

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA E
INFORMÁTICA INDUSTRIAL

RONI FABIO BANASZEWSKI

MODELO MULTIAGENTES BASEADO EM UM PROTOCOLO DE
LEILÕES SIMULTÂNEOS PARA APLICAÇÃO NO PROBLEMA DE
PLANEJAMENTO DE TRANSFERÊNCIAS DE PRODUTOS NO
SEGMENTO *DOWNSTREAM* DO SISTEMA LOGÍSTICO BRASILEIRO
DE PETRÓLEO

TESE

CURITIBA

2014

RONI FABIO BANASZEWSKI

**MODELO MULTIAGENTES BASEADO EM UM PROTOCOLO DE
LEILÕES SIMULTÂNEOS PARA APLICAÇÃO NO PROBLEMA DE
PLANEJAMENTO DE TRANSFERÊNCIAS DE PRODUTOS NO
SEGMENTO *DOWNSTREAM* DO SISTEMA LOGÍSTICO BRASILEIRO
DE PETRÓLEO**

Tese de doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial da Universidade Tecnológica Federal do Paraná como requisito parcial para a obtenção do título de Doutor em Ciências – Área de Concentração: Engenharia da Computação.

Orientador: Prof. Dr. Cesar Augusto Tacla
Coorientador: Prof. Dr. Jean Marcelo Simão

CURITIBA

2014

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação

B212 Banaszewski, Roni Fabio
Modelo multiagentes baseado em um protocolo de leilões simultâneos para aplicação no problema de planejamento de transferências de produtos no segmento *downstream* do sistema logístico brasileiro de petróleo / Roni Fabio Banaszewski. – 2014.
325 p. : il. ; 30 cm

Orientador: Cesar Augusto Tacla.
Coorientador: Jean Marcelo Simão.
Tese (Doutorado) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial. Curitiba, 2014.
Bibliografia: p. 269-279.

1. Petróleo – Derivados – Transporte. 2. Sistemas multiagentes. 3. Leilões – Modelos matemáticos. 4. Logística empresarial – Planejamento. 5. Processo decisório. 6. Software – Desenvolvimento. 7. Métodos de simulação. 8. Engenharia elétrica – Teses. I. Tacla, Cesar Augusto, orient. II. Simão, Jean Marcelo, coorient. III. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial. IV. Título.

CDD (22. ed.) 621.3

Biblioteca Central da UTFPR, Campus Curitiba

Título da Tese Nº. 94

“Modelo multiagentes baseado em um protocolo de leilões simultâneos para aplicação no problema de planejamento de transferências de produtos no segmento downstream do sistema logístico brasileiro de petróleo”

por

Roni Fabio Banaszewski

Orientador: Prof. Dr. Cesar Augusto Tacla

Esta tese foi apresentada como requisito parcial à obtenção do grau de DOUTOR EM CIÊNCIAS – Área de Concentração: Engenharia de Computação, pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial – CPGEI – da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, às 09h do dia 10 de fevereiro de 2014. O trabalho foi aprovado pela Banca Examinadora, composta pelos doutores:

Prof. Dr. Cesar Augusto Tacla
(Presidente – UTFPR)

Prof.^a Dr.^a Ana Paula Barbosa Póvoa
(IST – Portugal)

Prof. Dr. Fabrício Enembreck
(PUCPR)

Prof. Dr. Luiz Carlos Felizari
(IFPR)

Prof.^a Dr.^a Lúcia Valéria Ramos de Arruda
(UTFPR)

Visto da Coordenação:

Prof. Ricardo Lüders, Dr.
(Coordenador do CPGEI)

Adendo: onde se lê Roni Fabio Banaszewski, leia-se Roni Fabio Banaszewski

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus pela vida, pela saúde e pela perseverança concedida, tais elementos permitiram-me concluir mais este trabalho. Agradeço também a todas as pessoas que se fizeram presentes, que se preocuparam e me auxiliaram com atos ou pensamentos.

Agradeço especialmente a minha família, a qual merece caras palavras. Obrigado pelo apoio sentimental e material que foi a minha força para concluir mais esta etapa. Agradeço aos meus pais especialmente pela vida e a educação concedida e aos meus irmãos pelo apoio e a amizade sempre verdadeira.

Reconheço que agradecer é um ato muito difícil. Todos os que concluíram um doutorado sabem que não o fizeram sozinhos. Os resultados dos trabalhos realizados não se devem apenas ao seu autor, mas também aos esforços e conhecimentos empregados por outras pessoas que contribuíram de alguma forma para a obtenção dos resultados. Desta forma, reconheço que este trabalho não é só meu, mas também dos autores que li, dos professores com quem tive aulas na graduação e pós-graduação e principalmente dos meus orientadores.

Quero agradecer especialmente ao meu orientador Prof. Dr. Cesar Augusto Tacla por todos os ensinamentos, direcionamentos, incentivos e pelo tempo despendido nas leituras e sugestões sobre os meus trabalhos. Também, agradeço pela confiança depositada em mim por ter me concedido a oportunidade de cumprir mais esta etapa da minha vida.

Também agradeço ao meu coorientador Prof. Dr. Jean Marcelo Simão por todos os conselhos e ensinamentos desde o mestrado e pelas horas despendidas nas leituras dos meus trabalhos. Certamente, suas sugestões e opiniões sempre valiosas e bem colocadas contribuíram significativamente para a conclusão deste trabalho.

Outrossim, agradeço à Prof.^a Dr.^a Ana Paula Barbosa Póvoa e a Prof.^a Dr.^a Susana Relvas pelas sugestões e conselhos de pesquisa durante o período de estágio em Portugal e por todo o acompanhamento do meu trabalho. Em especial, agradeço à Prof.^a Ana pela presença de grande mérito em minha banca de defesa de doutorado.

Igualmente, agradeço à Prof.^a Dr.^a Lúcia Valéria de Arruda, ao Prof. Dr. Fabrício Enembrek e ao Prof. Dr. Luiz Carlos Felizari por terem aceitado o convite para compor a banca de defesa desta tese. Tive a honra de contar com os senhores na composição desta banca.

Por fim, agradeço a todos os colegas que, direta ou indiretamente, contribuíram para a concepção deste trabalho e também à CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) pelo apoio financeiro e à UTFPR/CPGEI/LSI (Laboratório de Sistemas Inteligentes) e Petrobras por todo o suporte oferecido durante o desenvolvimento deste trabalho.

RESUMO

BANASZEWSKI, Roni Fabio, Modelo multiagentes baseado em um protocolo de leilões simultâneos para aplicação no problema de planejamento de transferências de produtos no segmento *downstream* do sistema logístico brasileiro de petróleo. 325f. Tese – Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2014.

O segmento *downstream* da cadeia de suprimentos da indústria brasileira de petróleo é composta por bases de produção (e.g. refinarias), armazenamento (e.g. terminais) e consumo (e.g. mercados consumidores) e modais de transportes (e.g. oleodutos, navios, caminhões e trens). O planejamento da transferência de derivados de petróleo nesta rede multimodal é um problema complexo e atualmente é realizado para um horizonte de três meses com base na experiência de profissionais e sem auxílio de um sistema computacional de apoio à decisão. Basicamente, o problema pode ser visto como uma negociação para alocação de recursos disponíveis (tais como derivados de petróleo, tanques e modais de transporte) pelas diferentes bases envolvidas que necessitam enviar ou receber derivados de petróleo. Na literatura, alguns problemas semelhantes, porém mais voltados para o planejamento de redes formadas por um único tipo de modal de transporte, têm sido tratados por diferentes abordagens, com predominância da programação matemática. Estes trabalhos ilustram a difícil tarefa de modelar grandes problemas por meio desta abordagem. Geralmente, tais trabalhos consideram apenas um curto horizonte de planejamento ou apenas uma parte do problema original, tal como uma parte da rede petrolífera brasileira, gerando limitações importantes para os modelos desenvolvidos. Devido às características do problema em estudo, o qual envolve toda a rede de transporte e apresenta perfil de negociação entre as diferentes entidades envolvidas, surge o interesse da utilização do paradigma de sistemas multiagente. O paradigma de agentes tem sido aplicado a problemas de diferentes contextos, particularmente em problemas de gerenciamento de cadeias de suprimentos devido à sua correspondência natural com a realidade e, em geral, em problemas que envolvem a competição por recursos por meio de mecanismos de negociação com base em leilões. Este trabalho apresenta um novo protocolo de negociação baseado em leilões e aplicação deste protocolo em forma de um modelo multiagente na resolução do problema de planejamento em questão. Os agentes que formam a solução representam principalmente os locais de produção, armazenamento, consumo e os modais de transporte na rede petrolífera brasileira. O objetivo destes agentes é manter um nível de estoque diário factível de cada produto em cada local por meio de transferências de produtos pela rede petrolífera brasileira com preferível redução do custo de transporte. Por fim, este trabalho apresenta a satisfação destes objetivos por meio de experimentos em cenários fictícios e reais da rede brasileira de petróleo.

Palavras-chave: multiagente, leilão, planejamento, derivados de petróleo, transporte.

ABSTRACT

BANASZEWSKI, Roni Fabio, Multiagent model based on simultaneous auction protocol for application in the planning problem of transference of products in the *downstream* segment of the Brazilian petroleum logistic system. 325f. Tese – Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2014.

The Brazilian oil supply chain is composed by oil refineries, consumer markets, terminals for intermediary storage and several transportation modals, such as pipelines, ships, trucks and trains. The transportation planning of oil products in this multimodal network is a complex problem that is currently performed manually based on expertise, for a period of three months, due to the lack of a *software* system to cover the problem complexity. Such problem involves the negotiation of available resources such as oil products, tanks and transportation modals between different sources and consumption points. Similar problems, but more directed to the planning of single modes of transportation, have been treated by different approaches, mainly mathematical programming. Such works illustrate the difficult task of modeling large problems with this mechanism. Generally, they consider a short horizon planning or only part of the original problem, such as a part of the network, rendering important limitations to the models developed. Due to the characteristics of the problem in study where the full network needs to be considered and there exists negotiation amongst the different entities involved, the usage of multi-agent models seems to be worth to explore. Such models have been applied in different contexts such as to supply chain problems due its natural correspondence with the reality. Furthermore, in problems involving competition for resources, multi-agents negotiation mechanisms based on auctions are commonly applied. Thus, this thesis presents one auction-based solution formed by the cooperation among agents for them to achieve their goals. The agents involved in the auctions represent mainly the production, storage and consumption locations. Their goal is to maintain a daily suitable inventory level for each product by means of transportation through the multimodal network at a low transport cost. Finally, this paper presents the satisfaction of these objectives through experiments on real and fictional scenarios of Brazilian oil network.

