. Esses testes apresentam dados coerentes e, na maioria dos casos, pelo menos uma solução inteira factível é conhecida. Foram realizados, da mesma forma como no Capítulo 7, testes com exemplares de porte ilustrativo, de porte realista para grande parte das

empresas do setor no Brasil, e de porte aumentado. Os experimentos com exemplares ilustrativos mostraram que as heurísticas foram implementadas de forma consistente e que podem gerar soluções ótimas para os Modelos 7 e 8. Os experimentos com exemplares de porte realista foram utilizados para a avaliação das estratégias de implementação para a heurística *relax-and-fix*. Os resultados mostraram que a melhor estratégia foi a de iteração *backward* com partição por ano. Essa estratégia foi testada com *overlapping*, não demonstrando potencial significativo de melhora da estratégia original.

Outros testes foram realizados com os exemplares de porte realista e aumentado, mostrando que o limite em que o Modelo 7 não é mais tratável computacionalmente e seu limite é atingido antes do Modelo 8, sendo o processamento abortado por falta de memória para os cálculos do algoritmo *branch-and-cut* nos passos em que os subproblemas são otimizados pelas heurísticas. No caso do Modelo 8, os testes mostraram que, para os exemplares analisados, a heurística *relax-and-fix* pode gerar resultados bastante competitivos em relação ao uso do *software* de otimização. Já para a heurística *fix-and-optimize*, a estratégia implementada não se mostrou eficiente para a melhoria das soluções geradas pela heurística *relax-and-fix*, não conseguindo melhorar essas soluções em nenhum exemplar testado.

Deve-se ressaltar que os experimentos realizados até o momento com essas heurísticas assumiu um caráter apenas exploratório, em função dos poucos testes executados e para o prazo do término desta tese. Como já foi dito no Capítulo 7, esses modelos representam problemas práticos extremamente complexos e dependentes de grandes quantidades de dados, dificultando a obtenção de casos reais para análise e a realização de planejamentos de experimentos, incluindo com o uso de blocagem. Dessa forma, no curto prazo, tem-se como perspectivas de pesquisas futuras, ampliar os experimentos realizados, com a consideração de novos exemplares, com maior controle e maior quantidade de características a serem variadas. Pretende-se também estudar novas estratégias de implementação para a heurística *fix-and-optimize*. Pretende-se também estudar novas estratégias para a heurística *relax-and-fix*, avaliando outras partições, considerando-se, por exemplo, os tipos de decisões apoiadas. Também é possível implementações em que partições diferentes são utilizadas de forma sucessiva, ou com considerações de outras características desses problemas.

9. CONCLUSÃO E PERSPECTIVAS

O objetivo deste capítulo é apresentar as conclusões do trabalho e estabelecer perspectivas para trabalhos futuros.

9.1 Conclusão

O complexo agroindustrial da soja no Brasil, cujos principais produtos são a soja em grão, o farelo e os óleos bruto e refinado, tem grande importância para o agronegócio brasileiro, tanto no que se refere ao mercado interno quanto de exportação. Nesta tese, foram desenvolvidas abordagens de otimização com foco nas decisões de empresas que atuam nesse setor no Brasil, sendo este o primeiro diferencial de pesquisa, visto que os demais trabalhos encontrados na literatura em geral possuem foco em decisões governamentais. Foram abordados problemas característicos de empresas especializadas somente na exportação da soja em grão e também empresas atuantes em todo o complexo agroindustrial da soja e seus derivados.

As características específicas desses dois tipos de empresas que atuam no agronegócio da soja levaram a uma subdivisão natural dos modelos de fluxos em redes orientados para problemas monoproduto, como no caso das primeiras empresas, e multiproduto, no caso das últimas empresas. Foram desenvolvidas abordagens de otimização baseadas em teorias consolidadas, resultando em modelos de fluxos em redes para representar, no horizonte de curto prazo, decisões de transporte intermodal, industrialização e armazenagem ao longo do complexo. E, no horizonte de longo prazo, foram propostos modelos de localização de instalações baseados em programação inteira mista para apoiar decisões de investimento em terminais intermodais, esmagadoras e refinarias, além de armazéns. Além disso, para melhor representar esse complexo de suprimentos, que é de grande porte, também foi desenvolvida uma estrutura de rede altamente esparsa, tornando os modelos mais tratáveis sob o ponto de vista computacional.

Procedeu-se a uma ampla revisão de literatura, que foi dividida em duas partes. Na primeira parte, foram revisados estudos realizados em relação à modelagem de problemas que pudessem servir de referência para a construção dos modelos matemáticos para os planejamentos operacional e estratégico das empresas consideradas. Os modelos revisados foram organizados

em problemas específicos de complexos de suprimento de produtos agroindustriais não perecíveis, problemas de transporte intermodal e problemas de modelagem do complexo agroindustrial da soja no Brasil. Alguns modelos mais diretamente relacionados aos objetivos dessa tese foram apresentados e discutidos e um paralelo entre esses trabalhos e os modelos desta tese foi estabelecido. Em relação ao foco do decisor, não se tem conhecimento de outros trabalhos que tratem de problemas específicos de empresas deste setor, mas somente modelos que apoiam decisões em contextos governamentais.

Outras diferenças encontradas em relação aos modelos de complexos de suprimento agroindustriais, incluindo a da soja no Brasil, dizem respeito à consideração de níveis de decisão e da representação do horizonte de planejamento. Enquanto os modelos revisados dividem o complexo em etapas de decisão, em que se tomam decisões sequenciais de transporte, industrialização, seguidas de transporte, por exemplo, o mesmo não pode ser feito para as empresas que atuam no agronegócio da soja no Brasil. Como essas empresas podem exportar o grão diretamente, os produtos considerados não precisam passar por etapas de industrialização, não obedecendo às lógicas de fluxos bem definidas ao longo dos elos do complexo agroindustrial. Outra diferença importante diz respeito à forma de consideração do horizonte de planejamento. Na grande maioria dos modelos encontrados na literatura, o horizonte é estático e monoperíodo, ao passo que nos problemas considerados, o horizonte é dinâmico e discreto, dividido em múltiplos períodos, com durações menores ou maiores, de acordo com o contexto analisado.

Apesar dessas diferenças em relação aos modelos encontrados em aplicações a complexos agroindustriais, os modelos propostos nessa tese possuem forte ligação com os modelos encontrados na literatura para tratar decisões de transporte intermodal. A relação entre os problemas propostos e a literatura de transporte intermodal é tão direta que possibilitou o uso ou a realização de pequenas adaptações de algumas ideias contidas no trabalho Arnold et al. (2004). Por exemplo, a representação dos terminais intermodais como arcos, ao invés de vértices na rede e a representação dos modais disponíveis em múltiplas redes paralelas, foram utilizados como premissas importantes para o desenvolvimento de uma estrutura de rede para representação do complexo agroindustrial da soja, sendo esta utilizada para o desenvolvimento dos modelos propostos nesta tese.

Além disso, a revisão de literatura se estendeu a pesquisas realizadas em relação a todo o contexto do complexo agroindustrial da soja no Brasil, mesmo aquelas não relacionadas à

modelagem de problemas de otimização. Foram revisados principalmente trabalhos interessados em descrever o complexo agroindustrial da soja, ou alguma de suas partes. Essa revisão bibliográfica serviu para um melhor entendimento dos problemas que foram abordados, das características de empresas que atuam no setor, das dificuldades encontradas e dos diferenciais desse sistema em relação a outras áreas produtoras e exportadoras de soja, como os EUA e a Argentina. Além de relatos da literatura, a participação do grupo de Pesquisa Operacional da UFSCar no projeto ALOGTRANS/FINEP, possibilitou a interação com outras universidades e centros de pesquisas, além de permitir o acesso a algumas fontes de dados que foram úteis para a modelagem e experimentação dos modelos que foram desenvolvidos.

A representação em redes proposta para representar o complexo agroindustrial da soja no Brasil serviu de base para a fase de desenvolvimento das abordagens de otimização desenvolvidas, tanto no contexto operacional, quanto no contexto estratégico. A partir da rede proposta por Arnold et al. (2004), em que os modais de transporte são representados por redes paralelas, ligadas pelos terminais intermodais, foram criadas novas estruturas para representar os armazéns e as indústrias de esmagamento e refino. Foi possível definir regras de preenchimento da rede e da matriz de adjacências e ela associada, com base em premissas práticas das empresas estudadas, tendo sido essas regras ilustradas e amplamente discutidas. Essas regras garantem um alto grau de esparsidade da rede resultante, por mais densa que seja a realidade representada.

Seguindo-se ao desenvolvimento da rede, dois conjuntos de modelos matemáticos foram formulados. Os primeiros modelos a serem formulados e apresentados foram aqueles voltados ao apoio de decisões de empresas em contextos operacionais, em que se deseja planejar atividades diárias de transporte intermodal, industrialização e armazenagem ao longo do complexo. Do ponto de vista de modelagem, todos os modelos operacionais se apoiam em teoria consolidada, especificamente de problemas de fluxos em redes. À exceção do primeiro modelo, que é de programação linear e considerado de fácil solução, os demais são formulações de programação inteira mista e considerados de difícil solução.

O primeiro, que é o modelo para transporte intermodal da soja em grão, está voltado apenas à exportação da soja, considerando apenas custos lineares. Como vantagem, esse modelo é o que apresenta a menor necessidade de dados entre os quatro modelos apresentados (1, 2, 3 e 4) mas, ao mesmo tempo, captura bem as premissas do sistema representado e fornece informações bastante detalhadas a respeito da gestão de transporte e armazenagem em períodos

de curto prazo. O segundo modelo, que inclui a possibilidade de obtenção de economias de escala nos transporte ferroviário e hidroviário fluvial, proporciona a análise dessa oportunidade, pouco explorada na prática e na literatura relacionada ao agronegócio da soja no Brasil.

O terceiro modelo, de dimensionamento de lotes de produção e planejamento do transporte intermodal na agroindústria da soja, incorpora as funções dos modelos anteriores, mas também apoia decisões de empresas que atuam na industrialização da soja. Essas considerações são úteis não só pela inclusão do processo industrial, mas também pela possibilidade de planejamento do atendimento às demandas internas de farelo, óleo bruto e óleo refinado. O quarto e último modelo definido em um contexto operacional, apoia decisões de planejamento operacional para todo o complexo agroindustrial da soja, alocando os estoques aos silos, tanques e armazéns, capturando melhor as diferenças entre granéis sólidos e líquidos.

Em seguida, foram desenvolvidos e apresentados os modelos de planejamento estratégico, apoiados na teoria de localização de instalações, e baseados em programação inteira mista, que servem para apoiar decisões de investimento em terminais intermodais, esmagadoras e refinarias, além de armazéns. Devido à sua relação com os modelos clássicos de localização de instalações com custos fixos, todos esses modelos são considerados de difícil solução. Assim como nos casos dos modelos de planejamento operacional, os modelos estratégicos são considerados de grande porte e também necessitam de grandes quantidades de dados.

O quinto modelo, de localização de terminais intermodais e armazéns gerais está voltado aos interesses de empresas exportadoras de soja. Por ser o mais simples de todos (5, 6, 7 e 8), esse modelo apresenta como vantagem a possibilidade de rápida realização de estudos de cenários em que os locais e as capacidades de terminais intermodais e armazéns são avaliadas, podendo-se medir seus impactos nos custos de operação da empresa na nova rede. O sexto modelo acrescenta a possibilidade de avaliar simultaneamente conjuntos de alternativas discretas de investimento, novamente, em terminais intermodais e armazéns.

O sétimo modelo, por sua vez, está voltado aos investimentos de empresas que também atuam na produção de derivados da soja, contemplando a possibilidade de se instalar indústrias de esmagamento e refino, além de terminais intermodais e armazéns. Essa possibilidade também considera, além do estudo de cenários relativos aos investimentos, a avaliação do impacto das novas instalações nos custos de operação da empresa. O oitavo e último

modelo permite a avaliação de alternativas discretas de investimento em terminais intermodais, armazéns, esmagadoras e refinarias.

Todos esses modelos possuem diferenciais em relação às pesquisas que se tem conhecimento, seja pelo foco empresarial relacionado ao decisor da rede, seja pela consideração da possibilidade de obtenção de economias de escala importantes nos modais ferroviário e hidroviário fluvial, seja pelo grau de representação da realidade ou do número de decisões que podem ser apoiadas. Ao final dos capítulos em que esses modelos foram formalizados, foram ainda apresentadas algumas extensões possíveis, que podem envolver ou não mudanças significativas dos modelos.

Todos esses modelos foram implementados *software* de em linguagem de modelagem e submetidos a experimentos computacionais, utilizando-se um *software* de otimização de última geração. Devido à grande complexidade dos modelos formulados, e também à indisponibilidade de fontes de dados que permitissem a construção de uma variedade de cenários que pudessem ser testados, optou-se por duas formas de construção dos exemplares para teste. No contexto operacional, foram gerados dados considerando cenários realistas, construídos a partir de relatos anteriores da literatura, bancos de dados de órgãos governamentais e em *sites* de empresas do setor. Para os testes com os modelos estratégicos, foi construído um gerador automático de dados aleatórios, segundo uma distribuição uniforme. A estrutura de redes proposta foi utilizada para a definição dos parâmetros da rede, bem como na criação de empresas fictícias. Os dados de oferta e demanda, custos e de capacidade foram calculados com componentes aleatórios e outros dados realistas, obtidos da mesma forma e utilizando as mesmas fontes do caso do planejamento operacional.

Foram realizadas baterias de testes com exemplares de três portes distintos, sendo o primeiro conjunto de dados considerado formado de exemplos ilustrativos, de pequeno porte e dados bem simplificados, permitindo a verificação e coerência dos modelos e dos métodos de resolução. Um segundo conjunto de dados utilizado possui porte e características variadas, com a finalidade de poder representar a grande maioria das empresas brasileiras. Um terceiro conjunto de dados foi definido, em que o porte dos exemplares foi aumentado, de forma a permitir análises de esforço computacional compatíveis com o tamanho dos sistemas das maiores empresas atuantes no Brasil, além de extrapolar esses limites, com a finalidade de medir o comportamento computacional desses modelos com o aumento da rede e do porte da empresa considerados.

Apesar de não ter sido possível realizar uma ampla bateria de testes, principalmente em função da complexidade dos problemas tratados e das limitações de tempo para o término desta tese, o que impossibilitou a realização de um planejamento de experimentos mais abrangente, os resultados apontaram alguns comportamentos interessantes. Verificou-se que todos os modelos são, em geral, de grande porte em situações reais, tendo sido apontados alguns limites de porte dos exemplares em que ocorreram interrupções do processamento do *software* de otimização por falta de memória computacional ou de casos em que foi impossível carregar o problema na memória do computador utilizado. Nos casos em que soluções inteiras factíveis foram encontradas, em geral o GAP de otimalidade foi relativamente baixo, alcançando valores inferiores a 0,1% já nos primeiros nós da árvore de busca do método *branch-and-cut*. A relaxação linear do problema, em geral, forneceu limitantes inferiores bastante justos para todos os modelos, sendo obtidos em tempo computacional bastante reduzido.