Keywords: multi-agent, auction, planning, oil derivatives, transport.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – CADEIA PRODUTIVA DA PETROBRAS.....	28
FIGURA 2 – ETAPAS DO PROCESSO DE TOMADA DE DECISÃO	40
FIGURA 3 – MATRIZ DE PLANEJAMENTO DE UMA CADEIA DE SUPRIMENTOS (ROHDE; MEYR; WAGNER, 2000)	41
FIGURA 4 – TOPOLOGIA APROXIMADA DA MALHA MULTIMODAL PETROLÍFERA BRASILEIRA DE TRANSPORTE	44
FIGURA 5 – TIPOS DE TANQUES. A) TANQUE CILÍNDRICO COM TETO FLUTUANTE, B) TANQUE CILÍNDRICO COM TETO FIXO E C) TANQUE ESFÉRICO COM TETO FIXO.	47
FIGURA 6 – FAIXAS DE ESTOQUE DE UM ÚNICO TANQUE.....	47
FIGURA 7 – OPERAÇÃO PULMÃO E DE PASSAGEM (FELIZARI, 2009).....	50
FIGURA 8 – DESMEMBRAMENTO DO HORIZONTE E DISCRETIZAÇÃO TEMPORAL EM DIAS.....	55
FIGURA 9 – ORGANIZAÇÃO DE PRODUTOS EM GRUPOS DE PRODUTOS.....	56
FIGURA 10 – ORGANIZAÇÃO DOS DADOS REFERENTES A PRODUTOS EM UMA BASE.....	56
FIGURA 11 – FORMAÇÃO DA CURVA DE ESTOQUE.....	58
FIGURA 12 – ORGANIZAÇÃO DOS DADOS DOS FLUXOS EM TRÂNSITO E COMPROMETIDOS	60
FIGURA 13 – ORGANIZAÇÃO DOS DADOS DE DEGRADAÇÃO DE PRODUTOS.....	60
FIGURA 14 – ORGANIZAÇÃO DOS DADOS REFERENTES AOS GRUPOS DE PRODUTOS EM UMA BASE	62
FIGURA 15 – ABSTRAÇÃO DA CAPACIDADE DE ARMAZENAMENTO.....	64
FIGURA 16 – COMPARTILHAMENTO DO TANQUE PELAS CURVAS DE ESTOQUE ..	66
FIGURA 17 – ORGANIZAÇÃO DOS DADOS REFERENTES AOS GRUPOS DE PRODUTOS EM UMA BASE	68
FIGURA 18 – ORGANIZAÇÃO DOS DADOS E RELAÇÃO ENTRE OS NÍVEIS INTER- REGIÃO E INTRARREGIÃO	71
FIGURA 19 – DESMEMBRAMENTO TOPOLÓGICO EM NÍVEL INTER-REGIÃO E INTRARREGIÃO	74

FIGURA 20 – ESTRUTURA DE APRESENTAÇÃO DA SOLUÇÃO	80
FIGURA 21 – XMLS DE ENTRADA E SAÍDA NO PLANEJAMENTO MULTINÍVEL ...	82
FIGURA 22 – PROTOCOLO CONTRACT-NET.....	112
FIGURA 23 – PROTOCOLO CONTRACT-NET ITERATIVO	116
FIGURA 24 – PROTOCOLO CONTRACT-NET BASEADO EM NORMAS.....	119
FIGURA 25 – EXTENSÕES AO PROTOCOLO CONTRACT-NET POR MEIO DE INTERAÇÕES DE CONFIRMAÇÃO. A) PROTOCOLO CONTRACT-NET COM CONFIRMAÇÃO. B) PROTOCOLO CONTRACT-NET HOLÔNICO COM CONFIRMAÇÃO.....	122
FIGURA 26 – NEGOCIAÇÃO EM CASCATA	123
FIGURA 27 – EXTENSÃO AO CONTRACT-NET COM NEGOCIAÇÕES TEMPORÁRIAS E DEFINITIVAS	126
FIGURA 28 – PROTOCOLO CONTRACT-NET COMPETITIVO. A) PROTOCOLO DA FASE DE FORMAÇÃO DE CONTRATOS. B) PROTOCOLO DAS FASES DE CANCELAMENTO DE ACORDOS E FINALIZAÇÃO.	130
FIGURA 29 – PLATAFORMA FIPA	137
FIGURA 30 – DIAGRAMA DE SEQUÊNCIA DO PROTOCOLO PROPOSTO	142
FIGURA 31 – ESTRUTURA DE CLASSE DOS AGENTES DO MODELO	149
FIGURA 32 – INICIALIZAÇÃO E CRIAÇÃO DOS AGENTES.....	152
FIGURA 33 – REPRESENTAÇÃO DAS CAPACIDADES DE ESTOQUE DO GRUPO (À ESQUERDA) E PARTICULARES DOS PRODUTOS DESTES GRUPO (À DIREITA)	154
FIGURA 34 – INTERAÇÕES ENTRE OS AGENTES DO MODELO CONFORME AS DIRETIVAS DO PROTOCOLO PROPOSTO	158
FIGURA 35 – EXEMPLO GRÁFICO DO VOLUME REFERENTE AOS VETORES DE ANÚNCIO	161
FIGURA 36 – ESTRUTURA DO VETOR DE ANÚNCIO INCREMENTAL EM RELAÇÃO AOS PERÍODOS	162
FIGURA 37 – DIAGRAMA DE ATIVIDADES DE TRATAMENTO DO CFP.....	164
FIGURA 38 – LOOP DE MOVIMENTAÇÃO DE PRODUTOS.....	168
FIGURA 39 – DEFINIÇÃO DO VOLUME DESEJADO E VOLUME MÁXIMO	173
FIGURA 40 – EXEMPLO DE JANELA DE TEMPO DE ESCOAMENTO	177
FIGURA 41 – ESPAÇOS OCIOSOS PARA ARMAZENAMENTO EM TANQUE.....	179

FIGURA 42 – SIMULAÇÃO DE UMA MOVIMENTAÇÃO EM UMA ROTA COMPOSTA POR DUTOS.....	182
FIGURA 43 – GRAU DE URGÊNCIA DE ESTOQUE EM RELAÇÃO AO DIA DE VIOLAÇÃO DA CAPACIDADE OPERACIONAL	185
FIGURA 44 – DIAGRAMA DE SEQUÊNCIA DE UM LEILÃO DE REPASSE.....	188
FIGURA 45 – CENÁRIO DE EXEMPLO DE LEILÕES DE REPASSE.....	190
FIGURA 46 – TRATAMENTO DE UMA MENSAGEM DE ACEITE.....	193
FIGURA 47 – FINALIZAÇÃO DO SISTEMA.....	197
FIGURA 48 – EXEMPLO DE OPERAÇÃO DE DEGRADAÇÃO	200
FIGURA 49 – CENÁRIO FICTÍCIO DE TRANSBORDO E SOBREESTADIA	203
FIGURA 50 – EXEMPLO DE UM LEILÃO DE REPASSE E NORMAL EM UMA OPERAÇÃO DE SOBREESTADIA	206
FIGURA 51 – DISTRIBUIÇÃO DOS AGENTES	208
FIGURA 52 – TOPOLOGIA DO CENÁRIO 1	215
FIGURA 53 – CURVAS DE ESTOQUE INICIAIS DO CENÁRIO 1	216
FIGURA 54 – CURVAS DE ESTOQUE FINAIS DO CENÁRIO 1	217
FIGURA 55 – MOVIMENTAÇÕES AGREGADAS POR PERÍODO NO CENÁRIO 1	218
FIGURA 56 – TOPOLOGIA DE CENÁRIO 2.....	219
FIGURA 57 – CURVAS DE ESTOQUE INICIAIS DO CENÁRIO 2	222
FIGURA 58 – CURVAS DE ESTOQUE FINAIS DO CENÁRIO 2	223
FIGURA 59 – TOPOLOGIA DO CENÁRIO 3	225
FIGURA 60 – CURVAS DE ESTOQUE INICIAIS DO CENÁRIO 3	228
FIGURA 61 – CURVAS DE ESTOQUE FINAIS DO CENÁRIO 3	229
FIGURA 62 – CURVAS DE ESTOQUE INICIAIS DE TODAS AS BASES E PRODUTOS REFERENTES AO CENÁRIO 4	235
FIGURA 63 – CURVAS DE ESTOQUE FINAIS DE TODAS AS BASES E PRODUTOS REFERENTES AO CENÁRIO 4	235
FIGURA 64 – CURVAS DE ESTOQUE INICIAIS DAS BASES E PRODUTOS REFERENTES AO CENÁRIO 5 COM META MÍNIMA	237
FIGURA 65 – CURVAS DE ESTOQUE FINAIS DAS BASES E PRODUTOS REFERENTES AO CENÁRIO 5 COM META MÍNIMA	238
FIGURA 66 – ESTOQUE AGREGADO DO CENÁRIO 5 COM META MÁXIMA.....	239
FIGURA 67 – TOPOLOGIA DO CENÁRIO 6	240

FIGURA 68 – CURVAS DE ESTOQUE INICIAIS DE TODAS AS BASES E PRODUTOS REFERENTES AO CENÁRIO 6	241
FIGURA 69 – CURVAS DE ESTOQUE FINAIS DE TODAS AS BASES E PRODUTOS REFERENTES AO CENÁRIO 6	242
FIGURA 70 – TOPOLOGIA DO CENÁRIO 7	243
FIGURA 71 – CURVAS DE ESTOQUE AGREGADA DA REGIÃO BAHIA	244
FIGURA 72 – CURVAS DE ESTOQUE INICIAIS DE TODAS AS BASES E PRODUTOS REFERENTES AO CENÁRIO 7	244
FIGURA 73 – CURVAS DE ESTOQUE FINAIS DE TODAS AS BASES E PRODUTOS REFERENTES AO CENÁRIO 7	245
FIGURA 74 – CURVAS DE ESTOQUE AGREGADAS FINAIS DOS PRODUTOS DA REDE DE CLAROS	248
FIGURA 75 – CURVAS DE ESTOQUE DE TODAS AS BASES E PRODUTOS DO GRUPO DE GASOLINA DO CENÁRIO 8	249
FIGURA 76 – CURVAS DE ESTOQUE DE TODAS AS BASES E PRODUTOS DO GRUPO DE NAFTA DO CENÁRIO 8	250
FIGURA 77 – CURVAS DE ESTOQUE DE TODAS AS BASES E PRODUTOS DO GRUPO DE QUEROSENE DO CENÁRIO 8	250
FIGURA 78 – CURVAS DE ESTOQUE DE TODAS AS BASES E PRODUTOS DO GRUPO DE ÓLEO DE TURBINA DO CENÁRIO 8	251
FIGURA 79 – CURVAS DE ESTOQUE DE TODAS AS BASES E PRODUTOS DO GRUPO DE DIESEL DO CENÁRIO 8	253
FIGURA 80 – PROTOCOLO INTERATIVO COM ACORDOS PROVISÓRIOS.....	286
FIGURA 81 – INICIALIZAÇÃO E CRIAÇÃO DOS AGENTES.....	287
FIGURA 82 – ETAPAS DO PROCESSO DE PREPARAÇÃO DO ANÚNCIO	289
FIGURA 83 – ESTRUTURA DE UM ANÚNCIO COM O VETOR DE FLUXOS	289
FIGURA 84 – ETAPAS GERAIS DO PROCESSO DE PREPARAÇÃO DO LANCE.....	292
FIGURA 85 – ETAPAS RELACIONADAS À SELEÇÃO DA ROTA	295
FIGURA 86 – ETAPAS DO PROCESSO DE CONFIRMAÇÃO DE UM ACORDO.....	304
FIGURA 87 – ESTADOS DE SATISFAÇÃO DE UMA BASE E DE SEUS PAPÉIS DE LEILOEIRO E PARTICIPANTE.....	311
FIGURA 88 – SEQUÊNCIA DE INTERAÇÕES PARA A FINALIZAÇÃO DO SISTEMA.....	313
FIGURA 89 – PRIMEIRO CENÁRIO EXPERIMENTAL.....	314

FIGURA 90 – CURVAS DE ESTOQUE INICIAIS E FINAIS DO PRIMEIRO CENÁRIO EXPERIMENTAL	315
FIGURA 91 – SEGUNDO CENÁRIO EXPERIMENTAL	315
FIGURA 92 – CURVAS DE ESTOQUE INICIAIS E FINAIS DO SEGUNDO CENÁRIO EXPERIMENTAL	316
FIGURA 93 – MOVIMENTAÇÕES POR PERÍODO REFERENTE AO SEGUNDO CENÁRIO EXPERIMENTAL	316

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – DETALHAMENTO DO TEMPO EM RELAÇÃO À ALOCAÇÃO DE RECURSOS	81
TABELA 2 – INFORMAÇÕES DE ESTOQUE E CAPACIDADE DO CENÁRIO 1	215
TABELA 3 – INDICADORES DOS RESULTADOS DO CENÁRIO 1.....	219
TABELA 4 – INFORMAÇÕES DE ESTOQUE E CAPACIDADE DO CENÁRIO 2	220
TABELA 5 – INDICADORES DOS RESULTADOS DO CENÁRIO 2.....	225
TABELA 6 – INFORMAÇÕES DE ESTOQUE E CAPACIDADE DO CENÁRIO 3	226
TABELA 7 – INDICADORES DOS RESULTADOS DO CENÁRIO 3.....	231
TABELA 8 – ROTAS REGISTRADAS DO CENÁRIO 4	232
TABELA 9 – INFORMAÇÕES SOBRE O ESTOQUE E META DO BRASIL NO CENÁRIO 4.....	233
TABELA 10 – INDICADORES DOS RESULTADOS DO CENÁRIO 4.....	234
TABELA 11 – INFORMAÇÕES SOBRE O ESTOQUE E META DO BRASIL NO CENÁRIO 5 COM META MÍNIMA.....	237
TABELA 12 – INDICADORES DOS RESULTADOS DO CENÁRIO 5 COM META MÍNIMA	238
TABELA 13 – INFORMAÇÕES SOBRE O ESTOQUE E META DO BRASIL NO CENÁRIO 5 COM META MÁXIMA	239
TABELA 14 – INDICADORES DOS RESULTADOS DO CENÁRIO 5 COM META MÁXIMA	240
TABELA 15 – INDICADORES DOS RESULTADOS DO CENÁRIO 6.....	243
TABELA 16 – INDICADORES DOS RESULTADOS DO CENÁRIO 6.....	246
TABELA 17 – ROTAS REGISTRADAS DO CENÁRIO 8	247
TABELA 18 – INDICADORES DOS RESULTADOS DO CENÁRIO 8.....	254

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E ACRÔNIMOS

ACL	Linguagem de Comunicação de Agentes (<i>Agent Communication Language</i>)
AUML	<i>Agent Unified Modeling Language</i> (Linguagem de Modelagem Unificada para Agentes)
Adopt	<i>Asynchronous Distributed Optimization</i> (Otimização Distribuída Assíncrona)
ANP	Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis
BDI	Crenças, Desejos e Intenções (<i>Beliefs, Desires e Intentions</i>)
CEEI	Centro de Engenharia Elétrica e Informática
CFP	Chamada para Propostas (<i>Call For Proposals</i>)
CLP	Programação Lógica por Restrições
CCNet	Protocolo Contract-Net Competitivo
CNet	Protocolo de Redes de Contrato (<i>Contract-Net Protocol</i>)
CPGEI	Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial
CSCMP	Conselho de Profissionais de Gerenciamento de Cadeia de Suprimentos (<i>Council of Supply Chain Management Professionals</i>)
DCOP	Problema de Satisfação de Restrições Distribuído com Otimização (<i>Distributed Constraint Optimization Problem</i>)
DF	Diretório Facilitador
DPOP	<i>Dynamic Programming OPTimization</i> (Otimização por Programação Dinâmica)
DSC	Departamento de Sistemas e Computação
E&P	Exploração e produção de petróleo e gás natural
FCC	<i>Federal Communications Commission</i> (Comunicação dos Estados Unidos)
FIC	<i>Fronape International Company</i> (Companhia Internacional Fronape)
FIPA	Fundação para Agentes Físicos Inteligentes (<i>Foundation for Intelligent Physical Agents</i>)
Fronape	Frota Nacional de Petroleiros
FSM	<i>Finite State Machine</i> (Máquina de Estados Finita)
GLP	Gás Liquefeito de Petróleo
GUE	Grau de Urgência de Estoque

GUR	Grau de Urgência das Rotas
GRASP	Greedy Randomized Adaptive Search Procedure
JADE	<i>Java Agent DEvelopment Framework</i> (Framework de Desenvolvimento de Agentes em Java)
LGPL	<i>Lesser General Public License</i> (Licença Pública Menos Geral)
LOGIS	Núcleo de Logística Integrada e Sistemas
MI	Máquina de Inferência
MOASSÍ	Método Otimização ASSÍncrono
NSGA-II	Algoritmo Genético Baseado em Ordenamento Não Dominado II (<i>Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II</i>)
PCNC	Protocolo Contract-Net com Confirmação
Petrobras	Petróleo Brasileiro S. A.
PIB	Produto Interno Bruto
PLI	Programação Linear Inteira
PLIM	Programação Linear Inteira Mista
PPTDP	Problema de Planejamento de Transferência de Derivados de Petróleo
PO	Pesquisa Operacional
PSO	Algoritmos de Otimização por Nuvem de Partículas (<i>Particle Swarm Optimization</i>)
SBR	Sistemas Baseados em Regras
SCM	Gerenciamento de Cadeia de Suprimentos (<i>Supply Chain Management</i>)
SGA	Sistema Gerenciador de Agentes
SMA	Sistema Multiagente
TAC-SCM	<i>Trading Agent Competition - Supply Chain Management</i> (Competição de Agentes Negociadores – Gerenciamento de Cadeia de Suprimentos)
Transpetro	Petrobras Transporte S. A.
UFMG	Universidade Federal de Campina Grande
UFF	Universidade Federal Fluminense
UTFPR	Universidade Tecnológica Federal do Paraná
u.v.	Unidade Volumétrica
u.m.	Unidade Monetária
XML	Linguagem de Marcação Extensível (<i>Extensible Markup Language</i>)

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	25
1.1	ENQUADRAMENTO	25
1.2	MOTIVAÇÃO	26
1.2.1	Importância Econômica da Logística	26
1.2.2	Logística Petrolífera Brasileira.....	27
1.2.3	Concepção da Solução Computacional de Planejamento.....	31
1.2.4	Mecanismos de Coordenação entre Agentes de <i>Software</i>	33
1.3	OBJETIVOS	36
1.4	ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	38
2	PROBLEMA DE PLANEJAMENTO LOGÍSTICO NO SEGMENTO DOWNSTREAM DA INDÚSTRIA PETROLÍFERA BRASILEIRA.....	39
2.1	DEFINIÇÃO DE PLANEJAMENTO.....	40
2.2	CENÁRIO REAL DO PROBLEMA DE PLANEJAMENTO DE TRANSFERÊNCIA DE DERIVADOS DE PETRÓLEO.....	44
2.2.1	Tipos de Bases.....	45
2.2.2	Tipos de Modais de Transporte	48
2.2.3	Classe de Produtos Suportados.....	51
2.3	MODELO DO PROBLEMA DE PLANEJAMENTO DE TRANSFERÊNCIA DE DERIVADOS DE PETRÓLEO.....	52
2.3.1	Abstração em Relação ao Tempo	54
2.3.2	Abstração em Relação aos Produtos	55
2.3.3	Abstração em Relação à Capacidade de Armazenamento	61
2.3.4	Abstração em Relação à Capacidade de Transporte	67
2.3.5	Abstração em Relação à Topologia da Malha de Transporte.....	70
2.3.6	Propriedades da Solução e Objetivos	80
2.4	REQUISITOS DA SOLUÇÃO COMPUTACIONAL.....	81
2.5	SOLUÇÕES DA LITERATURA.....	83
2.5.1	Soluções Centralizadas.....	86
2.5.2	Soluções Distribuídas	94
2.6	CONSIDERAÇÕES FINAIS	97

3	PARADIGMA DE AGENTES DE SOFTWARE	99
3.1	DEFINIÇÃO	99
3.2	RELAÇÃO ENTRE AGENTES E CADEIAS DE SUPRIMENTO	102
3.3	MECANISMOS PARA COORDENAÇÃO DAS INTERAÇÕES ENTRE OS AGENTES	102
3.4	LEILÕES MULTIAGENTE	105
3.4.1	Visão Geral.....	105
3.4.2	Variações de Leilões	108
3.5	PROTOCOLO CONTRACT-NET	111
3.5.1	Visão Geral.....	111
3.5.2	Extensões ao Protocolo Contract-Net.....	114
3.5.3	Aplicação do Protocolo Contract-Net na Indústria do Petróleo	132
3.6	IMPLEMENTAÇÃO DE AGENTES	137
3.7	CONSIDERAÇÕES FINAIS	139
4	MODELO MULTIAGENTE BASEADO EM UM PROTOCOLO DE LEILÕES SIMULTÂNEOS COM SEQUENCIAMENTO NO FECHAMENTO DE ACORDOS	141
4.1	PROTOCOLO DE LEILÕES.....	141
4.2	MODELAGEM BASEADA NO PROTOCOLO PROPOSTO	146
4.2.1	Papéis dos Agentes	149
4.2.2	Fase de Inicialização dos Agentes.....	151
4.2.3	Fase de Inicialização dos Períodos	156
4.2.4	Fase de Execução dos Leilões	157
4.2.5	Fase de Finalização do Sistema.....	196
4.2.6	Operações Eventuais	197
4.2.7	Distribuição do Sistema.....	206
4.3	CONSIDERAÇÕES FINAIS	209
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	211
5.1	CENÁRIOS FICTÍCIOS	214
5.1.1	Cenário 1: Topologia de Único Nível Hierárquico Envolvendo a Transferência de Apenas um Único Produto em Operações Fundamentais	214
5.1.2	Cenário 2: Topologia Multinível Envolvendo Transferências de Múltiplos Produtos por meio de Operações Fundamentais.....	219
5.1.3	Cenário 3: Operações Eventuais Envolvendo Múltiplos Produtos	225

5.2	CENÁRIOS REAIS	231
5.2.1	Cenário 4: Rede de GLP Inter-região com Transportes Comprometidos e Estoque em Trânsito	232
5.2.2	Cenário 5: Rede de GLP Inter-região com Variações da Meta Brasil	236
5.2.3	Cenário 6: Rede de GLP Intrarregião Referente à Região de Demanda	240
5.2.4	Cenário 7: Rede de GLP Intrarregião Referente à Região de Produção	243
5.2.5	Cenário 8: Rede de Claros	246
5.3	CONSIDERAÇÕES FINAIS	256
6	CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS	259
6.1	CONCLUSÃO	259
6.2	TRABALHOS FUTUROS.....	263
6.3	PUBLICAÇÕES	265
	REFERÊNCIAS	269
	APÊNDICE A - PROPOSTA DE UM MODELO MULTIAGENTE BASEADO EM UM PROTOCOLO DE LEILÕES SIMULTÂNEOS COM ACORDOS PROVISÓRIOS..	281
	APÊNDICE B – NOMENCLATURAS DAS EQUAÇÕES.....	319

1 INTRODUÇÃO

1.1 ENQUADRAMENTO

Esta tese de doutorado tem como objeto de estudo a concepção de um modelo computacional baseado no paradigma de agentes de *software* para compor uma ferramenta de auxílio à tomada de decisão no processo de planejamento logístico de parte da cadeia produtiva da Petrobras (Petróleo Brasileiro S.A.). Mais precisamente, o problema se refere ao planejamento em médio prazo da transferência de produtos derivados de petróleo entre locais de produção, de consumo e intermediários por meio de uma rede de transportes multimodal com abrangência de todo o território brasileiro.

A ferramenta computacional foi desenvolvida em parceria com a Petrobras e contou com a participação colaborativa de programas/departamentos de três universidades federais: (a) Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial (CPGEI) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR); (b) Departamento de Sistemas e Computação (DSC) do Centro de Engenharia Elétrica e Informática (CEEI) da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG) e (c) do Núcleo de Logística Integrada e Sistemas (LOGIS) da Universidade Federal Fluminense (UFF).

Neste projeto multi-institucional, cada equipe possuiu responsabilidades distintas e contribuiu para a formação da ferramenta de tomada de decisão. Mais precisamente, a equipe da UTFPR é responsável pelo desenvolvimento de um modelo baseado em agentes com a intenção de retornar uma solução factível para o problema, a equipe da UFF é responsável pela composição de um modelo matemático exato para o problema a fim de melhorar a solução gerada pelo modelo baseado em agentes ou qualquer outra solução gerada aleatoriamente. Por fim, a equipe da UFCG é responsável pela concepção da interface gráfica da ferramenta, pela documentação e integração dos modelos para formação da ferramenta.

Neste capítulo, a seção 1.1 descreve os fatores motivadores que justificam a realização deste trabalho, a seção 1.2 detalha os objetivos pretendidos e, por fim, a seção 1.3 apresenta a organização dos capítulos que compõem esta tese de doutorado.

1.2 MOTIVAÇÃO

1.2.1 Importância Econômica da Logística

O Gerenciamento da Cadeia de Suprimentos (do inglês *Supply Chain Management* (SCM)) é uma atividade que provê grandes vantagens às empresas. Na definição oficial do *Council of Supply Chain Management Professionals* (CSCMP)¹, o SCM consiste em um conjunto de práticas que engloba o planejamento e a gestão de todas as atividades de logística, bem como as operações de manufatura e unidades de coordenação dos processos e atividades como marketing, vendas, design de produto, finanças e tecnologia da informação. Essencialmente, o SCM engloba a coordenação e colaboração com fornecedores, intermediários, prestadores de serviços terceirizados e clientes, integrando a oferta e a gestão da demanda dentro (i.e. SCM intraorganizacional) e entre empresas (i.e. SCM interorganizacional) (CSCMP, 2011).

Dentro da cadeia de suprimentos, a logística tem papel fundamental no seu bom funcionamento. Em uma definição mais particular, o CSCMP define logística como a responsável pelo planejamento, implementação e controle do fluxo e armazenamento eficiente e econômico de matérias-primas, materiais semiacabados e produtos acabados, desde o ponto de origem até o ponto de consumo, com o propósito de atender às exigências dos clientes (CSCMP, 2011). Basicamente, o processo logístico consiste em apanhar o produto certo, na quantidade certa, no lugar certo e no tempo certo para ser entregue em lugares onde o produto é desejado e com um custo reduzido (SIMCHI-LEVI; KAMINSKY; SIMCHI-LEVI, 2003).