Também foram desenvolvidos métodos de resolução aproximados para os problemas estratégicos de empresas atuantes sobre todo o complexo da soja, especificamente para o sétimo e oitavo modelos apresentados. A motivação principal consistiu no fato desses modelos apresentarem limites muito estreitos do porte em que é possível tratá-los com o uso de um *software* de otimização. Outra razão foi o fato de não ter sido possível obter a solução ótima para nenhum dos exemplares testados em 1 hora de processamento. Foram então estudadas duas heurísticas baseadas em programação inteira, *relax-and-fix* e *fix-and-optimize*. Foram implementadas 7 estratégias para a heurística *relax-and-fix*, sendo a estratégia *backward* com partição por anos sem *overlapping* a que obteve os melhores resultados, e uma estratégia para a heurística *fix-and-optimize*.

Os testes realizados possuem caráter exploratório, devido ao reduzido número de resultados analisados. Porém, é possível afirmar que o limite em que o Modelo 7 não é mais tratável computacionalmente, em geral, é atingido antes do Modelo 8, sendo o processamento abortado por falta de memória computacional para os cálculos do algoritmo *branch-and-cut* nos passos em que os subproblemas são otimizados pelas heurísticas. No caso do Modelo 8, os testes mostraram que a heurística *relax-and-fix* pode gerar resultados bastante competitivos em relação ao uso do *software* de otimização. Já para a heurística *fix-and-optimize*, a estratégia implementada não se mostrou eficiente para a melhoria das soluções geradas pela heurística *relax-and-fix*, não conseguindo melhorar essa solução em nenhum exemplar testado. Esses

resultados motivam a continuidade de pesquisa nas heurísticas, com o estudo e a implementação de novas estratégias de partição e a realização de uma bateria mais ampla de testes.

9.2 Perspectivas para o Desenvolvimento de Pesquisas Futuras

Durante a realização desta tese, foram identificadas algumas oportunidades de pesquisa futura e aprofundamento do tema tratado, dentre as quais é interessante citar:

- A continuidade dos estudos com os métodos de resolução, não só ampliando o número de experimentos realizados e de estratégias de partição que podem ser implementadas, mas também no que se refere à outras combinações de heurísticas para construção e refino de soluções. Uma perspectiva na linha de algoritmos baseados em teoria de programação inteira seria a implementação e utilização de um algoritmo de *local branching* e outras heurísticas relacionadas;
- Em virtude das incertezas intrínsecas dos parâmetros dos problemas tratados, no que se referem aos valores dos dados práticos necessários para a alimentação dos modelos, tais como os tempos de transporte e transbordo, capacidades de operação e ao próprio balanço entre oferta e demanda, poderiam ser estudadas técnicas de programação estocástica e otimização robusta para o tratamento dessas incertezas;
- Seria interessante a busca de parceria com empresas do setor, em especial empresas que atuam apenas na exportação da soja em grão e também empresas que atuam no mercado de derivados de soja, para a realização de estudos de caso reais. Estudos nessas empresas poderiam subsidiar comparações importantes entre as soluções obtidas com os modelos e as praticadas pelas empresas, mas também poderiam levar a outras

adaptações, modificações e novos contextos de aplicação, que ainda não foram explorados pela falta de dados reais;

- Outra proposta seria o estudo adaptações desses modelos quando se consideram os fluxos simultâneos da soja transgênica e da soja não geneticamente modificada. Como esses produtos competem por capacidade em alguns canais do complexo, como no transporte, e exigem estruturas dedicadas em outros momentos, como nas etapas de armazenagem, os modelos se tornariam matematicamente e computacionalmente mais complexos. Por outro lado, os ganhos com a soja não geneticamente modificada são maiores e poderiam ser quantificados. Isso possibilitaria a análise de cenários para empresas que desejem migrar parte ou toda a sua produção para a soja com certificação de não utilização de modificações genéticas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABIOVE, Associação Brasileira das Indústrias de Óleos Vegetais. (2012). **Exportações do complexo da soja**. Disponível em: < http://www.abiove.com.br/exporta_br.html >. Acesso em 5 Abr. 2012.

ABIOVE, Associação Brasileira das Indústrias de Óleos Vegetais. (2007). **Produção responsável no agronegócio da soja**. Disponível em: <http://www.abiove.com.br/sustent/sustenta_agronegocio_soja_br.pdf >. Acesso em 13 Abr. 2010.

ADM, ADM Brasil. (2012). **Produtos e serviços**. Disponível em: <http://www.adm.com/pt-BR/worldwide/brazil/Paginas/Products.aspx>>. Acesso em 15 Ago. 2012.

Ahuja, R. K.; Magnanti, T. L.; Orlin, J. B. **Network flows: theory, algorithms, and application**. Englewood Cliffs: Prentice-Hall, 1993.

Ahumada, O.; Villalobos, J. R. **Application of planning models in the agri-food supply chain: a review**. European Journal of Operational Research. 195. p 1-20, 2009.

Aldigueri, D. R.; Oliveira, A. R G. **Análise de trade-offs entre escoamento imediato da produção de soja e armazenagem com escoamento controlado**. In: **Anais do Congresso Brasileiro de Pesquisa e Ensino em Transportes**. 2009. Vitória: Anais do XXII ANPET, 2009.

Almeida, M. S. **Localização de terminais intermodais na rede de escoamento da soja em grão brasileira destinada à exportação**. 129 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção). Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2010.

Alves, M. C.; Couto, E. G.; Campelo Júnior, J. H.; Amorim, R. S. S.; Rotili, D. R. **Cartografia temática e geovisualização da produção de soja do estado de Mato Grosso com cenários de**

previsão de safra. In: Anais XIV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto. 2009. Natal: Anais do XIV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 2009.

Akartunali, K.; Miller, A. J. A heuristic approach for big bucket multi-level production planning problems. **European Journal of Operational Research**, 193(2), p.396-411, 2009.

Amaral, D. **A construção do Brasil novo.** 1 ed. Brasília: Senado Federal, 2003.

Amaral, M.; Almeida, M. S.; Morabito, R. Um modelo de fluxos e localização de terminais intermodais para escoamento da soja brasileira destinada à exportação. **Gestão & Produção**, São Carlos, v. 19, n. 2, p. 1-16, 2012.

Amaral, M.; Almeida, M. S.; Morabito, R. **Um modelo de localização de terminais intermodais para exportação de soja no Brasil.** In: Simpósio de Pesquisa Operacional e Logística da Marinha. 2009. Rio de Janeiro: Anais do SPOLM, 2009.

Amaral, M.; Morabito, R.; Souza, M. C. **Um modelo de planejamento operacional para a cadeia agroindustrial da soja no Brasil.** In: Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional. 2010. Bento Gonçalves: Anais do SBPO, 2010.

Anderson, V. L.; Stupello, B.; Leal, M. B. S.; Cardoso, J. S. L.; Pinto, M. M. O. **Avaliação da capacidade de terminais de granéis agrícolas utilizados para escoamento da produção do Centro-Oeste brasileiro.** In: XXI Congresso Panamericano de Engenharia Naval, 2009, Montevideo. Anais do Congresso, 2009.

Ângelo, L. B. **Custos Logísticos de Transferência de Produtos.** Grupo de estudos logísticos da Universidade Federal de Santa Catarina, GELOG, 2005.

Araújo, S. A.; Arenales, M. N.; Clark, A. R. Lot sizing and furnace scheduling in small foundries. **Computers and Operations Research**, 35(3), p. 916-932, 2008.

ANTT, Agência Nacional de Transportes Terrestres. (2010). **Transporte Multimodal**. Disponível em: <<http://www.antt.gov.br/faq/multimodal.asp>>. Acesso em 5 Fev. 2010.

ANTAQ, Agência Nacional de Transportes Aquaviários, **Principais portos brasileiros**, (<http://www.antaq.gov.br/Portal/pdf/Portos/Santos.pdf>), 2009.

ANTT, Agência Nacional de Transportes Terrestres, **Relatório anual**, (<http://www.antt.gov.br/relatorios/ferroviario/concessionarias2007/index.asp>), 2009.

ANTT, Agência Nacional de Transportes Terrestres, **RNTRC – Registro Nacional de Transportadores Rodoviários de Carga**. Disponíveis em : <http://www.antt.gov.br/index.php/content/view/4929/RNTRC___Registro_Nacional_de_Transportadores_Rodoviaros_de_Cargas.html>. Acesso em 12 Jun. 2012.

Apaiiah, R. K.; Hendrix, E. M. T. Design of a supply chain network for pea-based novel protein foods. **Journal of Food Engineering**, 27, p. 383-381, 2005.

Aquino, D. C.; Pelaez, V. **Análise custo/benefício do sistema de rastreabilidade e certificação da soja não-gm da Imcopa**. In: XLV Congresso da Sociedade Brasileira de Economia, Administração. 2007. Londrina: Anais do XLV Congresso da Sociedade Brasileira de Economia, Administração, 2007.

Arenales, M.; Armentano, V.; Morabito, R.; Yanasse, H. **Pesquisa operacional para cursos de engenharia**. Campus, 2007.

Arnold, P.; Peeters, D.; Thomas, I.; Marchand, H. Pour une localisation optimale des centres de transbordement intermodaux entre réseaux de transport: formulation at extensions. **The Canadian Geographer**, 45 (3), p 427-436, 2001.

Arnold, P.; Peeters, D.; Thomas, I. Modeling a rail/road intermodal transportation system. **Transportation Research Part E**, 40, p 255-270, 2004.

Barbosa, M. Z.; Nogueira Junior, S. **Agroindústria da Soja: competição entre Brasil e Argentina**. Disponível em <

https://www5.pucsp.br/eitt/downloads/v_ciclo_debate/V_Ciclo_2007__Marisa_Barbosa_-Sebastiao.pdf >. Acesso em 05 de Setembro de 2012.

Barbosa, M. Z.; Perez, L. H. **Evolução das exportações brasileiras de óleo de soja por portos de embarque e estados de origem, 1996 a 2004**. Informações Econômicas. 36(2). p 38-53. 2006

Bastos Filho, G. S.; Rocha, D. P. **O efeito das políticas públicas sobre as cadeias agropecuárias da soja e do trigo**. Fundação Getúlio Vargas, IBRE-CEA, Rio de Janeiro, 2001.

Bertrand, J. W. M.; Fransoo, J. C. Operations management research methodologies using quantitative modeling. **International Journal of Operations & Production Management**, 22 (2), p 241-264, 2002.

Bitran, G.; Morabito, R. Na overview of tradeoff curve analys of the design of manufacturing systems. **Gestão e Produção**, 3(2), 108-134, 1996.

Boardman, B. S.; Malstrom, E. M.; Butler, D. P.; Cole, M. H. Computer assisted routing of intermodal shipments. **Computers and Industrial Engineering**, 33(1-2), p. 311-314, 1997.

Buainaim, A. M. **Análise da governança da cadeia da soja**. Disponível em <
<https://ageconsearch.umn.edu/record/147383/files/471.pdf> >. Acesso em 12 de Setembro de 2012.

Bulhões, R.; Caixeta Filho, J. V. Análise da distribuição logística da soja na região Centro-Sul do Brasil através de um modelo de equilíbrio espacial. **Teoria e Evidência Econômica**, 8 (15), p. 11-23, 2000.

Branco, J. E. H. **Estimativa da demanda de carga captável pela Estrada de Ferro Norte-Sul**. Dissertação (Mestrado em Economia Aplicada). Universidade de São Paulo – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba, 2007.

BUNGE, Bunge Alimentos do Brasil. (2012). **A Empresa: quem é a Bunge Alimentos S. A.** Disponível em: <<http://www.bungealimentos.com.br/empresa/empresa.asp>>. Acesso em 14 Jul. 2012.

Camargo, M. F.; Leite, M. L. G. **Cadeia produtiva em uma rede de mercado específico para a soja diferenciada. Uma oportunidade de renda para o pequeno produtor rural do Paraná.** In: Simpósio de Engenharia de Produção. 2006. Bauru: Anais do SIMPEP, 2006.

Campeão, P.; Ferreira, K. G. D.; Teixeira, P. E. F. **Análise da utilização de terminais intermodais hidroviários fluviais do corredor logístico do Centro-Oeste.** In: 47º Congresso da Sociedade Brasileira de Economia, Administração e Sociologia Rural. 2009. Porto Alegre: Anais do Congresso da Sociedade Brasileira de Economia, Administração e Sociologia Rural, 2009.

Cánepa, D. L. **Prospection study of the productive chain of the biodiesel obtained from soybean oil.** In: IV Congresso Internacional de Economia e Gestão de Redes Agroalimentares. 2003. Ribeirão Preto: Anais do Congresso Internacional de Economia e Gestão de Redes Agroalimentares, 2003.

CARAMURU, Caramuru Alimentos. (2012). **A Carumuru.** Disponível em: <<http://www.caramuru.com>>. Acesso em 15 Ago. 2012.

CARGIL, Cargill. (2012). **Complexo da soja.** Disponível em: <<http://www.cargill.com.br/brazil/pt/home/produtos-servicos/agricola/complexo-soja/index.jsp>>. Acesso em 4 Mai. 2012.

Carvalho, L. H. **Poder de mercado na indústria brasileira de esmagamento de soja**. 60 p. Dissertação (Mestrado em Economia Aplicada). Programa de Pós-Graduação em Economia Aplicada da Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2004.

CAS – Consejo Agropecuario del Sur. El Mercado de la soja en los países del Consejo Agropecuario del Sur. 2004. Disponível em < <http://consejocas.org/el-mercado-de-la-soja-en-los-paises-del-cas/> >. Acesso em 12 de Setembro de 2012.

Castillo, R. **Transporte e logística de granéis sólidos agrícolas: componentes estruturais do novo sistema de movimientos do território brasileiro**. Investigaciones Geográficas. 55, p 79-96, 2004.

Castro, N. **Estrutura, desempenho e perspectivas do transporte ferroviário de carga**. Pesquisa e Planejamento Econômico. 32(2), p 251- 283, 2002.

Chang, T. S. Best routes selection in intermodal networks. **Computers and Operations Research**, 35. p. 2877-2891, 2008.

Coronel, D. A.; Carvalho, F. M. A.; Machado, J. A. D. **Fontes de crescimento das exportações do complexo soja brasileiro**. In: XLVI Congresso da Sociedade Brasileira de Economia, Administração e Sociologia Rural. 2008. Rio Branco: Anais do XLVI Congresso da Sociedade Brasileira de Economia, Administração e Sociologia Rural, 2008.

Cosenza, C. A. N.; Neves, C.; Lima, F. R.; Almeida, F. R. **Sistema de informações geográficas georeferenciadas para estudos de localização de plantas de biodiesel do Centro-Sul brasileiro**. In: XXVI Encontro Nacional de Engenharia de Produção, 2006. Fortaleza, Anais do XXVI Encontro Nacional de Engenharia de Produção, 2006.

Croxton, K. L.; Gendron, B.; Magnanti, T. L. Variable disaggregation in network flow problems with piecewise linear costs. **Operations Research**, 55 (1), p. 146-157, 2007.

Daskin, M. S. **Network and discrete location: models, algorithms and applications**. New York: John Wiley & Sons, 1995.

Del Corso, J. M.; Silva, W. V.; Doclós, L. C. **Avaliação do processo de transmissão dos preços da soja praticados nos mercados físico brasileiro e norte-americano**. Revista de Negócios. 11 (3), p 61-72, 2006.

DREYFUS, Louis Dreyfus Commodities do Brasil. (2012). **Soja: parceria com a produção**. Disponível em: <http://www.ldcommodities.com.br/web_portugues/soja.asp>. Acesso em 5 Mai. 2012.

Dubke, A. F. **Modelo de localização de terminais especializados: um estudo de caso em corredores de exportação de soja**. 178 p. Tese (Doutorado em Engenharia de Produção). Departamento de Engenharia Industrial da Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, 2006.

Dubke, A. F.; Pizzolato, N. D. Location modelo f specialized terminals for soybean exports in Brazil. **Pesquisa Operacional**, 31(1), p. 21-40, 2011.

Fajardo, A. P.C. **Uma contribuição ao estudo do transporte intermodal – otimização da expansão dinâmica das redes intermodais do transporte de soja produzida no estado do Mato Grosso**. 187 p. Tese (Engenharia de Transportes). Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa em Engenharia – COPPE / UFRJ, Rio de Janeiro, 2006.

Felippe, E. N. **Análise custo-benefício de um sistema de rastreabilidade e certificação para a soja geneticamente modificada: o caso da Cooperativa Castrolanda**. 120 p. Dissertação (Desenvolvimento Econômico). Universidade Federal do Paraná – UFPR, Curitiba, 2007.

Ferrari, R. C. **Utilização de modelo matemático de otimização para identificação de locais para instalação de unidades armazenadoras de soja no Estado do Mato Grosso**. 185 p.

Dissertação (Mestrado em Economia Aplicada). Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz da Universidade de São Paulo, Piracicaba, SP, 2006.

Ferreira, D.; Morabito, R.; Rangel, S. Relax and fix heuristics to solve one-stage one-machine lot-scheduling models for small-scale soft drink plants. **Computers and Operations Research**, 37(4), 684-691, 2010.

Ferreira, L.; Borenstein, D. **Modelo de simulação baseado em agentes para análise da cadeia produtiva do biodiesel**. In: Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional. 2009. Porto Seguro: Anais do SBPO, 2009.

Fernandes, E.; Neves, C.; Sampaio, L. M. D.; Brito, E. G.; Braga, M. E.; Rubert, M.; Cardozo, V. G.; Ignácio, A. A. V. **Identificação dos principais obstáculos ao escoamento da safra agrícola no Brasil**. In: VII Rio de Transportes. 2009. Rio de Janeiro: Anais do VII Rio de Transportes, 2009.

Filardo, M. L. R.; Illario, A. A.; Silva, G. D.; Carvalho, M. A. A logística de exportação do Estado do Mato Grosso para o porto de Santos. **Revista de Economia Makenzie**, 3(3), 35-52, 2005.

Figueiredo, A. M.; Santos, M. L.; Lírio, V. S. Análise de market-share e fontes de variação das exportações brasileiras de soja. **Revista de Economia e Agronegócio**, 3(2), 2004.

Filgueiras, G. C.; Ferreira, M. N. C.; Santana, A. C. **Análise do mercado e da concentração espacial da cadeia da soja na Amazônia**. Banco da Amazônia, Belém, 2007.

Fornaro, A.; Ilario, C. G. **Infra-estruturas de transportes e fluidez territorial: o corredor sudeste - Porto de Santos**. In: XIX Encontro Nacional de Geografia Agrária. 2009. São Paulo: Anais do XIX Encontro Nacional de Geografia Agrária, 2009.

Frederico, S. **Sistemas de movimentos no território brasileiro: novos circuitos espaciais produtivos da soja.** 219 p. Dissertação (Geociências) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2004.

Fourer, R.; Gay, D. M.; Kernighan, B. W. **AMPL: A modeling language for mathematical programming.** Chichester, Cole Publishing Company, 2002.

Freitas, S. M.; Nachiluk, K. **Desempenho da Produção Brasileira de Biodiesel em 2008.** Análises e Indicadores do Agronegócio. 4(2). P 1-4, 2009.

Furlan, M. M. **Métodos heurísticos para o problema de dimensionamento de lotes multiestágio com limitação de capacidade.** 137 p. Dissertação (Mestre em Ciências). Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2011.

Gallardo, A. P.; Stupello, B.; Goldberg, D. J. K. Cardoso, J. S. L.; Pinto, M. M. O. **Avaliação da capacidade da infra-estrutura de armazenagem para os grãos agrícolas produzidos no Centro-Oeste brasileiro.** CEGN – Centro de Estudos em Gestão Naval, 2010. Disponível em: <https://www.academia.edu/9788061/Avalia%C3%A7%C3%A3o_da_capacidade_da_infra_estrutura_de_armazenagem_para_os_gr%C3%A9is_agr%C3%ADcolas_produzidos_no_Centro_Oeste_brasileiro>. Acesso em 30 de Setembro de 2012.

GEIPOT. Grupo Executivo de Integração da Política de Transportes. **Análise de rotas alternativas para escoamento da produção de soja. Relatório técnico.** 2001. Disponível em: <http://www.geipot.gov.br/estudos_realizados/soja/index.htm>. Acesso em 03 Jan 2009.

Gigler, J. K.; Hendrix, E. M. T.; van den Hazelkamp, V. G. W.; Meerdink, G. On optimization of agri chains by dynamic programming. **European Journal of Operational Research**, 139, p. 613-625, 2002.

Gonçalves, C. **As políticas públicas, a modernização dos cerrados e o complexo da soja no Sul goiano: 1970 – 2005**. 247 p. Tese (Geografia). Uberlândia, Universidade Federal de Uberlândia, 2008.

Groothede, B.; Ruijgrok, C.; Tavasszy, L. Towards collaborative, intermodal networks – a case study in fast moving consumer goods marketing. **Transportation Research Part E**, 41, p. 567-583, 2005.

Helber, S.; Sahling, F. A fix-and-optimize approach for the multi-level capacited lot sizing problem. **International Journal of Production Economics**, 123(2), p. 247-256, 2010.

Hernández, D. I. M. **Efeitos da produção de etanol e biodiesel na produção agropecuário do Brasil**. 176 p. Dissertação (Mestrado em Agronegócios). Programa de Pós-Graduação em Agronegócios da Universidade de Brasília, 2008.

Hybner, B. R.; Parnoff, C. **Exportações paranaenses à China no período 1996-2002: breve análise**. *Análise Conjuntural*. 25 (5-6). p 1-2, 2003.

IBGE, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Produção agrícola municipal**. Disponível em http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/pesquisas/pesquisa_resultados.php?id_pesquisa=44>. Acesso em: 12 mai 2012.

Jaržemskienė, I. The evolution of intermodal transport research and its development issues. **Transport**, 22(4), p. 296-306, 2007.

James, R. J.; Almada-Lobo, B. **Iterative MIP-based neighborhood search heuristics for lot sizing and scheduling problems**. Working Paper, 2010.

Jones, P. C.; Kegler, G.; Lowe, T. J.; Traub, R. D. Managing the seed-corn supply chain at Syngenta. **Interfaces**, 33 (1), p. 80-90, 2003.

Junqueira, R. A. R.; Morabito, R. Um modelo de otimização linear para o planejamento agregado da produção e logística de sementes de milho. **Produção**, 16 (3), p. 510-525, 2006.

Junqueira, R. A. R.; Morabito, R. Planejamento otimizado da produção e logística de sementes de milho: um estudo de caso. **Gestão & Produção**, 15(2), p. 367-380, 2008.

Junqueira, R. A. R.; Morabito, R. Production and logistics planning considering circulation taxes in a multi-plant seed corn company. **Computers and Electronics in Agriculture**, 84, p. 100-110, 2002.

Kussano, M. R.; Batalha, M. O. Custos logísticos do escoamento da soja em grão brasileira para o mercado externo. **Revista Ingepro**, 1 (1), p 27-38, 2009.

Lacerda, S. M. **Logística Ferroviária do Porto de Santos: A Integração Operacional da Infra-Estrutura Compartilhada**. Revista do BNDES. 12(24). P 189-210, 2005.

Leiras, A.; Hamacher, S.; Scavarda, L. F. **Análise da viabilidade econômica da cadeia produtiva do biodiesel: o caso da soja na Bahia**. Revista Gestão Industrial. 3(4). P 121-133, 2007.

Lima, E. T.; Faveret Filho, P.; Paula, S. R. L. **Logística para os agronegócios brasileiros: o que é realmente necessário?** BNDES Setorial. n. 12, p. 161-174, 2000.

Lima Filho, D. O.; Sproesser, R. L.; Tredezini, C. A. O.; Anton, E. **Relações contratuais na cadeia produtiva da soja: um estudo de caso fundamentado na economia dos custos de transação**. Redes. 12(2). p. 218 – 233, 2007.

Lima, F. R. F. **Rotas internas de produtos de exportação: o caso da soja**. Instituto Paranaense de Desenvolvimento Econômico e Social, 2004.

Limbourg, S.; Jourquin, B. Optimal rail-road container terminal locations on the European network. **Transportation Research Part E**, doi: 10.1016/j.tre.2008.12.003, 2009.

Loto, R. A.; Lopes, R. L. **Estudo da logística de transportes da soja no estado do Mato Grosso.** In: XLIII Congresso da Sociedade Brasileira de Economia e Sociologia Rural. 2005. Ribeirão Preto: Anais do XLIII Congresso da Sociedade Brasileira de Economia e Sociologia Rural, 2005.

Lovadine, D.; Bacchi, M. R. P.; **Causalidade e transmissão de preços entre mercado interno e internacional para produtos do complexo da soja.** Disponível em <
<https://docplayer.com.br/79655891-Causalidade-e-transmissao-de-precos-entre-mercado-interno-e-internacional-para-produtos-do-complexo-soja.html>>. Acesso em 20 de Setembro de 2012.

Lowe, T. J.; Preckel, P. V. Decision technologies for agribusiness problems: a brief review of selected literature and a call for research. **Manufacturing and Service Operations Management**, 6 (3), p 201-208, 2004.

Luremann, M. S. **O desenvolvimento do agronegócio no Brasil Central: um Estudo sobre Mato Grosso.** Disponível em <
<http://observatoriogeograficoamericalatina.org.mx/egal12/Geografiasocioeconomica/Geografiaagrararia/01.pdf>>. Acesso em 13 de Setembro de 2012.

Mafioletti, R.; Bragagnolo, C.; Sbrissia, G. F.; Ferreira, G; Loyola, P. **A contribuição da expedição caminhos do campo no dimensionamento da safra de soja e milho paranaense e o potencial de expansão de área do Centro-Norte do Brasil.** In: XLVI Congresso da Sociedade Brasileira de Economia e Sociologia Rural. 2008. Rio Branco: Anais do XLIII Congresso da Sociedade Brasileira de Economia e Sociologia Rural, 2008.

Mandarino, J. M. G.; Roessing, A. C. **Tecnologia para produção do óleo de soja: descrição das etapas, equipamentos, produtos e subprodutos.** 40 p. Londrina: Embrapa, 2001.

Macharis, C.; Bontekoning, Y. M. Opportunities for OR in intermodal freight transport research: a review. **European Journal of Operational Research**, 153 (2), p. 400-416, 2004.

Marta, J. M. C.; Figueiredo, A. M. R. **Uma interpretação política da introdução da soja no cerrado de Mato Grosso.** In: XLIV Congresso da Sociedade Brasileira de Economia e Sociologia Rural. 2006. Fortaleza: Anais do XLIV Congresso da Sociedade Brasileira de Economia e Sociologia Rural, 2006.

Martin, R. **Large scale linear and integer optimization: an unified approach.** Boston: Kluwer Academic Publishers, 1999.

Martins, R. S.; Araújo, M. P.; Salvador, E. L. **Fretes e Coordenação entre os agentes no Transporte Rodoviário: o caso do complexo soja paranaense.** Teoria e Evidência Econômica. 10(18). P. 31-47, 2002.

Martins, R. S. Lemos, M. B. **Corredor Centro-Leste: sistemas de transporte de Minas Gerais na perspectiva dos eixos de desenvolvimento e integração.** In: XII Seminário de Economia Mineira, 2006. Belo Horizonte, Anais do XII Seminário de Economia Mineira, 2006.

Martins, R. S.; Lemos, M. B.; Cypriano, L. A. **Impactos da carência de investimentos na logística pública de transportes para o agronegócio: discussão teórica e evidências para o caso brasileiro.** Belo Horizonte: UFMG/Cedeplar, 2005b.

Martins, R. S.; Lobo, D. S.; Salvador, E. L.; Pereira, S. M. **Características do mercado de fretes rodoviários para produtos do agronegócio nos corredores de exportação do Centro-Sul brasileiro.** Teoria e Evidência Econômica. 12(22). P 35-50, 2004a.

Martins, R. S.; Lobo, D. S.; Araújo, M. P.; Pereira, S. M.; Salvador, E. L. **Mercado de fretes rodoviários para produtos do agronegócio: a competitividade do corredor de exportação de Paranaguá.** E & G Economia e Gestão. 4(8). p 121-143, 2004b.

Martins, R. S.; Rebechi, D.; Prati, C. A.; Conte, H. **Decisões Estratégicas na Logística do Agronegócio: Compensação de Custos Transporte-Armazenagem para a Soja no Estado do Paraná.** RAC. 9(1). p. 53-78, 2005a.

Matos, M. A. **Introdução a decomposição de Dantzig-Wolfe**. FEUP, 1994. Disponível em: <<http://www.dep.ufmg.br/old/professores/miranda/epd839.html>>. Acesso em: 22 Out. 2012.

Matos, R. A.; Matos, F. V. Determinantes do desenvolvimento local: um estudo de caso com a atividade econômica da soja na região nordeste do Paraná, no período de 1996 a 2006. FAE Business School, 2012.

Mendes, J. T. G.; Padilha Júnior, J. B. P. Estratégias de comercialização da soja: análise de portfólios, sob condições de risco. **Produção**, 18 (3), p 441-451, 2008.

Mercé, C.; Fontan, G. MIP-based heuristics for capacited lot sizing problems. **International Journal of Production Economics**, 85(1), p. 97-111, 2003.

Merege, A. A.; Assumpção, M. R. P. **Logística para exportação da soja paranaense**. In: XXII Encontro Nacional de Engenharia de Produção. 2002. Curitiba: Anais do XXII Encontro Nacional de Engenharia de Produção, 2002.

Michelon, E. R. S. **A utilização da carga de retorno no transporte de soja: características, dificuldades e vantagens**. 88 p. Residência (Economia Agroindustrial). Piracicaba, Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, 2007.

Montilha, A. C. **Análise da influência logística na relação comercial entre Brasil e China: estudo de novas rotas para exportação pelo pacífico**. 96 p. Monografia (Tecnólogo em Logística). Faculdade de Tecnologia da Zona Leste, 2006.

Morabito, R. **Análise de curvas de *tradeoff* baseada em teoria de filas para o projeto e planejamento de sistemas discretos de manufatura**. Tese (Livre Docência). São Carlos: Universidade de São Paulo, 1998.

Morabito, R.; Arenales, M. Staged and constrained two-dimensional guilhotine cutting problems: an and/or graph approach. **European Journal of Operational Research**, 94, 548-560, 1996.

Morabito, R., Pureza, V. **Modelagem e Simulação. Em: Metodologia de Pesquisa em Engenharia de Produção e Gestão de Operações.** P. C. Miguel (ed.). Editora Campus / Elsevier, 2009.

Munhoz, C. C.; Palmeira, E. M. **Desafios de logística nas exportações brasileiras do complexo agronegocial da soja.** Revista académica de economia. N. 71, 2006.