Anualmente, as empresas despendem valores monetários consideráveis com atividades logísticas, sendo que tais custos afetam significativamente o preço do produto final. Em 2009, as despesas com logística chegaram a 11.6% do PIB nacional brasileiro, sendo que exatos 60% foram gastos com transporte de produtos e matéria-prima (ILOS, 2010). Certamente, um grande percentual deste custo logístico está relacionado ao transporte de petróleo e seus derivados (e.g. gasolina, diesel, nafta, querosene de aviação), uma vez que esta fonte de energia atende aproximadamente 49% do consumo brasileiro de energia (ILOS, 2010).

¹ Principal associação mundial de profissionais de gestão de cadeia de suprimentos.

1.2.2 Logística Petrolífera Brasileira

A maior empresa petrolífera brasileira é a Petrobras² (NATHAN, 2011). A Petrobras realiza, diretamente ou em parceria com terceiros, atividades nas áreas de exploração, produção, refino, comercialização e transporte de petróleo e seus derivados, no Brasil e no exterior (PETROBRAS, 2011). Para manter sua hegemonia no mercado interno e se tornar mais competitiva no mercado externo, a Petrobras precisa continuar investindo na manutenção da qualidade e melhoramentos de seus processos. Entre estes, a logística merece atenção especial por ter impacto direto na qualidade dos serviços prestados aos clientes e de ser responsável pela conexão dos segmentos de sua cadeia produtiva.

A cadeia produtiva da Petrobras é organizada em três segmentos: *upstream*, *midstream* e *downstream*. A Figura 1 ilustra tais segmentos (com destaque a parte do segmento *downstream*) e a integração entre os seus membros via atividades de transporte em um cenário fictício e extremamente simplificado. Os escopos de atuação de cada segmento são descritos a seguir:

- Segmento *Upstream*: refere-se às atividades de exploração, perfuração e extração de petróleo e também à atividade de transporte do petróleo bruto para as refinarias.
- Segmento *Midstream*: refere-se essencialmente às atividades de refino do petróleo, ou seja, as atividades de transformação de petróleo bruto em derivados por meio de vários processos físicos e químicos. Alguns exemplos de derivados obtidos por meio deste processo são: gás liquefeito de petróleo (GLP), gasolina, nafta, óleo diesel, querosene de aviação e de iluminação, óleo combustível, asfalto, lubrificante, combustível marítimo, solventes, parafinas e coque de petróleo.
- Segmento *Downstream*: como observado na Figura 1, a estrutura física deste segmento é separada de acordo com suas atividades de transferência e distribuição. As atividades de transferência correspondem à movimentação de produtos de uma origem para um único destino. As operações de transferência podem ocorrer na movimentação de produtos das refinarias até centros de

² A Petrobras foi fundada em 1953, no governo do Presidente Getúlio Vargas, com o objetivo de realizar as atividades no setor petrolífero em nome do Governo Federal. Atualmente, a Petrobras é a 15ª maior empresa de petróleo do mundo (NATHAN, 2011).

armazenamento intermediários, chamados de terminais, ou a mercados consumidores internos (e.g. petroquímicas, estações de extração e produção, centros de distribuição) ou externos à Petrobras. As atividades de distribuição correspondem à movimentação de produtos a fim de atender múltiplos destinos com um único meio de transporte. As operações de distribuição podem ocorrer na movimentação de produtos a partir de centros de distribuição até vários consumidores finais (e.g. postos de abastecimento e grandes consumidores e atacadistas).

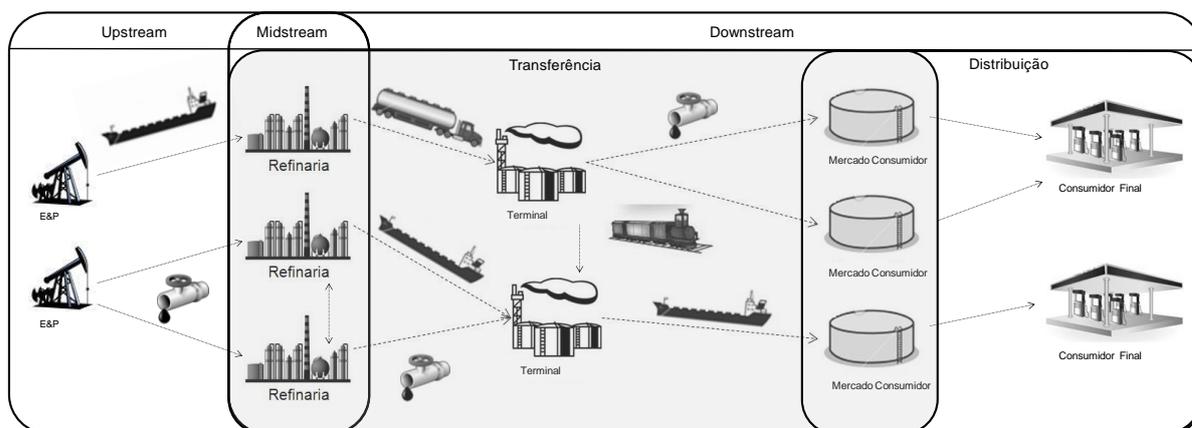


Figura 1 – Cadeia Produtiva da Petrobras

Para manter um nível de serviço adequado em cada um destes segmentos e conseqüentemente propiciar um funcionamento eficiente e econômico de forma integrada, a realização periódica de planejamentos logísticos se faz indispensável. Neste contexto, o escopo deste trabalho consiste no planejamento da transferência de derivados de petróleo pela malha de transporte no segmento *downstream*, assim como destacado na Figura 1.

Todavia, a Petrobras não é mais a responsável direta pela execução das atividades logísticas de transporte e armazenamento dentro de sua cadeia produtiva. Com a regulamentação da Lei do Petróleo Nº 9.478 de 1997³, a Petrobras Transporte S. A. (Transpetro) foi criada como subsidiária para administrar tais atividades no território brasileiro e em menor proporção no território internacional⁴. Com esta flexibilização,

³ A Lei do Petróleo Nº 9.478 foi regulamentada em 1997 no governo do Presidente Fernando Henrique Cardoso. Esta lei estimulou a flexibilização do monopólio do setor do petróleo e gás permitindo que empresas privadas também pudessem exercer as atividades da indústria petrolífera. Nesta época, também foi criada a Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP) para regulamentar, fiscalizar e contratar as atividades econômicas do setor petrolífero brasileiro.

⁴ A Transpetro é uma empresa subsidiária integral da Petrobras e atualmente é a maior armadora da América Latina e a principal empresa de logística do Brasil (TRANSPETRO, 2010). Ela atua no território internacional por meio da Fronape International Company (FIC) e acordos comerciais.

qualquer empresa interessada e com competência para tal pode receber permissão para fazer uso dos recursos de transporte e armazenamento sob o controle da Transpetro.

Atualmente a concorrência interorganizacional para o uso dos recursos de transporte e armazenamento é praticamente inexistente no segmento *downstream*, não havendo incertezas em relação à disponibilidade futura de recursos que poderiam ocorrer por causa de possíveis conflitos. Por conta disto, para realizar o planejamento das transferências de derivados de petróleo, os profissionais de planejamento sempre consideram que toda a capacidade de recursos de transporte e armazenamento está disponível para alocação (MARCELLINO, 2006). No entanto, caso futuramente a concorrência chegue a ser mais significativa, o processo de planejamento se tornaria mais complexo e inviabilizaria o uso da mesma prática de planejamento, demandando um certo nível de negociação entre as empresas a fim de disputar as capacidades dos recursos.

Na cadeia produtiva da Petrobras, como em qualquer outra, o planejamento é sempre realizado para um restrito intervalo de tempo, chamado de horizonte de planejamento. O tamanho do horizonte de planejamento é inversamente proporcional ao nível de detalhes do cenário a ser planejado, ou seja, quanto maior o horizonte de planejamento, menor é a quantidade de detalhes considerados. Na Petrobras, as decisões de planejamento ocorrem para três diferentes horizontes de planejamento (i.e. curto, médio e longo prazo) que estão estritamente relacionados a três diferentes níveis hierárquicos de decisão (i.e. nível operacional, tático e estratégico).

Geralmente, as decisões hierárquicas de planejamento são realizadas separadamente em cada segmento da cadeia produtiva da Petrobras, cada qual atuando em certo nível de abstração do problema. Seguindo este princípio, os três níveis hierárquicos de decisão são descritos no contexto do segmento *downstream* da cadeia petrolífera:

- **Nível Estratégico:** é responsável por planejar a construção de novas instalações físicas para aumentar os níveis de produção e também para reduzir a distância entre os centros de produção e consumidores ou mesmo em reorganizar o sistema de transferência de produtos. Como exemplo, este nível é responsável por definir as rotas de transporte, decidir sobre a instalação de novas refinarias e terminais, decidir sobre o aumento da capacidade de modais de transporte próprios ou de terceiros e definir graus de produção e estoque. Este planejamento é realizado anualmente considerando um horizonte de dois ou mais anos.

- **Nível Tático:** é responsável por planejar a transferência de produtos entre as entidades da cadeia produtiva a fim de atender à demanda em médio prazo. Basicamente, este planejamento busca encontrar uma solução que satisfaça o nível de estoque para cada produto nas entidades envolvidas com um custo de transporte reduzido. Porém, os cenários planejados neste nível geralmente não contemplam todos os detalhes de operação de uma cadeia produtiva real. Certas características dos cenários reais são abstraídas a fim de que a essência do problema seja enfatizada. Por exemplo, as capacidades são consideradas de forma agregada (e.g. capacidade de todos os tanques de armazenamento disponíveis para um dado produto ao invés de considerar a capacidade individual de cada tanque) e o tempo é discretizado em períodos, podendo cada período corresponder a um intervalo de alguns dias, uma ou mais semanas ou um mês. Este planejamento normalmente é realizado mensalmente considerando um horizonte de três meses.
- **Nível Operacional:** é responsável por planejar a execução dos planos dos níveis anteriores por meio do detalhamento de tais planos. Este nível considera capacidades particulares de cada modal e o tempo geralmente é tratado na escala de minutos, horas ou dias. Neste nível, as tarefas definidas no nível tático são desmembradas e escalonadas no tempo. Geralmente, este planejamento é realizado diariamente para um horizonte de uma semana.

No segmento *downstream*, o processo de planejamento é realizado sequencialmente do nível hierárquico superior ao mais inferior, onde o resultado de planejamento de um nível é entrada para o subsequente. Deste modo, devido a possíveis incompatibilidades de planejamento, às vezes pode ser necessário reexecutar o planejamento do nível superior para melhor se adaptar às restrições do nível inferior. Este caso ocorre com certa frequência na relação entre o nível tático e operacional no segmento *downstream* (MARCELLINO, 2006). Para evitar ou reduzir a ocorrência de tal situação, uma alternativa seria agregar maior grau de detalhamento à solução de nível tático para aumentar a compatibilidade desta com o nível operacional. Neste sentido, este trabalho aborda o problema de planejamento em nível tático, buscando encontrar soluções mais detalhadas para evitar a necessidade de replanejamentos.

Basicamente, o problema de planejamento tático no segmento *downstream* consiste em definir operações de importação ou exportação de derivados de petróleo e de transferência de produtos entre bases (i.e. refinarias, terminais e mercados consumidores) em âmbito nacional para um horizonte de três meses. O planejamento tem como objetivo manter um

nível de estoque adequado de produtos em cada base no final de cada mês com um baixo custo de movimentação, respeitando as capacidades dos modais de transporte e as capacidades de armazenamento das bases.

Atualmente, o planejamento tático é realizado manualmente, ou seja, de forma não automatizada, baseando-se apenas na experiência dos profissionais especialistas. Este processo é ineficiente ao exigir uma comunicação intensiva entre os especialistas e responsáveis por diferentes bases para conceber uma solução com alto nível de abstração e sem garantia de alocações de qualidade e econômica dos recursos (LOPES, T. M. T., 2010). Por exemplo, quando um modal de transporte mais econômico não é alocado eficientemente, pode ser necessário fazer uso de outro modal com custo mais elevado para transportar o produto. Estas escolhas influenciam no custo logístico e também no custo do produto final de derivados de petróleo⁵ e mesmo de produtos em geral, uma vez que a grande maioria dos meios de transporte de produtos faz uso do petróleo como sua fonte de energia.

Desta forma, é eminente a necessidade de uma ferramenta computacional para auxiliar os especialistas no processo de planejamento. Esta ferramenta poderia ser usada para gerar uma proposta completa de planejamento ou ser usada de forma interativa pelos especialistas como um meio de testar a viabilidade de seus planos. Neste último caso, os especialistas poderiam fixar algumas movimentações e solicitar o planejamento das restantes à ferramenta a fim de poupar esforços e ainda obter uma solução de qualidade.

Porém, mesmo que a ferramenta seja responsável pelo planejamento completo, sempre haverá a necessidade da presença de profissionais para analisar os resultados, uma vez que toda modelagem é uma simplificação da realidade. Desta forma, uma ferramenta sempre será usada como auxílio à tomada de decisão e o conhecimento humano e a experiência continuarão ainda sendo requeridas para tratar da diferença entre o modelo e a realidade (FLEISCHMANN; MEYR; WAGNER, 2005).

1.2.3 Concepção da Solução Computacional de Planejamento

A concepção de uma ferramenta automatizada para o planejamento de movimentações de derivados de petróleo necessita da aplicação de abordagens especiais que permitam a realização de uma grande quantidade de combinações para encontrar o melhor

⁵ No Brasil, 15% do preço da gasolina refere-se ao custo de transporte considerando toda a cadeia produtiva. No entanto, há indicativos de melhoria neste custo quando comparado com países com melhor desempenho logístico, como os Estados Unidos, onde o impacto do transporte no preço da gasolina cai para 8% (ILOS, 2010).

conjunto (i.e. resultado ótimo) de fluxos de movimentação ou pelo menos um conjunto aceitável que respeite as restrições do problema (i.e. resultado factível).

Nos últimos anos, diferentes tipos de abordagens têm sido aplicadas na concepção de soluções de planejamento da transferência de derivados de petróleo. Alguns exemplos são a programação matemática, programação lógica por restrições, heurísticas, meta-heurísticas ou mesmo a combinação entre algumas destas. Entre tais abordagens, a programação matemática merece maior destaque por ser a mais utilizada, de forma individual ou conjuntamente com outra abordagem, principalmente por garantir uma solução dita “ótima”⁶.

Mesmo que a abordagem matemática possa retornar soluções ótimas, estas soluções apenas são válidas frente a um número limitado de variáveis e restrições. À medida que as restrições se apresentam em maior número e mais complexas, estes modelos apresentam certas inconveniências, tal como o alto custo de processamento e necessidade de grande quantidade de recursos computacionais (e.g. memória computacional) (BRITO; TACLA, 2009). Diante desta situação, uma alternativa normalmente utilizada é relaxar certas restrições a fim de permitir a execução do sistema em tempo hábil. No entanto, esta prática reduz o grau de compatibilidade da solução com a realidade.

Ademais, os modelos de programação matemática podem não refletir a organização naturalmente distribuída da cadeia produtiva petrolífera, uma vez que as informações do modelo são centralizadas em um conjunto de fórmulas. Esta forma centralizada de resolução do problema pode inviabilizar o emprego desta abordagem na resolução do problema em um futuro próximo e provável, o qual pode ter início com a adesão de outras empresas ao mercado petrolífero brasileiro. Com isso, as informações nem sempre estariam disponíveis de forma centralizada para a tomada de decisão e as empresas concorrentes pela utilização da malha poderiam não compartilhar suas informações logísticas.

Com a intenção de contornar estas limitações dos modelos matemáticos, este trabalho propõe a utilização do paradigma de sistemas multiagentes (SMA) para resolver o problema de planejamento de transferência de derivados de petróleo. Basicamente, um agente consiste em uma entidade de *software* encapsulada situada em um ambiente e é capaz de exercer ações de forma flexível e autônoma a fim de cumprir os seus objetivos (JENNINGS,

⁶ A solução encontrada é apenas ótima em relação ao modelo da realidade em que se aplica. Geralmente, o modelo abstrai a realidade para ser computável, fazendo com que a solução ótima não apresente a mesma qualidade quando aplicada à realidade.

N. R. et al., 2001). Geralmente, estas entidades interagem umas com as outras de forma local ou distribuída, formando um sistema multiagente.

Um SMA apresenta características conceituais e práticas que motivam sua aplicação ao problema de planejamento logístico em questão, uma vez que a essência de sua modelagem é criar um modelo que corresponda naturalmente à realidade (ZARANDI; POURAKBAR; TURKSEN, 2008), (JENNINGS, N. R., 2000). Assim, cada elemento membro da cadeia produtiva petrolífera pode ser naturalmente representado por um agente autônomo, cada qual com a sua visão local do problema e capacidade de comunicação com os demais agentes, mantendo o sigilo de suas informações confidenciais.

Desta forma, o processo de modelagem tende a ser mais intuitivo, além de ser mais flexível para expansão futura da dimensão e nível de detalhamento do problema. Também, a natureza desacoplada e distribuída dos agentes permite que os dados sejam encapsulados em cada agente a fim de manter a sua confidencialidade e que estes executem de forma concorrente e distribuída a fim de reduzir o tempo de processamento do sistema.

1.2.4 Mecanismos de Coordenação entre Agentes de *Software*

No problema logístico em questão, devido ao distanciamento entre as bases, uma forma intuitiva de se compor a solução de planejamento seria por meio da interação entre os envolvidos. A troca de informação entre os envolvidos permite que estes resolvam possíveis conflitos por recursos e cheguem a um comum acordo sobre as contribuições de cada qual para a formação da solução de planejamento. No entanto, esta comunicação entre os agentes deve ser garantida por um mecanismo de coordenação a fim de guiar os envolvidos na construção do acordo, evitando a ocorrência de uma comunicação caótica, redundante e sem objetivos.

Uma forma de coordenar as interações entre os agentes é por meio de negociações. Os mecanismos de coordenação por negociação se dividem em dois grupos: mecanismos competitivos e cooperativos. Nos mecanismos competitivos, um agente entra em um processo de negociação com os outros agentes com o único interesse de majorar o seu próprio bem-estar ou atingir o seu próprio objetivo. Por causa deste perfil, estes agentes são chamados de autointeressados ou egoístas. O oposto ocorre em mecanismos cooperativos, onde os agentes cooperam a fim de majorar o bem-estar social ou atingir um objetivo comum compartilhado pelo grupo. Estes agentes são chamados de agentes benevolentes ou cooperativos (FERBER, 1999).

Uma forma tradicional de coordenação em ambientes competitivos é por meio de leilões. Um leilão consiste em um mecanismo de negociação que segue as diretrizes de um protocolo de interação. Um protocolo de leilão consiste em um sistema de regras e papéis explicitamente definidos, onde as regras definem e coordenam a interação entre dois papéis principais no processo de negociação: o leiloeiro e o participante (JENNINGS, N. R. et al., 1998). O leiloeiro tem a função de iniciar o processo de negociação ao oferecer um ou mais objetos com a intenção de venda para um ou mais participantes. Por sua vez, um participante tem a função de oferecer propostas ao leiloeiro para o objeto ofertado. Este objeto pode se referir a um produto, recurso, tarefa ou mesmo a um serviço. Cada agente ao exercer um dos papéis faz uso de uma estratégia ou modelo de raciocínio para negociar a venda ou aquisição de objetos por um determinado preço que maximize os seus lucros.

Esta estrutura de negociação incentiva a aplicação de leilões no problema de planejamento em foco. Porém, o problema de planejamento apresenta perfil cooperativo por estar inserido em um domínio intraorganizacional, sendo que as bases devem cooperar por meio da transferência de produtos a fim de manter um equilíbrio global de estoque. Desta forma, o uso de uma abordagem cooperativa baseada em leilões seria mais adequado a este tipo de problema.

Para suprir esta necessidade, um mecanismo cooperativo que compartilhe as mesmas vantagens dos leilões é o protocolo *Contract-Net* (CNet) ou Redes de Contratos, em português. Basicamente, o CNet consiste em um protocolo de negociação inspirado em leilões com alto grau de abstração, que permite coordenar a interação dos agentes com grande liberdade na definição do objeto e estratégias de negociação. O CNet foi inicialmente proposto para aplicação no domínio de resolução distribuída de problemas, o qual consiste no processo de desmembramento de um problema em um conjunto de subproblemas ou tarefas e atribuição destes para agentes com capacidades para resolvê-los (SMITH, 1980). Também, o protocolo pode ser facilmente adaptado a problemas de atribuição de produtos, tal como ao problema de planejamento em questão, devido à flexibilidade proporcionada em relação às suas regras.

Mais precisamente, o CNet define um processo simples de interação entre os papéis de leiloeiro e participante consistindo em quatro diferentes fases:

- Fase do anúncio: o leiloeiro envia o anúncio com a especificação de uma tarefa para um conjunto de participantes;

- Fase do lance: os participantes reservam os recursos para a execução da tarefa e enviam seus lances ao leiloeiro;
- Fase de atribuição: o leiloeiro elege o melhor lance e notifica o participante vencedor, o qual se compromete contratualmente pela execução da tarefa;
- Fase de confirmação: o participante vencedor executa a tarefa e retorna o resultado ao leiloeiro.

No CNet, muitos leiloeiros podem iniciar leilões sequencialmente (i.e. um após o outro) ou simultaneamente e, simetricamente, os participantes podem participar de um único leilão por vez ou de vários leilões simultaneamente. Ademais, um participante ao adquirir uma tarefa, pode assumir o papel de leiloeiro a fim de repassar tal tarefa ou subtarefas (resultado da decomposição da tarefa) a outro participante. Desta forma, considerando uma representação em forma de grafo, onde os leiloeiros e participantes são os nós e as relações ou recursos comuns entre eles são representados pelos arcos, pode-se visualizar facilmente a formação de uma rede de contratos. Esta representação corresponde exatamente à estrutura da cadeia produtiva do planejamento em foco, conforme verificado na Figura 1.

No entanto, o problema de planejamento em foco apresenta certa complexidade que inviabiliza a aplicação do CNet em sua forma pura, por não garantir o retorno de uma solução de qualidade em certas situações. Esta dificuldade provém do fato dos agentes trabalharem com informações parciais do problema e, por conseguinte, não disporem do conhecimento sobre todo o espaço de soluções. Os agentes apresentam certo grau de incerteza na tomada de decisão quando há várias oportunidades para negociação, devendo selecionar um subconjunto de agentes com quem manterão uma negociação. Ademais, indiferentemente se os leilões no CNet ocorrem de forma sequencial ou simultânea, os agentes nem sempre conseguem garantir que uma decisão tomada foi a mais acertada, pois esta pode ser distinta em outro instante de tempo.

Em leilões sequenciais, um participante constrói um lance para um dado leiloeiro a partir de informações parciais do ambiente, uma vez que não conhece as ofertas de outros leiloeiros e muito menos se haverá novas oportunidades futuras para aquisição da mesma tarefa ou produto. Em leilões simultâneos, um participante também não atua de forma satisfatória por ter que respeitar as regras impostas para o fechamento de um contrato. Como um contrato é fechado na fase de atribuição, um participante se restringe a participar apenas de um subconjunto de leilões a fim de não se comprometer com uma quantidade de leiloeiros acima da sua capacidade, evitando o problema de não haver recursos suficientes para executar

as tarefas que possivelmente lhe podem ser atribuídas. Ao restringir seus lances a apenas alguns leilões e não havendo garantia de vitória nestes leilões, o participante pode perder boas oportunidades com outros leiloeiros.

No entanto, esta deficiência do CNet é contornada por certos protocolos que estendem a sua forma básica de interação. Entre as extensões propostas, há protocolos que permitem maior interação entre os papéis a fim de eliminar este grau de incerteza no momento da concepção do lance (VOKŘÍNEK et al., 2007) e outros protocolos que permitem cancelamentos de acordos momentos antes ou durante a execução de uma tarefa para que um participante possa ingressar em outro acordo mais vantajoso com outro leiloeiro (SANDHOLM, T. W.; LESSER, 1995), (AKNINE; PINSON; SHAKUN, 2004). Tais protocolos também propõem outras extensões ao CNet para tratar de questões relacionadas a eficiência, escalabilidade, lucratividade e qualidade de serviço.

Porém, ainda há certas deficiências no CNet não resolvidas por estas extensões, principalmente porque estas focam unicamente no domínio do problema de alocação de tarefas, não fazendo menção a problemas de atribuição de produtos, tal como o problema de planejamento em questão. Em problemas de alocação de tarefas, o objeto em negociação é um serviço e o resultado de um leilão é a execução de um serviço pelo participante. Neste caso, supostamente, não há a possibilidade e necessidade de desistência de um acordo após a conclusão de um leilão, uma vez que o serviço já foi executado. Por outro lado, em problemas de alocação de produtos, o elemento em negociação é um objeto não consumível (em nível de planejamento) ofertado pelo leiloeiro e o resultado do leilão é a alocação deste a algum participante interessado. Neste caso, é admissível haver um arrependimento após a conclusão do leilão devido à ocorrência de eventos futuros, devendo haver meios para cancelar contratos já realizados a fim de reconstituir o objeto ao seu estado anterior.