Nachiluck

Naves, I. M. **A remoção dos estoques públicos através do corredor noroeste: uma análise sob a ótica da logística do agronegócio.** 158 p. Dissertação (Mestrado em Agronegócios). Pós-graduação Multiinstitucional em Agronegócios (Consórcios entre a Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, Universidade Federal de Goiás e a Universidade de Brasília), 2007.

Neves, C.; Ignácio, A. A. V.; Sampaio, L. M. D.; Brito, E. G.; Braga, M. E. **Logística do escoamento da safra agrícola no Corredor Noroeste.** In: XVI Simpósio de Engenharia de Produção. 2009. Bauru: Anais do SIMPEP, 2009.

Nogueira Junior, S.; Nogueira, E. A. **Centrais regionais de armazenagem como apoio à comercialização de grãos.** Informações Econômicas. 37(7). p. 27-32, 2007.

Noro, G. B.; Zago, C. A.; Oliveira, J. H. R.; Wittmann, M. **A logística como fator determinante para o Sistema de Agronegócio (SAG) do Brasil: um estudo realizado na Bunge Alimentos S.A.** In: IX Congresso Internacional de Custos. 2005. Florianópolis: Anais do IX Congresso Internacional de Custos, 2005.

Ojima, A. L. R. O. **Impactos da sazonalidade na safra de soja.** Análises e Indicadores do Agronegócio. 1(2), 2006a.

Ojima, A. L. R. O.; Lima, D. A. L. L.; Furlaneto, F. P. B.; Reco, P. C.; Kanthack, R. A. D. **Estimativa do custo rodoviário da soja na rota Assis-Santos: uma análise do setor de transportes.** **Informações Econômicas**, 38(6), p. 40-48, 2008.

Ojima, A. L. R. O.; Miguel, F. B.; Bárbaro, I. M.; Ticelli, M. Custo rodoviário como ferramenta de gerenciamento logístico para o transporte de soja: o caso da rota Barretos-Santos.

Informações Econômicas, 37(5), p. 64-69, 2007.

Ojima, A. L. R. O. Perfil da logística de transporte de soja no Brasil. **Informações Econômicas**. 36 (1). p 17-25, 2006b.

Ojima, A. L. R. O.; Rocha, M. B. **Desempenho logístico e inserção econômica do agronegócio da soja: as transformações no escoamento da safra**. In: XLIII Congresso da Sociedade Brasileira de Economia e Sociologia Rural. 2005. Ribeirão Preto: Anais do XLIII Congresso da Sociedade Brasileira de Economia e Sociologia Rural, 2005.

Ojima, A. L. R. O. **Soja: comportamento dos fretes no transporte rodoviário**. Análises e Indicadores do Agronegócio. 1(5), 2006c.

Ojima, A. L. R. O. **Transporte de soja do Estado do Mato Grosso para exportação: uma aplicação de programação linear**. Revista de Economia Agrícola. 54 (1), p 33-41, 2007.

Ojima, A. L. R. O.; Yamakami, A. **Analysis of the logistical movement and competitiveness of soybean in the brazilian center-north region: an application of a spatial equilibrium model with quadratic programming**. In: IV Congresso Internacional de Economia e Gestão de Redes Agroalimentares. 2003. Ribeirão Preto: Anais do IV Congresso Internacional de Economia e Gestão de Redes Agroalimentares, 2003.

Ojima, A. L. R. O.; Yamakami, A. **Aplicação de um modelo de equilíbrio espacial de programação quadrática para questão logística da soja**. Revista Gestão Industrial. 01(3). p 396-405, 2005.

Ojima, A. L. R. O.; YAMAKAMI, A. Modelo de programação quadrática para análise da movimentação logística e comercialização da soja brasileira. **Engenharia Agrícola Jaboticabal**, 26 (2), p. 552-560, 2006.

Oliveira, A. M. K. **Potencial da logística ferroviária para movimentação de açúcar para exportação no Estado de São Paulo: recomendações de localização para armazéns intermodais concentradores de carga.** Dissertação (Mestrado em Economia Aplicada), Universidade de São Paulo – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba, 2005.

Oliveira, E. P. **Modelo conceitual de um sistema de apoio à decisão, para gestores de logística e transporte em canais de exportação agrícola.** 241 p. Tese (Engenharia de Produção) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2007.

Oliveira, N. M.; Santos, H. N. **Agroindústria no estado do Mato Grosso: aplicação de um modelo de localização.** In: 1º Congresso Luso-Brasileiro de Tecnologias de Informação e Comunicação na Agro-Pecuária. 2004. Santarém – Portugal: Anais do APDTICA / SBI – AGRO, 2004.

Oliveira, N. M.; Santos, H. N. **Transporte e localização da agroindústria da soja no estado do Mato Grosso.** 138 p. Dissertação (Economia Aplicada). Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2003.

Oliveira, R. L. M.; Cury, M. V. Q. **A escolha modal no transporte de cargas sob a ótica da modelagem neuro-fuzzy: um estudo de caso.** In: XVIII Congresso de Pesquisa e Ensino de Transportes, 2004. Florianópolis, Anais do XVIII Congresso de Pesquisa e Ensino de Transportes, 2004.

Osaki, M.; Batalha, M. O. **Produção de biodiesel e óleo vegetal no Brasil: realidade e desafio.** In: XLVI Congresso da Sociedade Brasileira de Economia, Administração e Sociologia Rural. 2008. Rio Branco: Anais do Congresso da Sociedade Brasileira de Economia, Administração e Sociologia Rural, 2008.

PAC, Programa de Aceleração do Crescimento. **Secretaria do Programa de Aceleração do Crescimento**. Disponível em <<http://www.planejamento.gov.br/secretaria.asp?sec=61>>. Acesso em 22 Jan. 2012.

Pacheco, R. F.; Silva, A. V. F. **Aplicação de modelos quantitativos de previsão em uma empresa de transporte ferroviário**. In: XXIII Encontro Nac. de Eng. de Produção. 2003. Ouro Preto: Anais do XXIII ENEGEP, 2003.

Padula, A. D.; Santos, E. R., Zot, F. D. **Biodiesel no Rio Grande do Sul: um modelo para sua distribuição e localização de usinas**. In: 4º Congresso do Instituto Franco-Brasileiro de Administração de Empresas. 2007. Porto Alegre: Anais do 4º Congresso do Instituto Franco-Brasileiro de Administração de Empresas, 2007.

Paula, S. R.; Faveret Filho, P. **Panorama do complexo da soja**. Banco Nacional do Desenvolvimento, 1998. Disponível em <<https://web.bndes.gov.br/bib/jspui/handle/1408/2403>>. Acesso em 13 de Setembro de 2012.

Pereira, D. W.; Monteiro, D. P.; Reis, G. C.; Lima, J. M. C; Ribeiro, M. C.; **Logística de transportes do agronegócio**. Disponível em <<http://www.unisalesiano.edu.br/encontro2007/trabalho/aceitos/CC35686949808.pdf>>. Acesso em 13 de Setembro de 2012.

Perera, L. C. J.; Silva, L. N. V.; Viana, P. M.; Silva, T. C. A.; Cavalcanti, T. R. **Competitividade da soja brasileira para exportação**. Cadernos de Pós-Graduação em Administração de Empresas. 3(1). p. 39-58, 2003.

Peres, J. R. R.; Freitas Junior, E.; Gazzoni, D. L. **Biocombustíveis - Uma oportunidade para o agronegócio brasileiro**. Revista de Pesquisa Agrícola. Ano XIV - Nº 1. p. 31-41, 2005.

Pessoa, S. G.; Pereira, B. D. **Mudanças nos modais de transporte: óbice ao desenvolvimento da agroindústria da soja em Mato Grosso?** In: XLIV Congresso da SOBER, 2006. Fortaleza, Anais do XLIV Congresso da SOBER, 2006.

Pimentel, B. S. **Modelos e algoritmos para planejamento integrado na indústria da mineração.** 138 p. Tese (Doutorado em Computação). Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, 2011.

Plá, J. V. J. A. **Existe viabilidade econômica para o biodiesel no Brasil?** Indicadores Econômicos FEE. 32(4). p. 271-294, 2005.

Pochet, Y.; Wolsey, L. A. **Production planning by mixed integer programming.** New York: Springer, 2006.

Poerschke, R. P.; Prieb, R. I. P. **Competitividade do complexo soja brasileiro no contexto do comércio internacional.** In: XLIV Congresso da Sociedade Brasileira de Economia e Sociologia Rural. 2006. Fortaleza: Anais do XLIV Congresso da Sociedade Brasileira de Economia e Sociologia Rural, 2006.

Pontes, H. L. J.; Carmo, B. B. T.; Porto, A. J. V. **Problemas logísticos na exportação brasileira da soja em grão.** Revista Eletrônica Sistemas & Gestão. 4 (2). p 155-181, 2009.

Resende, P. T. V. **Equilíbrio gravitacional entre a logística integrada e o processo de clusterização – a experiência do case de grãos do oeste da Bahia, Brasil.** Revista Internacional de Desenvolvimento Local. 3(4). p 27-34, 2002.

Resende, R. R.; Amaral, M.; Morabito, R. **Seleção de rotas intermodais para exportação da soja em grão brasileira considerando custos e tempos de viagem.** In: Simpósio de Pesquisa Operacional e Logística da Marinha. 2010. Rio de Janeiro: Anais do SPOLM, 2010.

Racunica, I.; Wynter, L. Optimal location of intermodal freight hubs. **Transportation Research Part B**, 39, p 453-477, 2005.

Ribeiro, J. G. B. L. **Mudanças e impactos da Coordenação do Sistema Agroindustrial da soja na região Centro-Oeste Brasileira em decorrência do advento e da difusão da soja transgênica.** 121 p. Dissertação (Mestrado em Agronegócios). Programa de Pós-Graduação em Agronegócios da Universidade de Brasília, Brasília, 2008.

Ribeiro, S.; Mansano, F. H.; Gameiro, A. H.; Lopes, R. L. **Custo do Transporte como Ferramenta de Gerenciamento Logístico para a Soja: o Caso da Rota Maringá – Paranaguá.** Revista ADM.MADE. 13(3). p.87-100, 2009.

Riva, J. C. T.; Vieira Filho, C. C. M.; Valença, A. A. M. P. **Cadeias logísticas de transporte.** Bahia Análise & Dados. 13(2), p. 179-186, 2003.

Rodrigues, F. R. **Escalada tarifária e exportações brasileiras da agroindústria do café e da soja.** Dissertação (Mestrado em Economia Aplicada). 126 p. Universidade de São Paulo – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba, 2009.

Rosa, D. P. **O planejamento de centros logísticos com base na agregação de valor por serviços logísticos em terminais de transporte.** 309 p. Tese (Doutorado em Engenharia de Transportes). COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2005).

Sampaio, L. M. B.; Sampaio, Y.; Costa, E. F. Mudanças políticas recentes e competitividade no mercado internacional da soja. Revista de Economia Rural, 44 (3), p. 383-411, 2006.

Sahling, F.; Buschkühl, L.; Tempelmeier, H.; Helber, S. Solving a multi-level capacited lot sizing problem with multi-period setup carry-over using a fix-and-optimize heuristic. **Computers and Operations Research**, 36(9), p. 2546-2553, 2009.

Sanches, C. A. **Desenvolvimento regional através de clusters produtivos: o caso da agroindústria da soja no Oeste da Bahia.** 184 p. Tese (Doutorado em Administração). Escola de Administração, Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2008.

Santos, A. A.; Montoya, M. A. **A soja transgênica versus a soja convencional: percepção dos agentes econômicos envolvidos.** Texto para discussão. Centro de Pesquisa e Extensão da FEAC da Universidade de Passo Fundo, 2004.

Santos, C. M. **Estudo do Mercado da soja no Brasil, seu transporte via ferrovia e seu escoamento pelo porto de Paranaguá.** 58 p. Monografia (Curso de Tecnologia em Logística).Centro Paula Souza, São Paulo, 2007).

Santos, M. C. E. **Corredor de transporte, um instrumento de gestão do transporte de carga.** In: XVII Encontro Nacional de Engenharia De Produção. 1997. Gramado: Anais do ENEGEP, 1997.

Santos, M. C. E. **Qualidade em serviços portuários.** In: XVIII Encontro Nacional de Engenharia De Produção. 1998. Gramado: Anais do ENEGEP, 1998.

Santos, C. M. dos. **Estudo do mercado de soja no Brasil seu transporte via ferrovia e seu escoamento pelo porto de Paranaguá.** Trabalho de conclusão de curso (Tecnologia em Logística com ênfase em transportes) – Faculdade de Tecnologia da Zona Leste, São Paulo, SP. 58f.

Santos, A. M. D. **A evolução dos preços agrícolas e as bolsas de mercadorias e futuros: um estudo para o mercado da soja em grãos, farelo e óleo no Brasil (1995-2002).** 81 p. Dissertação (Mestrado em Economia). Programa de Pós-Graduação em Economia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2003.

Santos, M. O.; Almada-Lobo, B. **Integrated pulp and paper mill planning and scheduling.** Submetido para publicação, 2011.

Sbadelotto, A.; Leandro, G. V. **Escolha de cultivares de soja com base na composição química dos grãos como perspectiva para maximização dos lucros nas indústrias processadoras.**

Ciência Rural, 38(3), p.614-619, 2009.

Silva, M. C. da. **Governança e coordenação: A função do porto de Paranaguá enquanto influenciador na dinâmica operacional e competitiva na cadeia agroindustrial da soja.**

Dissertação (Mestrado em Administração). Programa de Pós-Graduação em Administração da Universidade Estadual do Paraná. Maringá, 2006.

Silva, M. S. da; Menezes, T. M. **Corredor de escoamento noroeste: alternativa logística para produtores Agrícolas da regiões centro e norte do estado do Mato Grosso.** *Revista em Agronegócios e Meio Ambiente*, 1(1), p. 37-44, 2008.

Silva, W. V. et al. **Co-integração entre os preços da soja cotados nos mercados brasileiro e norte-americano: uma análise empírica.** *Caderno de Pesquisas em Administração*, 10(3), p.

69-78, 2003.

Silva, L.C. **Unidades Armazenadoras: Planejamento e Gerenciamento Otimizado.**

Universidade Federal do Espírito Santo, Departamento de Engenharia Rural, Boletim Técnico, Ag. 01/06, 2006.

Silveira, J. V. F. **Estratégias de segmentação do agronegócio: o caso da inserção da soja**

transgênica no estado do Paraná. 143 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção).

Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, PR, 2005.

Stadtler, H. Multilevel lot sizing with setup times and multiple constrained resources: internally rolling schedules with lot-sizing windows. **Operations Research**, 51(3), p. 487-502, 2003.

Stoffel, K; Hendler, J.; Saltz, J. **High performance support for a very large knowledge bases.**

Proceedings Frontiers of Massively Parallel Computing, 1995.

Suzuki Júnior, J. T.; Wosch, L. F. O. As transformações da infra-estrutura de transporte e o porto de Paranaguá. **Revista Paranaense de Desenvolvimento**, 99, p. 27-43, 2000.

Teixeira, G. V. **Avaliação de perdas qualitativas no armazenamento da soja**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola da Universidade Estadual de Campinas. Campinas, 2001.

Toso, E. A.; Morabito, R.; Clark, A. Lot sizing and sequencing optimization at na animal-feed plant. **Computers and Industrial Engineering**, 57(3), p.813-821, 2009.

Vencovsky, V.P; Castillo, R. **Sistema ferroviário pós-privatização e fluidez corporativa: O movimento de produtos agrícolas no território brasileiro**. GEOUSP - Espaço e Tempo, São Paulo, 21, pp. 119 - 134, 2007.

Vieira, N. de M. **Caracterização da cadeia produtiva da soja em Goiás**. 124 p. Dissertação (mestrado em Engenharia de Produção). Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, 2002.

USDA, United States Department of Agriculture. (2008). **Oilseeds: foreign agriculture service, market and trade data, production, supply and distribution online**. Disponível em: <www.fas.usda.gov>. Acesso em 5 Set. 2008.

Xavier, C. E. O. **Localização de tanques de armazenagem de álcool combustível no Brasil**. Dissertação (Mestrado em Economia Aplicada). Universidade de São Paulo – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba, 2005.

Zotarelli, A; Lugnani, A.C. **O Complexo Agroindustrial da Soja no Paraná: um estudo comparativo com o Centro-Oeste do Brasil**. R. paran. Desenv, Curitiba, 101, p. 33-51, 2001.

APÊNDICE 1

Procedimento Gerador de Exemplos para o Modelo 8

```

/*****/
/*Universidade Federal de São Carlos */
/*Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção */
/* */
/*GERADOR DE INSTÂNCIAS DE TESTES PARA OS MODELOS ESTRATÉGICOS DA TESE */
/* PARA AVALIAÇÃO DE TEMPO COMPUTACIONAL */
/* */
/*Construído por MÔNICA DO AMARAL */
/*Orientador: Reinaldo Morabito Neto */
/* */
/*****/

#include <cstdlib>
#include <iostream>
#include <fstream>
#include <cmath>
#include <conio.h>
#include "Util.h"

using namespace std;

// VARIÁVEIS
int VO = 50; // Número de vértices de oferta
int VI = 50; // Número de vértices intermediários
int Vd = 35; // Número de vértices de demandas internas
int VDD = 15; // Numero de vertices de demanda por exportacao
int VD = Vd + VDD; // Totais de demanda
int m = 3; // Número de modais considerados na rede
int T = 36; // Número de períodos
int Nalfa = 5; // Alternativas - terminais intermodais
int Nbeta = 5; // Alternativas - armazéns
int Nteta = 5; // Alternativas - esmagadoras
int Nphi = 5; // Alternativas - refinarias
int uu = 5000; // Capacidade dos terminais intermodais
int vv = 1000; // Capacidade dos estoques
int ww = 700; // Capacidade de industrializacao

int main(int argc, char *argv[])
{
    // Variáveis auxiliares
    int i, j, k, n, p;
    int *custo, *custo1, *custo2, *custo3, *custo4, *custo5, *custo6, *custo7,
        *u, *v, *vw1, *vw2, *vw3, *lambdal, *lambdall, *lambda_g, *lambda_b;
    int **custo_alfa, **custo1_alfa, **custo2_alfa, **custo3_alfa,
        **custo_beta, **u_alfa, **custo6_teta, **custo7_phi, **u1_alfa,
        **u2_alfa, **u3_alfa, **v_beta, **lambdal_teta, **lambdall_phi, **dG,
        **dF, **dB, **dR;
    custo = cria_vetor(VI);
    custo1 = cria_vetor(VI);
    custo2 = cria_vetor(VI);

```

```

custo3 = cria_vetor(VI);
custo4 = cria_vetor(VI);
custo5 = cria_vetor(VI);
custo6 = cria_vetor(VI);
custo7 = cria_vetor(VI);
u = cria_vetor(VI);
u_alfa = cria_matriz(VI,Nalfa);
u1_alfa = cria_matriz(VI,Nalfa);
u2_alfa = cria_matriz(VI,Nalfa);
u3_alfa = cria_matriz(VI,Nalfa);
v = cria_vetor(VI);
vw1 = cria_vetor(VI);
vw2 = cria_vetor(VI);
vw3 = cria_vetor(VI);
v_beta = cria_matriz(VI,Nbeta);
custo_alfa = cria_matriz(VI,Nalfa);
custo1_alfa = cria_matriz(VI,Nalfa);
custo2_alfa = cria_matriz(VI,Nalfa);
custo3_alfa = cria_matriz(VI,Nalfa);
custo_beta = cria_matriz(VI,Nbeta);
dG = cria_matriz(VD,T);
dF = cria_matriz(VD,T);
dB = cria_matriz(VD,T);
dR = cria_matriz(VD,T);
lambdal = cria_vetor(VI);
lambdall = cria_vetor(VI);
lambda_g = cria_vetor(VI);
lambda_b = cria_vetor(VI);
custo6_teta = cria_matriz(VI,Nteta);
custo7_phi = cria_matriz(VI,Nphi);
lambdal_teta = cria_matriz(VI,Nteta);
lambdall_phi = cria_matriz(VI,Nphi);
// Vértices da Rede
    int *v4;      // Vetor de portas
v4 = cria_vetor(VI);
for (i = 0; i < VI; i++)
    if (double(rand())/RAND_MAX <= 0.4)
        v4[i] = 1;
int *ve;      // Vetor de estoques
ve = cria_vetor(VI);
for (i = 0; i < VI; i++)
    if (double(rand())/RAND_MAX <= 0.8)
        ve[i] = 1;
int *w1; // Vetor de esmagadoras
w1 = cria_vetor(VI);
for (i = 0; i < VI; i++)
    if (double(rand())/RAND_MAX <= 0.5)
        w1[i] = 1;
int *w2; // Vetor de refinarias
w2 = cria_vetor(VI);
for (i = 0; i < VI; i++)
    if (double(rand())/RAND_MAX <= 0.5)
        w2[i] = 1;
int *w3; // Vetor de unidades de esmagamento e refino
w3 = cria_vetor(VI);
for (i = 0; i < VI; i++)
    if (double(rand())/RAND_MAX <= 0.5)

```

```

        w3[i] = 1;
// Arcos da Rede
int **ao; // Ligações das ofertas com a rede rodoviária
ao = cria_matriz(VO,VI);
for (i = 0; i < VO; i++)
    for (j = 0; j < VI; j++)
        if (double(rand())/RAND_MAX <= 0.4)
            ao[i][j] = 1;
int **adr; // Ligações da rede de transporte com as demandas
int **adf;
int **adh;
adr = cria_matriz(VI,Vd);
adf = cria_matriz(VI,Vd);
adh = cria_matriz(VI,Vd);
for (i = 0; i < VI; i++)
    for (j = 0; j < Vd; j++)
    {
        if (double(rand())/RAND_MAX <= 0.5)
            adr[i][j] = 1;
        if (double(rand())/RAND_MAX <= 0.5)
            adf[i][j] = 1;
        if (double(rand())/RAND_MAX <= 0.5)
            adh[i][j] = 1;
    }
int **a1; // Ligacoes da rede rodoviaria
a1 = cria_matriz(VI,VI);
for (i = 0; i < VI; i++)
    for (j = 0; j < VI; j++)
        if (i != j)
            if (double(rand())/RAND_MAX <= 0.7)
                a1[i][j] = 1;
int **a2; // Ligacoes da rede ferroviaria
a2 = cria_matriz(VI,VI);
for (i = 0; i < VI; i++)
    for (j = 0; j < VI; j++)
        if (i != j)
            if (double(rand())/RAND_MAX <= 0.4)
                a2[i][j] = 1;
int **a3; // Ligacoes da rede hidrovitaria
a3 = cria_matriz(VI,VI);
for (i = 0; i < VI; i++)
    for (j = 0; j < VI; j++)
        if (i != j)
            if (double(rand())/RAND_MAX <= 0.4)
                a3[i][j] = 1;
int **a;
int **d;
a = cria_matriz(VO,T); // Oferta de soja nos pontos de origem em cada
período
d = cria_matriz(VD,T); // Demanda de soja nos pontos de destino em cada
período
// Quantidades ofertadas
int M = 0;
int MM;
for (i = 0; i < VO; i++)
    for (j = 0; j < T; j++)
    {

```

```

        a[i][j] = rand()/10;
        M += a[i][j];
    }
// Quantidades demandadas de soja em sistemas só de soja
MM = ceil((0.85*M)/(T*VD));
for (i = 0; i < VD; i++)
    for (j = 0; j < T; j++)
    {
        d[i][j] = MM;
        dG[i][j] = 0.4*d[i][j];
        dF[i][j] = 0.79*dG[i][j];
        dB[i][j] = 0.05*dG[i][j];
        dR[i][j] = 0.11*dG[i][j];
    }
// Calculo das coordenadas dos vertices da rede
int *x;
int *y;
float **D;
x = cria_vetor(VO + m*VI + VD); // Coordenada x de cada ponto da rede
y = cria_vetor(VO + m*VI + VD); // Coordenada y de cada ponto da rede
D = cria_matriz_float(VO + VI + VD, VO + VI + VD); // Distância entre os
pontos da rede
for (i = 0; i < (VO + VI + VD); i++)
{
    x[i] = rand();
    y[i] = rand();
}
for (i = 0; i < (VO + VI + VD); i++)
{
    for (j = 0; j < (VO + VI + VD); j++)
        D[i][j] = sqrt(abs(x[i]-x[j])*abs(x[i]-x[j]) + abs(y[i]-
y[j])*abs(y[i]-y[j]));
}
// Cálculo de custos aleatórios de instalação
// Custo de instalação de portos
for (i = 0; i < VI; i++)
    custo[i] = double(rand())/RAND_MAX*500000;
// Custo de instalação de terminais rodo-ferro
for (i = 0; i < VI; i++)
    custo1[i] = double(rand())/RAND_MAX*200000;
// Custo de instalação de terminais rodo-hidro
for (i = 0; i < VI; i++)
    custo2[i] = double(rand())/RAND_MAX*300000;
// Custo de instalação de um terminal ferro-hidro
for (i = 0; i < VI; i++)
    custo3[i] = double(rand())/RAND_MAX*350000;
// Custo de instalação de estoques
for (i = 0; i < VI; i++)
    custo4[i] = ceil(double(rand())/RAND_MAX*500000);
// Custos e capacidades de instalacao de terminais intermodais para as
alternativas discretas
for (i = 0; i < VI; i++)
{
    u[i] = ceil(double(rand())/RAND_MAX*uu);
    for(j = 0; j < Nalfa; j++) // Portos
    {
        custo_alfa[i][j] = ceil(custo4[i]*(j+1)/Nalfa);
    }
}

```

```

        u_alfa[i][j] = ceil(u[i]*(j+1)/Nalfa);
    }
    for(j = 0; j < Nalfa; j++) // Rodo-ferro
    {
        custo1_alfa[i][j] = ceil(custo4[i]*(j+1)/Nalfa);
        u1_alfa[i][j] = ceil(u[i]*(j+1)/Nalfa);
    }
    for(j = 0; j < Nalfa; j++) // Rodo-hidro
    {
        custo2_alfa[i][j] = ceil(custo4[i]*(j+1)/Nalfa);
        u2_alfa[i][j] = ceil(u[i]*(j+1)/Nalfa);
    }
    for(j = 0; j < Nalfa; j++) // Ferro-hidro
    {
        custo3_alfa[i][j] = ceil(custo4[i]*(j+1)/Nalfa);
        u3_alfa[i][j] = ceil(u[i]*(j+1)/Nalfa);
    }
}
// Custos de instalação de armazéns para as alternativas discretas
for (i = 0; i < VI; i++)
{
    // Capacidades de estoque
    v[i] = ceil(double(rand())/RAND_MAX*vv);
    vw1[i] = ceil(double(rand())/RAND_MAX*vv);
    vw2[i] = ceil(double(rand())/RAND_MAX*vv);
    vw3[i] = ceil(double(rand())/RAND_MAX*vv);
    for(j = 0; j < Nbeta; j++)
    {
        custo_beta[i][j] = ceil(custo4[i]*(j+1)/Nbeta);
        v_beta[i][j] = ceil(v[i]*(j+1)/Nalfa);
    }
}
// Calculo dos custos de instalacao e das capacidades de esmagamento
for(i = 0; i < VI; i++)
{
    custo6[i] = ceil(double(rand())/RAND_MAX*500000);
    lambdal[i] = ceil(double(rand())/RAND_MAX*ww);
    lambda_g[i] = ceil(double(rand())/RAND_MAX*ww);
    lambda_b[i] = ceil(double(rand())/RAND_MAX*ww);
    for(j = 0; j < Nteta; j++) // Portos
    {
        custo6_teta[i][j] = ceil(custo6[i]*(j+1)/Nteta);
        lambdal_teta[i][j] = ceil(lambdal[i]*(j+1)/Nteta);
    }
}
// Calculo dos custos de instalacao e das capacidades de refino
for(i = 0; i < VI; i++)
{
    custo7[i] = ceil(double(rand())/RAND_MAX*500000);
    lambdall[i] = ceil(double(rand())/RAND_MAX*ww);
    for(j = 0; j < Nphi; j++) // Portos
    {
        custo7_phi[i][j] = ceil(custo7[i]*(j+1)/Nphi);
        lambdall_phi[i][j] = ceil(lambdall[i]*(j+1)/Nphi);
    }
}
//*****//

```

```

//                                                                 //
//                               Modelo 8                               //
//                                                                 //
//*****//
// GRAVA A INSTÂNCIA DE TESTE NO ARQUIVO DE DADOS
// Abre arquivo
ofstream dados8;
dados8.open("Dados8.dat");
// Escreve o cabeçalho
dados8 << "# Universidade Federal de São Carlos" << endl;
dados8 << "# Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção" << endl;
dados8 << "# Doutoranda: MONICA DO AMARAL" << endl;
dados8 << "# Orientador: REINALDO MORABITO NETO" << endl << endl << endl;
// Conjunto de pontos de oferta
dados8 << "set VO :=";
for (i = 0; i < VO; i++)
    dados8 << " O" << i+1;
// Conjunto de pontos de destino
dados8 << ";" << endl << endl << "set VD :=";
for (i = 0; i < Vd; i++)
    dados8 << " D" << i+1;
for (i = Vd; i < VD; i++)
    dados8 << " D" << i+1;
// Conjunto de pontos rodoviários
dados8 << ";" << endl << endl << "set V1 :=";
for (i = 0; i < VI; i++)
    dados8 << " R" << i+1;
// Conjunto de pontos ferroviários
dados8 << ";" << endl << endl << "set V2 :=";
for (i = 0; i < VI; i++)
    dados8 << " F" << i+1;
// Conjunto de pontos hidroviários
dados8 << ";" << endl << endl << "set V3 :=";
for (i = 0; i < VI; i++)
    dados8 << " H" << i+1;
// Conjunto de portos
dados8 << ";" << endl << endl << "set V4 :=";
for (i = 0; i < VI; i++)
    if (v4[i] == 1)
        dados8 << " P" << i+1;
// Conjunto de armazéns
dados8 << ";" << endl << endl << "set VE :=";
for (i = 0; i < VI; i++)
    if (ve[i] == 1)
        dados8 << " E" << i+1;
// Conjunto de esmagadoras
dados8 << ";" << endl << endl << "set W1 :=";
for (i = 0; i < VI; i++)
    if (w1[i] == 1)
        dados8 << " e" << i+1;
// Conjunto de refinarias
dados8 << ";" << endl << endl << "set W2 :=";
for (i = 0; i < VI; i++)
    if (w2[i] == 1)
        dados8 << " r" << i+1;
// Conjunto de unidades de esmagamento e refino
dados8 << ";" << endl << endl << "set W3 :=";