Por conta disto, nota-se a necessidade de novas evoluções ao CNet convencional e as suas extensões para se atingir um maior grau de adaptabilidade ao problema de planejamento em questão. Estas evoluções são necessárias, uma vez que não existe um melhor protocolo universal, pois a qualidade de um protocolo é determinada pelo contexto de negociação em que ele é aplicado (JENNINGS, N. R. et al., 2001).

1.3 OBJETIVOS

Este trabalho de tese tem como objetivo a concepção de um modelo multiagente para resolver o problema de planejamento em nível tático da transferência de derivados de petróleo

em uma malha de transportes multimodal, a qual está inserida no segmento *downstream* da cadeia produtiva da Petrobras. Este modelo deverá compor uma ferramenta para auxiliar os profissionais de planejamento da Petrobras em atividades de tomada de decisão, devendo retornar uma solução dentro de um preferível curto intervalo de tempo.

No entanto, o problema a ser resolvido é bastante desafiador por se tratar de um problema real e principalmente devido a sua grande dimensão. Basicamente, o problema consiste no planejamento da transferência de produtos em três redes independentes de GLP, de Claros (i.e. derivados leves de alto valor agregado) e de Escuros (i.e. derivados pesados de baixo valor agregado) com abrangência em todo o território nacional (incluindo atividades de importação e exportação) para um horizonte normalmente composto por três meses com discretização em dias.

Este tipo de problema é classificado como NP-Completo (LIPORACE, 2005; MARCELLINO, 2006; MILIDIÚ; PESSOA, 2001; MILIDIU, RUY L.; PESSOA; LABER, 2002). Desta forma, o objetivo desta tese é encontrar uma solução factível para o problema. Mais precisamente, a solução do problema deve ser composta por um conjunto de fluxos de movimentação de produtos que satisfaça os níveis de estoque em cada base com preferível redução do custo de transporte. Cada fluxo corresponde a uma movimentação de certo volume de um dado produto, por uma determinada rota (mono ou multimodal) com dias de saída e chegada previstos.

Para atender tais requisitos da solução, este trabalho considera como hipótese a aplicação da tecnologia de sistemas multiagentes com mecanismos de coordenação inspirados em leilões. Esta hipótese se sustenta na própria similaridade em termos de interação e estrutura destes sistemas com o problema a ser solucionado. Para responder a tal indagação, esta tese apresenta um modelo multiagente como solução para o problema, o qual está embasado nas diretrizes de um novo protocolo de interação inspirado em leilões. Neste trabalho, o conjunto composto pelo protocolo e modelagem é chamado de modelo multiagente.

Por fim, outro objetivo deste trabalho é apresentar e avaliar os resultados obtidos com a materialização e aplicação do modelo proposto ao problema de planejamento logístico. Os resultados do modelo são apresentados em relação a cenários fictícios e reais. Na verdade, os cenários reais se referem unicamente às malhas de GLP e claros, uma vez que ainda não há dados suficientes da malha de escuros.

1.4 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Este trabalho de tese está organizado em seis capítulos, incluído o capítulo corrente. O capítulo 2 tem como foco principal a descrição do problema de planejamento da indústria petrolífera. A descrição do problema faz menção ao ambiente real para melhor entendimento sobre o domínio em que o problema se insere. Ademais, o capítulo apresenta alguns trabalhos da literatura mais pertinentes aplicados na resolução de problemas de planejamento neste mesmo domínio.

O capítulo 3 apresenta um embasamento teórico sobre o paradigma de agentes de *software*. Tal capítulo apresenta as definições de agentes e formas de interação em SMA. O capítulo enfatiza as interações por meio de negociação entre os agentes sobre as diretivas de protocolos de leilão e do CNet. Devido ao interesse particular no protocolo cooperativo CNet, o capítulo apresenta trabalhos que estendem a forma original deste protocolo e também outros trabalhos que já aplicaram este protocolo em problemas do domínio petrolífero. Finalmente, o capítulo apresenta uma discussão sobre as ferramentas para implementação de sistemas multiagentes.

O capítulo 4 apresenta a proposta de um novo protocolo de leilões e seu uso na modelagem do problema de planejamento de transferências de derivados de petróleo. Basicamente, o protocolo consiste em uma extensão ao CNet convencional para sanar algumas de suas deficiências, principalmente as relacionadas a negociações simultâneas. Conforme as diretivas do protocolo proposto, os leilões ocorrem simultaneamente para que os participantes tenham disponíveis no momento do cálculo do lance, as ofertas de todos os leiloeiros que oferecem o recurso desejado. Porém, os fechamentos dos leilões ocorrem sequencialmente para melhor sincronizar o acesso aos recursos compartilhados. Esta sequencialidade durante a execução dos leilões é propiciada por um agente centralizador que mantém controle sobre todo o sistema.

Por sua vez, o capítulo 5 apresenta os resultados de alguns experimentos realizados com o modelo multiagente proposto. Estes experimentos envolvem cenários fictícios e reais da malha brasileira de petróleo e buscam demonstrar o comportamento do modelo em diferentes situações que normalmente ocorrem na prática.

Por fim, o capítulo 6 apresenta as conclusões sobre o trabalho desenvolvido, assim como as perspectivas dos possíveis desdobramentos em trabalhos futuros.

2 PROBLEMA DE PLANEJAMENTO LOGÍSTICO NO SEGMENTO *DOWNSTREAM* DA INDÚSTRIA PETROLÍFERA BRASILEIRA

Desde o final do século XX, problemas de planejamento típicos de SCM vêm sendo estudados no campo de Pesquisa Operacional (PO), verificando-se grandes avanços na concepção de métodos e soluções (KOK; GRAVES, 2003). Essencialmente, o objetivo da PO é estudar e conceber métodos e algoritmos de apoio à resolução de problemas complexos de tomada de decisão, tal como o problema de planejamento de transferência de derivados de petróleo (PPTDP), a fim de obter soluções eficientes e de qualidade.

Basicamente, o processo de tomada de decisão consiste na identificação de um problema e na seleção de uma linha de ação ou solução (automatizada) para resolvê-lo (LACHTERMACHER, 2007). Em outras palavras, o processo de tomada de decisão pode ser compreendido como o processo de encontrar um caminho entre o estado do problema e o estado da solução. Neste contexto, o termo problema pode ser definido como uma dificuldade que impede que uma vontade seja concretizada (GOLDBARG; LUNA, 2000). Também, problema pode ser entendido como o estado corrente de uma situação que é diferente do estado almejado.

Segundo Goldbarg e Luna (2000), para solucionar um problema se faz necessário criar uma representação adequada da realidade a fim de conceber um algoritmo ou solução que supere a dificuldade e, como resultado, alcance o estado almejado. Nesta definição, representar a realidade de forma adequada consiste em um passo muito importante na concepção de uma solução factível. Assim, o processo de representação da realidade deve resultar em um modelo que represente corretamente o problema a ser resolvido a fim de evitar incompatibilidades da solução com a realidade. Segundo Pidd (1996), um modelo consiste na representação externa e explícita da realidade abstraída usada para entender, mudar, suportar o processo de tomada de decisão e manter controle sobre aquela realidade.

Destá forma, segundo Hillier e Lieberman (2005), o processo de tomada de decisão consiste em quatro principais etapas: a) o entendimento do problema do mundo real; b) a construção de um modelo de abstração do problema real; c) a concepção, implementação e validação de uma solução computacional de acordo com o modelo e, finalmente, d) a

aplicação da solução ao mundo real. Na Figura 2, estas etapas estão representadas em forma de transição entre os estados representativos da realidade, modelo e solução.

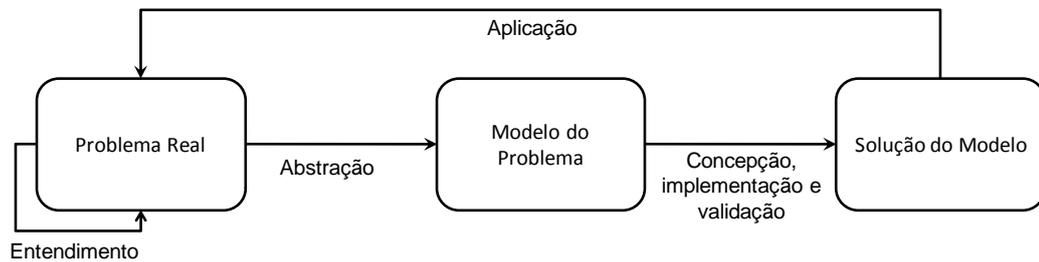


Figura 2 – Etapas do Processo de Tomada de Decisão

Nesta tese, as etapas deste processo de tomada de decisão serão seguidas a fim de encontrar uma solução factível para o problema de planejamento logístico de transferência de derivados de petróleo. Em concordância com este processo, um bom entendimento do problema real e a concepção correta do modelo do problema consistem em etapas tão importantes quanto à etapa referente à concepção da solução. Assim, este capítulo descreve especialmente as particularidades mais pertinentes do problema real e do modelo do problema, apresentando também algumas soluções da literatura propostas ao mesmo domínio do problema.

Este capítulo é constituído pelas seguintes seções: a seção 2.1 define o conceito de planejamento no domínio de SCM; a seção 2.2 apresenta o cenário real que o problema de planejamento em questão se insere e a seção 2.3 descreve as abstrações e propriedades que constituem o modelo do problema. Como a solução computacional a ser desenvolvida para o problema será aplicada ao ambiente real, ela precisa considerar certos requisitos para esta integração, que são descritos na seção 2.4. Por sua vez, a seção 2.5 apresenta algumas soluções da literatura para o mesmo domínio do problema e, por fim, a seção 2.6 descreve algumas considerações finais sobre o capítulo.

2.1 DEFINIÇÃO DE PLANEJAMENTO

O planejamento é uma das atividades fundamentais no processo de gerenciamento de cadeias de suprimentos. O planejamento pode ser definido como um processo de formulação de um ou mais planos para alcançar um balanço entre a oferta e a demanda em um tempo futuro (BUSSINESSDICTIONARY, 2011). Basicamente, o planejamento busca antecipar uma situação futura por meio da concepção de um plano, composto por um conjunto de ações ou atividades cuidadosamente selecionadas, a ser executado a fim de alcançar um ou mais objetivos com respeito às restrições impostas.

Em problemas de SCM, o processo de conceber uma solução de planejamento consiste essencialmente: a) no reconhecimento e análise do modelo do problema de decisão; b) na definição dos objetivos; c) na identificação de soluções ou ações viáveis e, finalmente, d) na seleção da melhor solução ou das melhores ações para formar o plano (FLEISCHMANN et al., 2005), (DOMSCHKE; SCHOLL, 2005).

Porém, é praticamente impossível seguir este processo para planejar uma cadeia de suprimentos como um todo, principalmente por causa dos detalhes envolvidos em cada atividade da cadeia. Geralmente, uma cadeia de suprimentos é composta por atividades de compra de materiais, produção, distribuição e vendas de produtos, sendo que um planejamento bem elaborado nesta cadeia exige alta capacidade combinatorial. Mesmo que processos separados de planejamento sejam realizados em cada atividade, dependendo do tamanho do problema, ainda pode ser difícil encontrar uma solução satisfatória em tempo computacional adequado (FLEISCHMANN et al., 2005).

Desta forma, geralmente o planejamento em SCM é executado em diferentes níveis hierárquicos de abstração (i.e. estratégico, tático e operacional) dentro do escopo de cada atividade de SCM (GOVIL; PROTH, 2001). Devido a esta fragmentação, as partes se relacionam horizontalmente e verticalmente formando uma espécie de matriz conectada. A Figura 3 apresenta a fragmentação do planejamento de uma cadeia de suprimentos e a conexão das partes em forma de uma matriz que relaciona níveis hierárquicos (com horizontes distintos) com as atividades típicas da cadeia.