```

```

for (i = 0; i < VI; i++)
  if (w3[i] == 1)
    dados8 << " w" << i+1;

// Arcos entre oferta e rede rodoviária
dados8 << ";" << endl << endl << "set AO :=";
for (i = 0; i < VO; i++)
  for (j = 0; j < VI; j++)
    if (ao[i][j] == 1)
      dados8 << " (" << "O" << i + 1 << "," << "R" << j + 1 << ")";
// Arcos entre a rede de transporte e as demandas internas
dados8 << ";" << endl << endl << "set AD :=";
for (i = 0; i < VI; i++)
{
  for (j = 0; j < Vd; j++)
  {
    if (adr[i][j] == 1)
      dados8 << " (" << "R" << i + 1 << "," << "D" << j + 1 << ")";
    if (adf[i][j] == 1)
      dados8 << " (" << "F" << i + 1 << "," << "D" << j + 1 << ")";
    if (adh[i][j] == 1)
      dados8 << " (" << "H" << i + 1 << "," << "D" << j + 1 << ")";
  }
}
// Arcos entre os portos e as demandas externas
for (i = 0; i < VI; i++)
  if (v4[i] == 1)
    for (j = Vd; j < VD; j++)
      dados8 << " (" << "P" << i + 1 << "," << "D" << j + 1 << ")";
// Arcos da rede rodoviária
dados8 << ";" << endl << endl << "set A1 :=";
for (i = 0; i < VI; i++)
  for (j = 0; j < VI; j++)
    if (a1[i][j] == 1)
      dados8 << " (" << "R" << i + 1 << "," << "R" << j + 1 << ")";
// Arcos da rede ferroviaria
dados8 << ";" << endl << endl << "set A2 :=";
for (i = 0; i < VI; i++)
  for (j = 0; j < VI; j++)
    if (a2[i][j] == 1)
      dados8 << " (" << "F" << i + 1 << "," << "F" << j + 1 << ")";
// Arcos da rede hidroviaria
dados8 << ";" << endl << endl << "set A3 :=";
for (i = 0; i < VI; i++)
  for (j = 0; j < VI; j++)
    if (a3[i][j] == 1)
      dados8 << " (" << "H" << i + 1 << "," << "H" << j + 1 << ")";
// Arcos de estoque
dados8 << ";" << endl << endl << "set AE :=";
for (i = 0; i < VI; i++)
  if (ve[i] == 1)
  {
    dados8 << " (" << "R" << i + 1 << "," << "E" << i + 1 << ")";
    dados8 << " (" << "E" << i + 1 << "," << "R" << i + 1 << ")";
  }
// Arcos de unidades industriais
dados8 << ";" << endl << endl << "set AW :=";

```

```

// Esmagadoras
for (i = 0; i < VI; i++)
  if (w1[i] == 1)
  {
    dados8 << " (" << "R" << i + 1 << "," << "e" << i + 1 << ")";
    dados8 << " (" << "e" << i + 1 << "," << "R" << i + 1 << ")";
  }
// Refinarias
for (i = 0; i < VI; i++)
  if (w2[i] == 1)
  {
    dados8 << " (" << "R" << i + 1 << "," << "r" << i + 1 << ")";
    dados8 << " (" << "r" << i + 1 << "," << "R" << i + 1 << ")";
  }
// Unidades de esmagamento e refino
for (i = 0; i < VI; i++)
  if (w3[i] == 1)
  {
    dados8 << " (" << "R" << i + 1 << "," << "w" << i + 1 << ")";
    dados8 << " (" << "w" << i + 1 << "," << "R" << i + 1 << ")";
  }
// Arcos de transbordo
dados8 << ";" << endl << endl << "set AI :=";
for (j = 0; j < VI; j++)
  if (v4[j] == 1)
  {
    // Ligacoes para os portos
    dados8 << " (" << "R" << j + 1 << "," << "P" << j + 1 << ")";
    dados8 << " (" << "F" << j + 1 << "," << "P" << j + 1 << ")";
    dados8 << " (" << "H" << j + 1 << "," << "P" << j + 1 << ")";
  }
// Rodo-ferroviario e Ferro-rodoviario
for (i = 0; i < VI; i++)
  {
    dados8 << " (" << "R" << i + 1 << "," << "F" << i + 1 << ")";
    dados8 << " (" << "F" << i + 1 << "," << "R" << i + 1 << ")";
  }
// Rodo-hidroviario e Hidro-rodoviario
for (i = 0; i < VI; i++)
  {
    dados8 << " (" << "R" << i + 1 << "," << "H" << i + 1 << ")";
    dados8 << " (" << "H" << i + 1 << "," << "R" << i + 1 << ")";
  }
// Ferro-hidroviario e hidro-ferroviario
for (i = 0; i < VI; i++)
  {
    dados8 << " (" << "F" << i + 1 << "," << "H" << i + 1 << ")";
    dados8 << " (" << "H" << i + 1 << "," << "F" << i + 1 << ")";
  }
// Periodos de planejamento
dados8 << ";" << endl << endl << "set T :=";
for (i = 0; i < T; i++)
  dados8 << " " << i + 1;
// Produtos e materias-primas
dados8 << "\n\n\nset P := G F B R;\n\n\nset MP := G B";
// Alternativas discretas de investimento em terminais intermodais
dados8 << ";" << endl << endl << "set Nalfa :=";

```

```

for(i = 0; i < Nalfa; i++)
    dados8 << " alfa" << i + 1;
// Alternativas discretas de investimento em armazens
dados8 << ";" << endl << endl << "set Nbeta :=";
for(i = 0; i < Nbeta; i++)
    dados8 << " beta" << i + 1;
// Alternativas discretas de investimento em esmagadoras
dados8 << ";" << endl << endl << "set Nteta :=";
for(i = 0; i < Nteta; i++)
    dados8 << " teta" << i + 1;
// Alternativas discretas de investimento em refinarias
dados8 << ";" << endl << endl << "set Nphi :=";
for(i = 0; i < Nphi; i++)
    dados8 << " phi" << i + 1;
// Quantidades ofertadas
dados8 << ";" << endl << endl << "param a : ";
for (i = 0; i < T; i++)
    dados8 << "      " << i + 1;
dados8 << " :=";
for (i = 0; i < VO; i++)
{
    dados8 << "\n      0" << i + 1 << "      ";
    for (j = 0; j < T; j++)
        dados8 << a[i][j] << " ";
}
// Quantidades demandadas
dados8 << ";" << endl << endl << "param d := ";
for (i = 0; i < VD; i++)
{
    dados8 << "\n\n['G','" << "D" << i + 1 << "',*] := ";
    for (k = 0; k < T; k++)
        dados8 << k + 1 << "      " << dG[i][k] << "      ";
    dados8 << "\n\n['F','" << "D" << i + 1 << "',*] := ";
    for (k = 0; k < T; k++)
        dados8 << k + 1 << "      " << dF[i][k] << "      ";
    dados8 << "\n\n['B','" << "D" << i + 1 << "',*] := ";
    for (k = 0; k < T; k++)
        dados8 << k + 1 << "      " << dB[i][k] << "      ";
    dados8 << "\n\n['R','" << "D" << i + 1 << "',*] := ";
    for (k = 0; k < T; k++)
        dados8 << k + 1 << "      " << dR[i][k] << "      ";
}
// Custos de transporte e transbordo
dados8 << ";" << endl << endl << "param c := ";
// Custos nos arcos origem-rodovia
for (i = 0; i < VO; i++)
    for (j = 0; j < VI; j++)
        if (ao[i][j] == 1)
            {
                dados8 << "\n\n['G','" << "O" << i + 1 << "', 'R" << j + 1 <<
"',*] := ";
                for (k = 0; k < T; k++)
                    dados8 << k + 1 << "      1200      ";
                dados8 << "\n\n['F','" << "O" << i + 1 << "', 'R" << j + 1 <<
"',*] := ";
                for (k = 0; k < T; k++)
                    dados8 << k + 1 << "      1200      ";
            }

```

```

"',"*] := ";
    dados8 << "\n\n['B','" << "O" << i + 1 << "','R" << j + 1 <<
for (k = 0; k < T; k++)
    dados8 << k + 1 << " 1200 ";
"',"*] := ";
    dados8 << "\n\n['R','" << "O" << i + 1 << "','R" << j + 1 <<
for (k = 0; k < T; k++)
    dados8 << k + 1 << " 1200 ";
}
// Custos nos arcos rodoviaris
for (i = 0; i < VI; i++)
    for (j = 0; j < VI; j++)
        if (a1[i][j] == 1)
            {
"',"*] := ";
                dados8 << "\n\n['G','" << "R" << i + 1 << "','R" << j + 1 <<
for (k = 0; k < T; k++)
                dados8 << k + 1 << " " << D[i][j]*0.1003 << " ";
"',"*] := ";
                dados8 << "\n\n['F','" << "R" << i + 1 << "','R" << j + 1 <<
for (k = 0; k < T; k++)
                dados8 << k + 1 << " " << D[i][j]*0.1003 << " ";
"',"*] := ";
                dados8 << "\n\n['B','" << "R" << i + 1 << "','R" << j + 1 <<
for (k = 0; k < T; k++)
                dados8 << k + 1 << " " << D[i][j]*1.003 << " ";
"',"*] := ";
                dados8 << "\n\n['R','" << "R" << i + 1 << "','R" << j + 1 <<
for (k = 0; k < T; k++)
                dados8 << k + 1 << " " << D[i][j]*1.003 << " ";
            }
// Custos nos arcos ferroviarios
for (i = 0; i < VI; i++)
    for (j = 0; j < VI; j++)
        if (a2[i][j] == 1)
            {
"',"*] := ";
                dados8 << "\n\n['G','" << "F" << i + 1 << "','F" << j + 1 <<
for (k = 0; k < T; k++)
                dados8 << k + 1 << " " << D[i][j]*0.0853 << " ";
"',"*] := ";
                dados8 << "\n\n['F','" << "F" << i + 1 << "','F" << j + 1 <<
for (k = 0; k < T; k++)
                dados8 << k + 1 << " " << D[i][j]*0.0853 << " ";
"',"*] := ";
                dados8 << "\n\n['B','" << "F" << i + 1 << "','F" << j + 1 <<
for (k = 0; k < T; k++)
                dados8 << k + 1 << " " << D[i][j]*0.853 << " ";
"',"*] := ";
                dados8 << "\n\n['R','" << "F" << i + 1 << "','F" << j + 1 <<
for (k = 0; k < T; k++)
                dados8 << k + 1 << " " << D[i][j]*0.853 << " ";
            }
// Custos nos arcos hidroviarios
for (i = 0; i < VI; i++)
    for (j = 0; j < VI; j++)
        if (a3[i][j] == 1)

```

```

    {
        dados8 << "\n\n['G','" << "H" << i + 1 << "','H" << j + 1 <<
"' ,*] := ";
        for (k = 0; k < T; k++)
            dados8 << k + 1 << " " << D[i][j]*0.0463 << " ";
        dados8 << "\n\n['F','" << "H" << i + 1 << "','H" << j + 1 <<
"' ,*] := ";
        for (k = 0; k < T; k++)
            dados8 << k + 1 << " " << D[i][j]*0.0463 << " ";
        dados8 << "\n\n['B','" << "H" << i + 1 << "','H" << j + 1 <<
"' ,*] := ";
        for (k = 0; k < T; k++)
            dados8 << k + 1 << " " << D[i][j]*0.463 << " ";
        dados8 << "\n\n['R','" << "H" << i + 1 << "','H" << j + 1 <<
"' ,*] := ";
        for (k = 0; k < T; k++)
            dados8 << k + 1 << " " << D[i][j]*0.463 << " ";
    }
    // Custos entre a rede de transporte e as demandas
    // Demandas internas
    for (i = 0; i < VI; i++)
    {
        for (j = 0; j < Vd; j++)
        {
            if (adr[i][j] == 1)
            {
                dados8 << "\n\n['G','" << "R" << i + 1 << "','D" << j + 1 <<
"' ,*] := ";
                for (k = 0; k < T; k++)
                    dados8 << k + 1 << " 3.00 ";
                dados8 << "\n\n['F','" << "R" << i + 1 << "','D" << j + 1 <<
"' ,*] := ";
                for (k = 0; k < T; k++)
                    dados8 << k + 1 << " 3.00 ";
                dados8 << "\n\n['B','" << "R" << i + 1 << "','D" << j + 1 <<
"' ,*] := ";
                for (k = 0; k < T; k++)
                    dados8 << k + 1 << " 30.00 ";
                dados8 << "\n\n['R','" << "R" << i + 1 << "','D" << j + 1 <<
"' ,*] := ";
                for (k = 0; k < T; k++)
                    dados8 << k + 1 << " 30.00 ";
            }
            if (adf[i][j] == 1)
            {
                dados8 << "\n\n['G','" << "F" << i + 1 << "','D" << j + 1 <<
"' ,*] := ";
                for (k = 0; k < T; k++)
                    dados8 << k + 1 << " 3.00 ";
                dados8 << "\n\n['F','" << "F" << i + 1 << "','D" << j + 1 <<
"' ,*] := ";
                for (k = 0; k < T; k++)
                    dados8 << k + 1 << " 3.00 ";
                dados8 << "\n\n['B','" << "F" << i + 1 << "','D" << j + 1 <<
"' ,*] := ";
                for (k = 0; k < T; k++)
                    dados8 << k + 1 << " 30.00 ";
            }
        }
    }

```

```

                                dados8 << "\n\n['R','" << "F" << i + 1 << "','D" << j + 1 <<
"',"*] := ";
                                for (k = 0; k < T; k++)
                                    dados8 << k + 1 << " 30.00 ";
                                }
                                if (adh[i][j] == 1)
                                {
                                    dados8 << "\n\n['G','" << "H" << i + 1 << "','D" << j + 1 <<
"',"*] := ";
                                    for (k = 0; k < T; k++)
                                        dados8 << k + 1 << " 3.00 ";
                                    dados8 << "\n\n['F','" << "H" << i + 1 << "','D" << j + 1 <<
"',"*] := ";
                                    for (k = 0; k < T; k++)
                                        dados8 << k + 1 << " 3.00 ";
                                    dados8 << "\n\n['B','" << "H" << i + 1 << "','D" << j + 1 <<
"',"*] := ";
                                    for (k = 0; k < T; k++)
                                        dados8 << k + 1 << " 30.00 ";
                                    dados8 << "\n\n['R','" << "H" << i + 1 << "','D" << j + 1 <<
"',"*] := ";
                                    for (k = 0; k < T; k++)
                                        dados8 << k + 1 << " 30.00 ";
                                }
                            }
                        }
                        // Demandas externas
                        for (i = 0; i < VI; i++)
                            if (v4[i] == 1)
                                for (j = Vd; j < VD; j++)
                                    {
                                        dados8 << "\n\n['G','" << "P" << i + 1 << "','D" << j + 1 <<
"',"*] := ";
                                        for (k = 0; k < T; k++)
                                            dados8 << k + 1 << " 5000.00 ";
                                        dados8 << "\n\n['F','" << "P" << i + 1 << "','D" << j + 1 <<
"',"*] := ";
                                        for (k = 0; k < T; k++)
                                            dados8 << k + 1 << " 5000.00 ";
                                        dados8 << "\n\n['B','" << "P" << i + 1 << "','D" << j + 1 <<
"',"*] := ";
                                        for (k = 0; k < T; k++)
                                            dados8 << k + 1 << " 5000.00 ";
                                        dados8 << "\n\n['R','" << "P" << i + 1 << "','D" << j + 1 <<
"',"*] := ";
                                        for (k = 0; k < T; k++)
                                            dados8 << k + 1 << " 5000.00 ";
                                    }
                        // Custos de transbordo
                        for (j = 0; j < VI; j++)
                            if (v4[j] == 1)
                                {
                                    // Ligacoes para os portos
                                    dados8 << "\n\n['G','" << "R" << j + 1 << "','P" << j + 1 << "','*]
:= ";
                                    for (k = 0; k < T; k++)
                                        dados8 << k + 1 << " 300.00 ";
                                }

```

```

:= ";
    dados8 << "\n\n['F','" << "R" << j + 1 << "','P" << j + 1 << "','*]
for (k = 0; k < T; k++)
    dados8 << k + 1 << " 300.00 ";
dados8 << "\n\n['B','" << "R" << j + 1 << "','P" << j + 1 << "','*]
:= ";
for (k = 0; k < T; k++)
    dados8 << k + 1 << " 300.00 ";
dados8 << "\n\n['R','" << "R" << j + 1 << "','P" << j + 1 << "','*]
:= ";
for (k = 0; k < T; k++)
    dados8 << k + 1 << " 300.00 ";

dados8 << "\n\n['G','" << "F" << j + 1 << "','P" << j + 1 << "','*]
:= ";
for (k = 0; k < T; k++)
    dados8 << k + 1 << " 300.00 ";
dados8 << "\n\n['F','" << "F" << j + 1 << "','P" << j + 1 << "','*]
:= ";
for (k = 0; k < T; k++)
    dados8 << k + 1 << " 300.00 ";
dados8 << "\n\n['B','" << "F" << j + 1 << "','P" << j + 1 << "','*]
:= ";
for (k = 0; k < T; k++)
    dados8 << k + 1 << " 300.00 ";
dados8 << "\n\n['R','" << "F" << j + 1 << "','P" << j + 1 << "','*]
:= ";
for (k = 0; k < T; k++)
    dados8 << k + 1 << " 300.00 ";

dados8 << "\n\n['G','" << "H" << j + 1 << "','P" << j + 1 << "','*]
:= ";
for (k = 0; k < T; k++)
    dados8 << k + 1 << " 300.00 ";
dados8 << "\n\n['F','" << "H" << j + 1 << "','P" << j + 1 << "','*]
:= ";
for (k = 0; k < T; k++)
    dados8 << k + 1 << " 300.00 ";
dados8 << "\n\n['B','" << "H" << j + 1 << "','P" << j + 1 << "','*]
:= ";
for (k = 0; k < T; k++)
    dados8 << k + 1 << " 300.00 ";
dados8 << "\n\n['R','" << "H" << j + 1 << "','P" << j + 1 << "','*]
:= ";
for (k = 0; k < T; k++)
    dados8 << k + 1 << " 300.00 ";
}
// Rodo-ferroviario e Ferro-rodoviario
for (i = 0; i < VI; i++)
{
    dados8 << "\n\n['G','" << "R" << i + 1 << "','F" << i + 1 << "','*] :=
";
for (k = 0; k < T; k++)
    dados8 << k + 1 << " 3.00 ";
dados8 << "\n\n['F','" << "R" << i + 1 << "','F" << i + 1 << "','*] :=
";
for (k = 0; k < T; k++)

```

```

        dados8 << k + 1 << " 3.00 ";
dados8 << "\n\n['B','" << "R" << i + 1 << "','F" << i + 1 << "','*] :=
";
for (k = 0; k < T; k++)
    dados8 << k + 1 << " 30.00 ";
dados8 << "\n\n['R','" << "R" << i + 1 << "','F" << i + 1 << "','*] :=
";
for (k = 0; k < T; k++)
    dados8 << k + 1 << " 30.00 ";
dados8 << "\n\n['G','" << "F" << i + 1 << "','R" << i + 1 << "','*] :=
";
for (k = 0; k < T; k++)
    dados8 << k + 1 << " 3.00 ";
dados8 << "\n\n['F','" << "F" << i + 1 << "','R" << i + 1 << "','*] :=
";
for (k = 0; k < T; k++)
    dados8 << k + 1 << " 3.00 ";
dados8 << "\n\n['B','" << "F" << i + 1 << "','R" << i + 1 << "','*] :=
";
for (k = 0; k < T; k++)
    dados8 << k + 1 << " 30.00 ";
dados8 << "\n\n['R','" << "F" << i + 1 << "','R" << i + 1 << "','*] :=
";
for (k = 0; k < T; k++)
    dados8 << k + 1 << " 30.00 ";
}
// Rodo-hidroviario e Hidro-rodoviario
for (i = 0; i < VI; i++)
{
    dados8 << "\n\n['G','" << "R" << i + 1 << "','H" << i + 1 << "','*] :=
";
for (k = 0; k < T; k++)
    dados8 << k + 1 << " 3.00 ";
dados8 << "\n\n['F','" << "R" << i + 1 << "','H" << i + 1 << "','*] :=
";
for (k = 0; k < T; k++)
    dados8 << k + 1 << " 3.00 ";
dados8 << "\n\n['B','" << "R" << i + 1 << "','H" << i + 1 << "','*] :=
";
for (k = 0; k < T; k++)
    dados8 << k + 1 << " 30.00 ";
dados8 << "\n\n['R','" << "R" << i + 1 << "','H" << i + 1 << "','*] :=
";
for (k = 0; k < T; k++)
    dados8 << k + 1 << " 30.00 ";

    dados8 << "\n\n['G','" << "H" << i + 1 << "','R" << i + 1 << "','*] :=
";
for (k = 0; k < T; k++)
    dados8 << k + 1 << " 3.00 ";
dados8 << "\n\n['F','" << "H" << i + 1 << "','R" << i + 1 << "','*] :=
";
for (k = 0; k < T; k++)
    dados8 << k + 1 << " 3.00 ";
dados8 << "\n\n['B','" << "H" << i + 1 << "','R" << i + 1 << "','*] :=
";
for (k = 0; k < T; k++)

```

```

        dados8 << k + 1 << " 30.00 ";
        dados8 << "\n\n['R','" << "H" << i + 1 << "','R" << i + 1 << "','*] :=
";
        for (k = 0; k < T; k++)
            dados8 << k + 1 << " 30.00 ";
    }
    // Ferro-hidroviario e hidro-ferroviario
    for (i = 0; i < VI; i++)
    {
        dados8 << "\n\n['G','" << "F" << i + 1 << "','H" << i + 1 << "','*] :=
";
        for (k = 0; k < T; k++)
            dados8 << k + 1 << " 3.00 ";
        dados8 << "\n\n['F','" << "F" << i + 1 << "','H" << i + 1 << "','*] :=
";
        for (k = 0; k < T; k++)
            dados8 << k + 1 << " 3.00 ";
        dados8 << "\n\n['B','" << "F" << i + 1 << "','H" << i + 1 << "','*] :=
";
        for (k = 0; k < T; k++)
            dados8 << k + 1 << " 30.00 ";
        dados8 << "\n\n['R','" << "F" << i + 1 << "','H" << i + 1 << "','*] :=
";
        for (k = 0; k < T; k++)
            dados8 << k + 1 << " 30.00 ";

        dados8 << "\n\n['G','" << "H" << i + 1 << "','F" << i + 1 << "','*] :=
";
        for (k = 0; k < T; k++)
            dados8 << k + 1 << " 3.00 ";
        dados8 << "\n\n['F','" << "H" << i + 1 << "','F" << i + 1 << "','*] :=
";
        for (k = 0; k < T; k++)
            dados8 << k + 1 << " 3.00 ";
        dados8 << "\n\n['B','" << "H" << i + 1 << "','F" << i + 1 << "','*] :=
";
        for (k = 0; k < T; k++)
            dados8 << k + 1 << " 30.00 ";
        dados8 << "\n\n['R','" << "H" << i + 1 << "','F" << i + 1 << "','*] :=
";
        for (k = 0; k < T; k++)
            dados8 << k + 1 << " 30.00 ";
    }
    // Custos de entrada e saida nos estoques
    for (i = 0; i < VI; i++)
        if (ve[i] == 1)
        {
            dados8 << "\n\n['G','" << "R" << i + 1 << "','E" << i + 1 << "','*]
:= ";
            for (k = 0; k < T; k++)
                dados8 << k + 1 << " 0.00 ";
            dados8 << "\n\n['F','" << "R" << i + 1 << "','E" << i + 1 << "','*]
:= ";
            for (k = 0; k < T; k++)
                dados8 << k + 1 << " 0.00 ";
            dados8 << "\n\n['B','" << "R" << i + 1 << "','E" << i + 1 << "','*]
:= ";

```

```

for (k = 0; k < T; k++)
  dados8 << k + 1 << " 0.00 ";
dados8 << "\n\n['R','" << "R" << i + 1 << "','E" << i + 1 << "','*]
:= ";

for (k = 0; k < T; k++)
  dados8 << k + 1 << " 0.00 ";
dados8 << "\n\n['G','" << "E" << i + 1 << "','R" << i + 1 << "','*]
:= ";

for (k = 0; k < T; k++)
  dados8 << k + 1 << " 0.00 ";
dados8 << "\n\n['F','" << "E" << i + 1 << "','R" << i + 1 << "','*]
:= ";

for (k = 0; k < T; k++)
  dados8 << k + 1 << " 0.00 ";
dados8 << "\n\n['B','" << "E" << i + 1 << "','R" << i + 1 << "','*]
:= ";

for (k = 0; k < T; k++)
  dados8 << k + 1 << " 0.00 ";
dados8 << "\n\n['R','" << "E" << i + 1 << "','R" << i + 1 << "','*]
:= ";

for (k = 0; k < T; k++)
  dados8 << k + 1 << " 0.00 ";
}
// Custos de entrada e saida nas esmagadoras
for (i = 0; i < VI; i++)
  if (wl[i] == 1)
  {
    dados8 << "\n\n['G','" << "R" << i + 1 << "','e" << i + 1 << "','*]
:= ";

    for (k = 0; k < T; k++)
      dados8 << k + 1 << " 0.00 ";
    dados8 << "\n\n['F','" << "R" << i + 1 << "','e" << i + 1 << "','*]
:= ";

    for (k = 0; k < T; k++)
      dados8 << k + 1 << " 0.00 ";
    dados8 << "\n\n['B','" << "R" << i + 1 << "','e" << i + 1 << "','*]
:= ";

    for (k = 0; k < T; k++)
      dados8 << k + 1 << " 0.00 ";
    dados8 << "\n\n['R','" << "R" << i + 1 << "','e" << i + 1 << "','*]
:= ";

    for (k = 0; k < T; k++)
      dados8 << k + 1 << " 0.00 ";

    dados8 << "\n\n['G','" << "e" << i + 1 << "','R" << i + 1 << "','*]
:= ";

    for (k = 0; k < T; k++)
      dados8 << k + 1 << " 0.00 ";
    dados8 << "\n\n['F','" << "e" << i + 1 << "','R" << i + 1 << "','*]
:= ";

    for (k = 0; k < T; k++)
      dados8 << k + 1 << " 0.00 ";
    dados8 << "\n\n['B','" << "e" << i + 1 << "','R" << i + 1 << "','*]
:= ";

    for (k = 0; k < T; k++)
      dados8 << k + 1 << " 0.00 ";
  }

```

```

:= ";
    dados8 << "\n\n['R','" << "e" << i + 1 << "','R" << i + 1 << "','*]
    for (k = 0; k < T; k++)
        dados8 << k + 1 << " 0.00 ";
    }
    // Custos de entrada e saída nas refinarias
    for (i = 0; i < VI; i++)
        if (w2[i] == 1)
            {
:= ";
                dados8 << "\n\n['G','" << "R" << i + 1 << "','r" << i + 1 << "','*]
                for (k = 0; k < T; k++)
                    dados8 << k + 1 << " 0.00 ";
:= ";
                dados8 << "\n\n['F','" << "R" << i + 1 << "','r" << i + 1 << "','*]
                for (k = 0; k < T; k++)
                    dados8 << k + 1 << " 0.00 ";
:= ";
                dados8 << "\n\n['B','" << "R" << i + 1 << "','r" << i + 1 << "','*]
                for (k = 0; k < T; k++)
                    dados8 << k + 1 << " 0.00 ";
:= ";
                dados8 << "\n\n['R','" << "R" << i + 1 << "','r" << i + 1 << "','*]
                for (k = 0; k < T; k++)
                    dados8 << k + 1 << " 0.00 ";
:= ";
                dados8 << "\n\n['G','" << "r" << i + 1 << "','R" << i + 1 << "','*]
                for (k = 0; k < T; k++)
                    dados8 << k + 1 << " 0.00 ";
:= ";
                dados8 << "\n\n['F','" << "r" << i + 1 << "','R" << i + 1 << "','*]
                for (k = 0; k < T; k++)
                    dados8 << k + 1 << " 0.00 ";
:= ";
                dados8 << "\n\n['B','" << "r" << i + 1 << "','R" << i + 1 << "','*]
                for (k = 0; k < T; k++)
                    dados8 << k + 1 << " 0.00 ";
:= ";
                dados8 << "\n\n['R','" << "r" << i + 1 << "','R" << i + 1 << "','*]
                for (k = 0; k < T; k++)
                    dados8 << k + 1 << " 0.00 ";
            }
    // Custos de entrada e saída nas unidades de esmagamento e refino
    for (i = 0; i < VI; i++)
        if (w3[i] == 1)
            {
:= ";
                dados8 << "\n\n['G','" << "R" << i + 1 << "','w" << i + 1 << "','*]
                for (k = 0; k < T; k++)
                    dados8 << k + 1 << " 0.00 ";
:= ";
                dados8 << "\n\n['F','" << "R" << i + 1 << "','w" << i + 1 << "','*]
                for (k = 0; k < T; k++)
                    dados8 << k + 1 << " 0.00 ";
:= ";
                dados8 << "\n\n['B','" << "R" << i + 1 << "','w" << i + 1 << "','*]
                for (k = 0; k < T; k++)