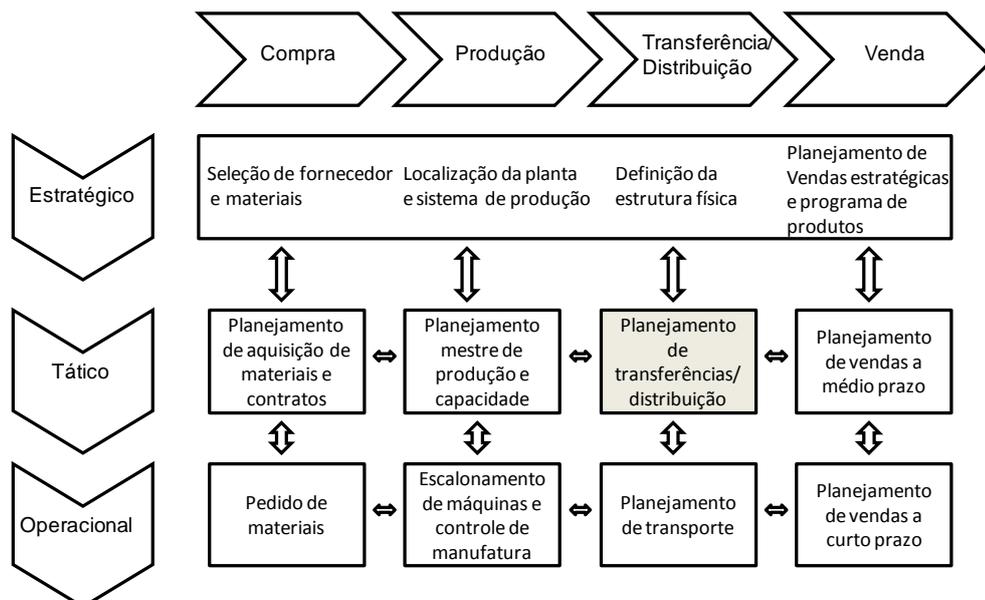


Figura 3 – Matriz de Planejamento de uma Cadeia de Suprimentos (ROHDE; MEYR; WAGNER, 2000)

Entre os elementos de planejamento que compõem a matriz, os planejamentos de transferência de produtos nos níveis tático e operacional merecem maior destaque ao corresponderem respectivamente à classe de planejamento foco do corrente trabalho e à classe responsável pelo refinamento do plano. Tais classes de fragmentos se relacionam estreitamente e se diferem principalmente pelo nível de detalhes de suas soluções e granularidade do horizonte de planejamento.

O planejamento tático de transferência ou distribuição de produtos é referenciado na literatura apenas como planejamento. Basicamente, o planejamento tem como responsabilidade a construção de um plano para transportar produtos a partir de locais de produção ou de armazenamento para outros locais de armazenamento, centros de distribuição ou de consumo por meio da seleção e alocação de capacidade em meios de transporte e verificação de capacidade de armazenamento nos locais de destino. Em uma visão mais genérica, o problema de planejamento pode ser visto como um problema típico de atribuição de produtos a entidades interessadas, sendo que estas devem alocar recursos para garantir o recebimento de tais produtos.

Mais precisamente, o planejamento tático lida com uma representação mais abstrata do problema do mundo real, com muitas restrições relaxadas a fim de que o foco do planejamento seja uma melhor seleção dos recursos e redução dos custos. Neste nível, os recursos são tratados de forma agregada, se referindo, por exemplo, à soma das capacidades ou custos de um conjunto de recursos de uma mesma classe. O mesmo tratamento ocorre com os produtos, estes são manipulados apenas em termos de grupos ou família de produtos, sendo que geralmente não há distinção entre os produtos dentro de um grupo. De forma semelhante, o tempo é discretizado em períodos de alta granularidade, tal como semanas ou meses, não tendo como garantir com exatidão o tempo de início, fim ou duração de uma dada atividade.

Desta forma, a decisão principal a ser tomada no planejamento diz respeito à definição do quê deve ser feito e não de quando deve ser feito (LANKFORD, 2001). Neste sentido, este nível de planejamento dá maior ênfase ao direcionamento da solução para a maximização dos lucros, deixando o tratamento mais refinado dos recursos e tempo para o nível de planejamento operacional.

O planejamento operacional de transporte é comumente chamado de escalonamento por causa de sua maior ênfase na alocação temporal dos recursos. Segundo Lankford (2001), o escalonamento consiste basicamente na especificação de tempos para execução de tarefas ou eventos de produção com respeito à capacidade dos recursos, precedências e outras

restrições. Segundo Reklaitis (1992), o escalonamento pode ser definido a partir de três elementos básicos: a) determinação dos recursos mais estritos a serem utilizados; b) sequenciamento das tarefas; c) temporização do uso dos recursos pelas tarefas.

Basicamente, o planejamento operacional de transporte tem como responsabilidade a construção de um plano para alocar temporalmente com maior precisão os recursos de transporte e de armazenamento com respeito às suas capacidades. Neste nível, os recursos são geralmente considerados de forma particular, refletindo as principais características do recurso real. Também, os produtos são considerados de forma individual e por isso são distinguidos dentro de um grupo ou família de produtos. Neste mesmo sentido, o tempo é tratado com maior precisão, com granularidade de dias ou horas ou mesmo em forma contínua a fim de determinar com maior exatidão os instantes de início, fim e duração das tarefas que fazem uso dos recursos.

Deste modo, o foco principal do escalonamento não consiste na otimização dos lucros, mas na validação do resultado de planejamento tático em um nível de detalhes mais próximo da realidade. Por isso, a decisão principal a ser tomada no escalonamento refere-se principalmente em definir quando deve ser feito ao invés de definir o que deve ser feito (LANKFORD, 2001).

Como observado, há uma forte interdependência entre estes dois níveis de planejamento. Primeiramente o planejamento gera como resultado um conjunto de tarefas, as quais são passadas ao escalonamento para que sejam alocadas a recursos e no tempo. Porém, nem sempre o escalonamento é possível de ser realizado para o conjunto de tarefas recebido. Neste caso, há uma retroação ao nível anterior para que o problema seja replanejado para viabilizar a execução do escalonamento. Neste sentido, quanto maior for o grau de abstração do problema de planejamento, maior será a chance de incompatibilidade do plano com o escalonamento e conseqüente necessidade de replanejamento.

Para contornar tal situação, uma prática utilizada refere-se à integração do planejamento com o escalonamento. Porém, esta prática aumenta consideravelmente o tamanho do problema, o que pode inviabilizar o processo de encontrar uma solução em tempo hábil, mesmo que esta seja apenas factível com as restrições impostas. Deste modo, outra prática mais viável refere-se a um maior refinamento do problema de planejamento, tal como um maior detalhamento das informações sobre os recursos e redução na granularidade do tempo, a fim de reduzir as incompatibilidades. No escopo deste trabalho de tese, esta prática é

chamada de planejamento com escalonamento relaxado, uma vez que tal problema ainda não corresponde exatamente ao nível operacional.

2.2 CENÁRIO REAL DO PROBLEMA DE PLANEJAMENTO DE TRANSFERÊNCIA DE DERIVADOS DE PETRÓLEO

O problema foco deste trabalho de tese consiste no planejamento tático de operações de importação e exportação de produtos derivados de petróleo e principalmente da transferência de produtos entre bases de produção, armazenamento e consumo em território brasileiro por meio de modais de transporte para um horizonte de três meses. O planejamento deve respeitar as capacidades de armazenamento e de transporte a fim de manter um nível adequado de estoque de cada produto em cada base por meio da seleção de modais e fluxos (volume) de movimentação com custo preferencialmente reduzido.

Esta seção apresenta uma descrição do cenário real do segmento *downstream* da cadeia petrolífera brasileira a fim de melhor contextualizar o problema de planejamento em questão. Em uma visão macro do cenário, as conexões entre as bases (de produção, de consumo e de armazenamento) por meio de modais de transportes formam uma espécie de rede ou malha de transporte. No escopo deste trabalho, a malha brasileira de transporte de derivados de petróleo é constituída pelo conjunto de bases e modais de transporte. A Figura 4 ilustra a topologia aproximada desta malha no território brasileiro onde os pontos representam as bases e as linhas que os unem representam os modais de transporte.



Figura 4 – Topologia Aproximada da Malha Multimodal Petrolífera Brasileira de Transporte

A malha de transporte pode ser compreendida por meio de duas visões distintas e complementares, ou seja, pela ótica da visão estática ou dinâmica. A visão estática consiste propriamente nas bases e modais de transporte que formam a sua estrutura física. A visão dinâmica corresponde essencialmente aos fluxos de produtos movimentados pelos modais e armazenados nas bases.

As subseções seguintes estão assim organizadas: a subseção 2.1.1 descreve os tipos de bases que constituem a malha, a subseção 2.1.2 descreve os tipos de modais suportados pela malha e finalmente a subseção 2.1.3 descreve os produtos que trafegam pela malha.

2.2.1 Tipos de Bases

Em uma visão superficial, a malha petrolífera brasileira é composta por três tipos de bases: bases produtoras, consumidoras e de armazenamento. Mais precisamente, a malha possui 13 refinarias responsáveis pela produção de diferentes tipos de derivados de petróleo e outros produtores internos (e.g. unidades de extração e produção de petróleo e gás natural (E&P)) e externos à companhia (e.g. petroquímicas privadas). Estas bases de produção estão concentradas em regiões estratégicas, tal como nas proximidades dos grandes centros consumidores e principalmente na região costeira brasileira. A disposição costeira reduz os custos para a aquisição de petróleo bruto em locais de exploração em alto-mar e facilita o transporte de derivados acabados ao longo da costa ou envio ao exterior.

Ademais, a malha é composta por centros de consumo que consistem em locais de entrega internos (e.g. petroquímicas, térmicas e E&P operadas pela Petrobras) e externos à companhia. Há situações em que uma base pode ao mesmo tempo ser considerada como um local de entrega e local de produção, mas para produtos diferentes. Neste caso, uma base consome um dado tipo de derivado a fim de produzir outro. Em outras situações, um local de entrega pode estar situado no mesmo endereço de uma base de armazenamento (terminais), sendo que os custos de transporte entre estas duas bases são praticamente desprezíveis.

Ainda, a malha é composta por 20 terminais terrestres (i.e. sem acesso direto ao mar ou rio) e 28 terminais aquaviários (i.e. com acesso direto ao mar ou rio) sob o controle da Transpetro e outros sob o controle de terceiros. Estas bases estão estrategicamente distribuídas para servir como ponto de intermediação entre os centros de produção e de consumo e permitir conexão com o exterior via modais marítimos. Portanto, os terminais (terrestres e aquaviários) são responsáveis pelo armazenamento temporário de produtos a fim de evitar que refinarias excedam as suas capacidades de estocagem e principalmente pela manutenção de

estoques de segurança a fim de atender demandas inesperadas de certos consumidores em um menor intervalo de tempo. Justamente por conta da distribuição estratégica dos terminais, o tempo de transporte entre os terminais e consumidores é geralmente menor do que o tempo de transporte entre refinarias e consumidores.

Em particular, os terminais aquaviários, além de exercerem o papel de entidades de armazenamento também podem realizar operações de importação e exportação de produtos. Essencialmente, os terminais aquaviários são constituídos por cais e píeres de atracação, que por sua vez são compostos por um conjunto de berços de atracação com suporte a navios de diferentes dimensões e profundidade de calado⁷. Deste modo, os terminais aquaviários com infraestrutura adequada para suportar navios com dimensões internacionais podem ser usados como locais para operações de importação, quando há deficiência de produção para atender a demanda, ou exportação, quando há excesso de produção.

Como observado, uma particularidade de todos os tipos de bases é a existência de espaços para armazenamento de produtos. Fundamentalmente, cada base é constituída por um tanque ou um conjunto deles para o armazenamento de produtos. Cada tanque pode armazenar apenas um tipo de produto, porém, pode haver mais de um tanque que suporte o armazenamento do mesmo tipo de produto.

Os tanques são caracterizados pela forma do costado e teto. Em relação à forma do costado, os tanques podem ser classificados em cilíndricos ou esféricos. Os tanques cilíndricos são utilizados para o armazenamento de petróleo ou derivados e os esféricos para o armazenamento de gases. Quanto ao teto, os tanques são classificados em tanques de teto fixo ou de teto flutuante. Em tanques de teto fixo, o teto está diretamente ligado à parte superior de seu costado e em tanques de teto flutuante, o teto flutua sobre o produto armazenado a fim de evitar a formação de espaços de vapor. Particularmente, em tanques que funcionam pelo sistema de teto flutuante, se faz necessário manter um volume mínimo de produto no tanque para evitar que o teto encoste-se ao fundo e seja danificado. A Figura 5 ilustra os três principais tipos de tanques utilizados para o armazenamento de derivados de petróleo.