```

```

        dados8 << k + 1 << " 0.00 ";
dados8 << "\n\n['R','" << "R" << i + 1 << "','w" << i + 1 << "','*]
:= ";
    for (k = 0; k < T; k++)
        dados8 << k + 1 << " 0.00 ";
dados8 << "\n\n['G','" << "w" << i + 1 << "','R" << i + 1 << "','*]
:= ";
    for (k = 0; k < T; k++)
        dados8 << k + 1 << " 0.00 ";
dados8 << "\n\n['F','" << "w" << i + 1 << "','R" << i + 1 << "','*]
:= ";
    for (k = 0; k < T; k++)
        dados8 << k + 1 << " 0.00 ";
dados8 << "\n\n['B','" << "w" << i + 1 << "','R" << i + 1 << "','*]
:= ";
    for (k = 0; k < T; k++)
        dados8 << k + 1 << " 0.00 ";
dados8 << "\n\n['R','" << "w" << i + 1 << "','R" << i + 1 << "','*]
:= ";
    for (k = 0; k < T; k++)
        dados8 << k + 1 << " 0.00 ";
    }
// Custos de instalacao dos terminais intermodais
dados8 << ";" << endl << endl << "param f := ";
for (j = 0; j < VI; j++)
    if (v4[j] == 1)
    {
        // Ligacoes para os portos
        for (p = 0; p < Nbeta; p++)
        {
            dados8 << "\n\n['" << "R" << j + 1 << "','P" << j + 1 <<
"'','alfa" << p + 1 << "','*] := ";
            for (k = 0; k < T; k++)
                dados8 << k + 1 << " " << custo_alfa[j][p] << " ";
            dados8 << "\n\n['" << "F" << j + 1 << "','P" << j + 1 <<
"'','alfa" << p + 1 << "','*] := ";
            for (k = 0; k < T; k++)
                dados8 << k + 1 << " " << custo_alfa[j][p] << " ";
            dados8 << "\n\n['" << "H" << j + 1 << "','P" << j + 1 <<
"'','alfa" << p + 1 << "','*] := ";
            for (k = 0; k < T; k++)
                dados8 << k + 1 << " " << custo_alfa[j][p] << " ";
        }
    }
// Rodo-ferroviario e Ferro-rodoviario
for (i = 0; i < VI; i++)
    {
        for (p = 0; p < Nalfa; p++)
        {
            dados8 << "\n\n['" << "R" << i + 1 << "','F" << i + 1 << "'','alfa"
<< p + 1 << "','*] := ";
            for (k = 0; k < T; k++)
                dados8 << k + 1 << " " << custol_alfa[i][p] << " ";
            dados8 << "\n\n['" << "F" << i + 1 << "','R" << i + 1 << "'','alfa"
<< p + 1 << "','*] := ";
            for (k = 0; k < T; k++)
                dados8 << k + 1 << " " << custol_alfa[i][p] << " ";
        }
    }

```

```

    }
  }
  // Rodo-hidroviario e Hidro-rodoviario
  for (i = 0; i < VI; i++)
  {
    for (p = 0; p < Nalfa; p++)
    {
      dados8 << "\n\n['" << "R" << i + 1 << "', 'H" << i + 1 << "', 'alfa"
<< p + 1 << "',*] := ";
      for (k = 0; k < T; k++)
        dados8 << k + 1 << " " << custo2_alfa[i][p] << " " ;
      dados8 << "\n\n['" << "H" << i + 1 << "', 'R" << i + 1 << "', 'alfa"
<< p + 1 << "',*] := ";
      for (k = 0; k < T; k++)
        dados8 << k + 1 << " " << custo2_alfa[i][p] << " " ;
    }
  }
  // Ferro-hidroviario e hidro-ferroviario
  for (i = 0; i < VI; i++)
  {
    for (p = 0; p < Nalfa; p++)
    {
      dados8 << "\n\n['" << "F" << i + 1 << "', 'H" << i + 1 << "', 'alfa"
<< p + 1 << "',*] := ";
      for (k = 0; k < T; k++)
        dados8 << k + 1 << " " << custo3_alfa[i][p] << " " ;
      dados8 << "\n\n['" << "H" << i + 1 << "', 'F" << i + 1 << "', 'alfa"
<< p + 1 << "',*] := ";
      for (k = 0; k < T; k++)
        dados8 << k + 1 << " " << custo3_alfa[i][p] << " " ;
    }
  }
  // Custos de estoque
  dados8 << ";" << endl << endl << "param h := ";
  for (i = 0; i < VI; i++)
  {
    if (ve[i] == 1)
    {
      dados8 << "\n\n['G', 'E" << i + 1 << "',*] := " ;
      for (j = 0; j < T; j++)
        dados8 << " " << j + 1 << " " << double(rand())/RAND_MAX*5;
      dados8 << "\n\n['F', 'E" << i + 1 << "',*] := " ;
      for (j = 0; j < T; j++)
        dados8 << " " << j + 1 << " " << double(rand())/RAND_MAX*5;
      dados8 << "\n\n['B', 'E" << i + 1 << "',*] := " ;
      for (j = 0; j < T; j++)
        dados8 << " " << j + 1 << " " << double(rand())/RAND_MAX*50;
      dados8 << "\n\n['R', 'E" << i + 1 << "',*] := " ;
      for (j = 0; j < T; j++)
        dados8 << " " << j + 1 << " " << double(rand())/RAND_MAX*50;
    }
    if (w1[i] == 1)
    {
      dados8 << "\n\n['G', 'e" << i + 1 << "',*] := " ;
      for (j = 0; j < T; j++)
        dados8 << " " << j + 1 << " " << double(rand())/RAND_MAX*5;
      dados8 << "\n\n['F', 'e" << i + 1 << "',*] := " ;
    }
  }

```

```

for (j = 0; j < T; j++)
    dados8 << " " << j + 1 << " " << double(rand())/RAND_MAX*5;
dados8 << "\n\n['B','e" << i + 1 << "','*] := " ;
for (j = 0; j < T; j++)
    dados8 << " " << j + 1 << " " << double(rand())/RAND_MAX*50;
dados8 << "\n\n['R','e" << i + 1 << "','*] := " ;
for (j = 0; j < T; j++)
    dados8 << " " << j + 1 << " " << double(rand())/RAND_MAX*50;
}
if (w2[i] == 1)
{
    dados8 << "\n\n['G','r" << i + 1 << "','*] := " ;
    for (j = 0; j < T; j++)
        dados8 << " " << j + 1 << " " << double(rand())/RAND_MAX*5;
    dados8 << "\n\n['F','r" << i + 1 << "','*] := " ;
    for (j = 0; j < T; j++)
        dados8 << " " << j + 1 << " " << double(rand())/RAND_MAX*5;
    dados8 << "\n\n['B','r" << i + 1 << "','*] := " ;
    for (j = 0; j < T; j++)
        dados8 << " " << j + 1 << " " << double(rand())/RAND_MAX*50;
    dados8 << "\n\n['R','r" << i + 1 << "','*] := " ;
    for (j = 0; j < T; j++)
        dados8 << " " << j + 1 << " " << double(rand())/RAND_MAX*50;
}
if (w3[i] == 1)
{
    dados8 << "\n\n['G','w" << i + 1 << "','*] := " ;
    for (j = 0; j < T; j++)
        dados8 << " " << j + 1 << " " << double(rand())/RAND_MAX*5;
    dados8 << "\n\n['F','w" << i + 1 << "','*] := " ;
    for (j = 0; j < T; j++)
        dados8 << " " << j + 1 << " " << double(rand())/RAND_MAX*5;
    dados8 << "\n\n['B','w" << i + 1 << "','*] := " ;
    for (j = 0; j < T; j++)
        dados8 << " " << j + 1 << " " << double(rand())/RAND_MAX*50;
    dados8 << "\n\n['R','w" << i + 1 << "','*] := " ;
    for (j = 0; j < T; j++)
        dados8 << " " << j + 1 << " " << double(rand())/RAND_MAX*50;
}
}
// Custos de instalar os estoques
dados8 << ";" << endl << endl << "param H := ";
for (i = 0; i < VI; i++)
{
    for (j = 0; j < Nbeta; j++)
    {
        if (ve[i] == 1)
        {
            dados8 << "\n\n['" << "E" << i + 1 << "','beta" << j + 1 <<
"',*] := ";
            for (k = 0; k < T; k++)
                dados8 << k + 1 << " " << custo_beta[i][j] << " ";
        }
        if (w1[i] == 1)
        {
            dados8 << "\n\n['" << "e" << i + 1 << "','beta" << j + 1 <<
"',*] := ";

```

```

        for (k = 0; k < T; k++)
            dados8 << k + 1 << " " << custo_beta[i][j] << " ";
    }
    if (w2[i] == 1)
    {
        dados8 << "\n\n[" << "r" << i + 1 << ", 'beta" << j + 1 <<
";
        for (k = 0; k < T; k++)
            dados8 << k + 1 << " " << custo_beta[i][j] << " ";
    }
}
// Capacidades dos terminais intermodais
dados8 << ";" << endl << endl << "param u :=";
for (j = 0; j < VI; j++)
    if (v4[j] == 1)
    {
        // Ligacoes para os portos
        dados8 << "\n\n[" << "R" << j + 1 << ", 'P" << j + 1 << ",*] :=
";
        for (k = 0; k < Nalfa; k++)
            dados8 << " alfa" << k + 1 << " " << u_alfa[j][k] << " ";
        dados8 << "\n\n[" << "F" << j + 1 << ", 'P" << j + 1 << ",*] :=
";
        for (k = 0; k < Nalfa; k++)
            dados8 << " alfa" << k + 1 << " " << u_alfa[j][k] << " ";
        dados8 << "\n\n[" << "H" << j + 1 << ", 'P" << j + 1 << ",*] :=
";
        for (k = 0; k < Nalfa; k++)
            dados8 << " alfa" << k + 1 << " " << u_alfa[j][k] << " ";
    }
// Rodo-ferroviario e Ferro-rodoviario
for (i = 0; i < VI; i++)
{
    dados8 << "\n\n[" << "R" << i + 1 << ", 'F" << i + 1 << ",*] := ";
    for (k = 0; k < Nalfa; k++)
        dados8 << " alfa" << k + 1 << " " << u1_alfa[i][k] << " ";
    dados8 << "\n\n[" << "F" << i + 1 << ", 'R" << i + 1 << ",*] := ";
    for (k = 0; k < Nalfa; k++)
        dados8 << " alfa" << k + 1 << " " << u1_alfa[i][k] << " ";
}
// Rodo-hidroviario e Hidro-rodoviario
for (i = 0; i < VI; i++)
{
    dados8 << "\n\n[" << "R" << i + 1 << ", 'H" << i + 1 << ",*] := ";
    for (k = 0; k < Nalfa; k++)
        dados8 << " alfa" << k + 1 << " " << u2_alfa[i][k] << " ";
    dados8 << "\n\n[" << "H" << i + 1 << ", 'R" << i + 1 << ",*] := ";
    for (k = 0; k < Nalfa; k++)
        dados8 << " alfa" << k + 1 << " " << u2_alfa[i][k] << " ";
}
// Ferro-hidroviario e hidro-ferroviario
for (i = 0; i < VI; i++)
{
    dados8 << "\n\n[" << "F" << i + 1 << ", 'H" << i + 1 << ",*] := ";
    for (k = 0; k < Nalfa; k++)
        dados8 << " alfa" << k + 1 << " " << u3_alfa[i][k] << " ";
}

```

```

    dados8 << "\n\n['" << "H" << i + 1 << "', 'F" << i + 1 << "',*] := ";
    for (k = 0; k < Nalfa; k++)
        dados8 << " alfa" << k + 1 << " " << u3_alfa[i][k] << " ";
}
// Capacidades de estoque
dados8 << ";" << endl << endl << "param v : ";
for (i = 0; i < Nbeta; i++)
    dados8 << " beta" << i + 1;
dados8 << " :=";
for (i = 0; i < VI; i++)
{
    if (ve[i] == 1)
    {
        dados8 << "\n          E" << i + 1 << " ";
        for (j = 0; j < Nbeta; j++)
            dados8 << v_beta[i][j] << " ";
    }
    if (w1[i] == 1)
    {
        dados8 << "\n          e" << i + 1 << " ";
        for (j = 0; j < Nbeta; j++)
            dados8 << v_beta[i][j] << " ";
    }
    if (w2[i] == 1)
    {
        dados8 << "\n          r" << i + 1 << " ";
        for (j = 0; j < Nbeta; j++)
            dados8 << v_beta[i][j] << " ";
    }
}
dados8 << ";\n\nparam vw3 default 10000;\n\nparam s0 default 0";
dados8 << ";" << endl << endl << "param g := ";
for (i = 0; i < VI; i++)
{
    if (w1[i] == 1)
    {
        dados8 << "\n\n['G', 'e" << i + 1 << "',*] := ";
        for (j = 0; j < T; j++)
            dados8 << " " << j + 1 << " " << double(rand())/RAND_MAX*200;
        dados8 << "\n\n['B', 'e" << i + 1 << "',*] := ";
        for (j = 0; j < T; j++)
            dados8 << " " << j + 1 << " " << double(rand())/RAND_MAX*750;
    }
    if (w2[i] == 1)
    {
        dados8 << "\n\n['G', 'r" << i + 1 << "',*] := ";
        for (j = 0; j < T; j++)
            dados8 << " " << j + 1 << " " << double(rand())/RAND_MAX*200;
        dados8 << "\n\n['B', 'r" << i + 1 << "',*] := ";
        for (j = 0; j < T; j++)
            dados8 << " " << j + 1 << " " << double(rand())/RAND_MAX*750;
    }
    if (w3[i] == 1)
    {
        dados8 << "\n\n['G', 'w" << i + 1 << "',*] := ";
        for (j = 0; j < T; j++)
            dados8 << " " << j + 1 << " " << double(rand())/RAND_MAX*200;
    }
}

```

```

dados8 << "\n\n['B','w" << i + 1 << "','*] := ";
for (j = 0; j < T; j++)
    dados8 << " " << j + 1 << " " << double(rand())/RAND_MAX*750;
}
}

// Custos de instalar uma esmagadora
dados8 << ";" << endl << endl << "param G1 := ";
for (i = 0; i < VI; i++)
    if (w1[i] == 1)
    {
        for (k = 0; k < Nteta; k++)
        {
            dados8 << "\n\n['e" << i + 1 << "','teta" << k + 1 << "','*] := "
;

            for (j = 0; j < T; j++)
                dados8 << " " << j + 1 << " " << custo6_teta[i][k];
        }
    }

// Custos de instalar uma refinaria
dados8 << ";" << endl << endl << "param G11 := ";
for (i = 0; i < VI; i++)
    if (w2[i] == 1)
    {
        for (k = 0; k < Nphi; k++)
        {
            dados8 << "\n\n['r" << i + 1 << "','phi" << k + 1 << "','*] := "
;

            for (j = 0; j < T; j++)
                dados8 << " " << j + 1 << " " << custo7_phi[i][k];
        }
    }

// Capacidades nas esmagadoras
dados8 << ";" << endl << endl << "param lambdal := ";
for (i = 0; i < VI; i++)
    if (w1[i] == 1)
        for (j = 0; j < Nteta; j++)
            dados8 << endl << endl << "[*, 'e" << i + 1 << "','teta" << j +
1 << "'" := G    " << lambdal_teta[i][j] << "    B    0";
// Capacidades nas refinarias
dados8 << ";" << endl << endl << "param lambdall := ";
for (i = 0; i < VI; i++)
    if (w2[i] == 1)
        for (j = 0; j < Nphi; j++)
            dados8 << endl << endl << "[*, 'r" << i + 1 << "','phi" << j + 1
<< "'" := G    0    B    " << lambdall_phi[i][j];

dados8 << ";" << endl << endl << "param lambda : ";
for (i = 0; i < VI; i++)
    if (w3[i] == 1)
        dados8 << "    w" << i + 1;
dados8 << " :=\n    G";
for (i = 0; i < VI; i++)
{
    if (w3[i] == 1)
        dados8 << "    " << lambda_g[i];
}
}

```

```
dados8 << "\n          B";
for (i = 0; i < VI; i++)
{
  if (w3[i] == 1)
    dados8 << "          " << lambda_b[i];
}
dados8 << "; \n \n param alfa := \n          F 0.78 \n          B
0.22 \n          R 1.00;";
dados8 << "\n \n end;";
dados8.close();
```