⁷ Distância vertical entre a superfície da água e a parte mais baixa da embarcação.



Figura 5 – Tipos de Tanques. a) Tanque Cilíndrico com Teto Flutuante, b) Tanque Cilíndrico com Teto Fixo e c) Tanque Esférico com Teto Fixo.

Os tanques apresentam capacidade física e uma faixa de estoque operacional desejável. A capacidade física corresponde ao volume máximo que se pode armazenar no tanque no espaço compreendido entre o limite inferior e superior. O limite inferior refere-se ao próprio piso do tanque e o limite superior ao teto do tanque. No caso de tanques com teto flutuante, o limite superior refere-se ao ponto mais alto de deslocamento do teto.

A faixa de estoque operacional corresponde a um nível de estoque desejável ou meta que deve ser mantido para garantir o atendimento de uma variação na demanda e também para evitar danos ao teto em tanques com sistema de teto flutuante. A faixa de estoque operacional é delimitada por um limite inferior que normalmente corresponde a 15% ou 20% da capacidade física e por um limite superior que normalmente corresponde a 75% ou 80% da capacidade física do tanque. A Figura 6 apresenta estes limites de estoque em relação à capacidade de um único tanque.

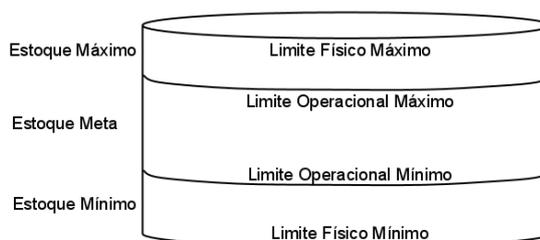


Figura 6 – Faixas de Estoque de um Único Tanque

Conforme a figura, a capacidade de um tanque é separada em três faixas de estoque. A faixa de estoque principal corresponde ao intervalo entre os limites operacionais. Esta faixa é denominada de estoque meta ou simplesmente de faixa operacional. As outras duas faixas correspondem a intervalos fora da faixa operacional, mas ainda constam dentro das fronteiras físicas do tanque. Estas faixas são respectivamente superiores e inferiores a faixa operacional. Mais precisamente, a faixa de estoque superior à faixa operacional é denominada de estoque máximo e a faixa de estoque inferior à faixa operacional é denominada de estoque mínimo.

2.2.2 Tipos de Modais de Transporte

Para evitar que bases produtoras tenham que parar suas operações quando não há mais capacidade para armazenamento e consumidores fiquem sem o mínimo necessário de produtos em estoque para atender suas demandas, as bases devem movimentar produtos entre si. Basicamente, uma movimentação consiste no escoamento de certa quantidade de um tipo de produto de uma base de origem para uma base de destino, de forma direta ou intermediada por outras bases, por meio de rotas de fluxos mono ou multimodais (i.e. rotas compostas por apenas um ou diferentes tipos de meios de transporte). Mais precisamente, uma rota de fluxo consiste na conexão direta ou indireta entre uma base de origem e outra de destino respectivamente por meio de um único modal de transporte ou conjunto de modais de transporte que são conectados a bases intermediárias.

A malha de transporte petrolífera brasileira é composta por aproximadamente 14.370 km de dutos (i.e. 7.178 km de oleodutos e 7.192 km de gasodutos) com capacidade média para movimentar 670 milhões de m³ de petróleo e derivados por ano. A maior concentração deste tipo de modal se encontra na região sudeste devido à presença de um maior número de bases nesta região. Ademais, a malha também é composta por uma frota de 52 navios com capacidade para transportar uma média anual de 60 milhões de toneladas de derivados de petróleo e ainda contratos para uso de frotas de terceiros além de acordos para transporte rodoviário e ferroviário (TRANSPETRO, 2009).

Entre os modais de transporte utilizados, o modal duto é o mais vantajoso financeiramente e ecologicamente. Em uma definição simplista, um duto ou um sistema de dutos consiste em tubulações e estações de bombeamento que impulsionam a movimentação de produtos. A capacidade de movimentação e tempo de transporte dos dutos é dependente de seu volume e vazão. Basicamente, o volume corresponde à quantidade estrita em unidades volumétricas de um produto para preencher completamente o duto ou também pode ser definido como o volume em trânsito em qualquer instante de tempo quando o duto está completamente preenchido. Por sua vez, a vazão corresponde ao volume transportado pelo duto em um dado intervalo de tempo (i.e. horas, dias).

Os dutos são classificados de forma diferente de acordo com o tipo de produto que transportam. Os dutos são comumente referenciados como oleodutos quando transportam petróleo e derivados ou como gasodutos quando transportam gases, normalmente em forma líquida. Quando mais de um tipo de produto é transportado pelos dutos, eles são genericamente chamados de polidutos.

Os dutos apresentam uma característica particular que os diferencia dos demais modais de transporte. Neste modal, os produtos são transportados sem a necessidade da movimentação do meio de transporte, uma vez que são os produtos que se movimentam. Basicamente, o processo de transporte consiste no preenchimento ou bombeamento constante de produtos em uma extremidade a fim de empurrar a carga até a outra extremidade do duto. Caso o bombeamento seja cessado, toda a carga em trânsito ficará estacionada no duto. Em termos operacionais, o volume ou lote de cada produto bombeado nos dutos é chamado de batelada.

Alguns dutos podem suportar o bombeamento em dois sentidos diferentes: no sentido normal e reverso. Porém, a movimentação em sentido reverso não é incentivada por causa do aumento no consumo energético e temporal devido à necessidade de reversão do sentido de bombeio. Além disso, a vazão no sentido reverso geralmente é menor do que no sentido normal e o próprio procedimento de reversão reduz a capacidade de movimentação do duto, mesmo que apenas durante a execução do procedimento.

Em rotas de fluxo constituídas por múltiplos dutos dispostos de forma adjacente, pode haver a necessidade de realizar procedimentos especiais para que o alinhamento das bateladas ocorra de forma mais eficiente. Tais procedimentos são frequentemente necessários porque certos dutos adjacentes apresentam diferentes taxas de vazão principalmente por causa da diferença de demanda entre as bases conectadas.

Basicamente, estes procedimentos se referem ao armazenamento de produtos na base de intersecção entre dois dutos a fim de compensar as diferenças de vazão e conseqüentemente manter as taxas normais de fluxo de cada duto. Este procedimento é chamado de operação pulmão. Quando os dutos adjacentes apresentam a mesma vazão, não há a necessidade do procedimento para armazenamento intermediário. Neste caso, ocorre uma operação de passagem (contínua), sem parada temporária do fluxo para compensação de vazão (BOSCHETTO, SUELLEN NEVES, 2011; FELIZARI, 2009).

A Figura 7 exemplifica graficamente as operações de pulmão e de passagem por meio de uma rota de fluxo composta por três dutos. Neste exemplo, considera-se que os três dutos suportam reversão. Assim, esta rota interliga a origem A ao destino D com intermediação das bases B e C em sentido normal de fluxo e a origem D ao destino A em sentido reverso de fluxo.

Conforme a figura, o trecho AB apresenta vazão menor do que BC, havendo a necessidade de operação pulmão por meio do acúmulo temporário de volume em B para

corresponder exatamente à vazão de BC. Assim, as bateladas em BC ficam temporariamente estagnadas à espera da satisfação do volume de vazão para serem empurradas. No sentido reverso, CB apresenta vazão maior do que BA, também havendo a necessidade de operação pulmão para evitar que o fluxo em CB fique estagnado. Neste caso, o rebombeio em BA pode ocorrer imediatamente após o recebimento do volume de BC, formando um fluxo contínuo temporalmente. Em relação aos trechos BC e CD em sentido normal ou DC e CD em sentido reverso, ambos apresentam a mesma vazão, podendo ocorrer a passagem direta e imediata das bateladas de um trecho para o outro (FELIZARI, 2009).

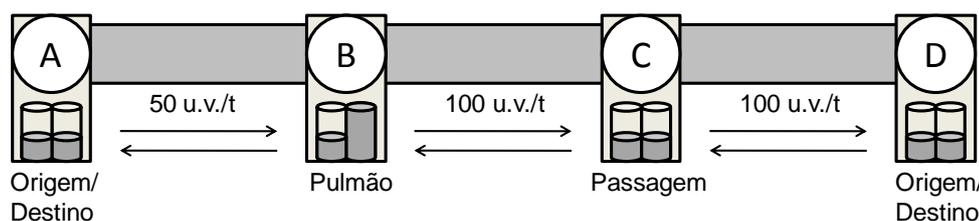


Figura 7 – Operação Pulmão e de Passagem (FELIZARI, 2009)

Mesmo o transporte dutoviário sendo o mais vantajoso economicamente, este ainda não apresenta abrangência nacional ou pelo menos conexão entre todos os principais mercados consumidores nacionais. Desta forma, atualmente, os modais aquaviários consistem na alternativa mais conveniente para realizar o transporte de petróleo e seus derivados em território nacional em regiões não abrangidas pela rede dutoviária. Este modal tem como principal vantagem o transporte de um alto volume de produtos, que contribui para a redução do custo por unidade volumétrica, e a facilidade de acesso às bases (de produção, armazenamento e consumo) distribuídas pela costa marítima e por regiões remotas com acesso fluvial.

Em termos operacionais, a navegação pela costa é denominada de cabotagem e é realizada por navios de diferentes tipos e dimensões. Exemplos são os navios cargueiros ou convencionais (qualquer tipo de carga), graneleiros ou tanque (cargas líquidas em granel) e navios para transporte de GLP. Por sua vez, a navegação fluvial é denominada de interior, sendo realizada normalmente por embarcações chamadas de barcaças, as quais apresentam baixo calado que permitem a navegação em rios.

Nos modais aquaviários, diferentemente dos dutos, o tempo de transporte é incrementado pelo tempo despendido em operações de carga e descarga de produtos e, em certas situações, também pela espera para a realização de tais operações. O tempo de espera de um navio no entorno de um porto é conhecido como sobreestadia de navios. Nestas operações, os navios aguardam primeiramente pela oportunidade de atracação e depois de

atracados, pelo tempo necessário para os procedimentos de carga/descarga. Enquanto em dutos, a própria operação de carregamento leva à movimentação de bateladas e conseqüentemente ao descarregamento de bateladas posicionadas na extremidade final do duto.

Ademais, as operações de carregamento e descarregamento em terminais aquaviários apresentam custos para utilização dos berços de atracação de embarcações. O custo é dado por unidade de tempo, sendo que a contagem do tempo é iniciada com o começo das operações de atracação e finalizada com a desatracação da embarcação (BRITO, 2008). No entanto, nem sempre as operações de carga/descarga ocorrem em relação aos terminais aquaviários, tais operações também podem ocorrer propriamente entre diferentes navios com mesmo ou diferentes tamanhos. Por exemplo, a carga de um único navio pode ser descarregada em um único navio de grande porte ou em vários outros navios menores. Este processo é chamado de operação de transbordo.

Por fim, os modais ferroviários e rodoviários complementam a malha de transporte petrolífera brasileira. A interconectividade entre estes tipos de modais permitem o atendimento de todas as regiões brasileiras, principalmente às bases não alcançáveis pelas vias dutoviárias ou aquaviárias. O modal ferroviário é indicado ao transporte de grandes volumes a médias distâncias, apresentando alta eficiência energética. Por sua vez, os modais rodoviários são mais indicados para o transporte de pequenos volumes a pequenas distâncias ou a regiões mais longínquas não acessíveis por outro modal. O modal rodoviário apresenta grande abrangência nacional, mas ainda o seu custo e manutenção são bastantes elevados (BALLOU, 2004).

2.2.3 Classe de Produtos Suportados

A malha petrolífera brasileira é separada conceitualmente em três sub-redes devido às diferentes propriedades de três classes de produtos: a classe do GLP, dos produtos escuros e dos produtos claros. Estas sub-redes são geralmente tratadas de forma independente devido às suas propriedades distintas (FELIZARI, 2009).

A classe do GLP corresponde à combinação de hidrocarbonetos leves e gasosos, principalmente o propano e butano. O GLP é obtido do processo de refino do petróleo e é popularmente conhecido como gás de cozinha. Este tipo de produto é armazenado e geralmente transportado em estado líquido. Tal estado pode ser obtido por meio da elevação da pressão ou redução da temperatura.

A classe dos escuros é formada por produtos de coloração escura, pesados e bastantes viscosos. Como exemplos de produtos desta classe têm-se o óleo combustível e o asfalto. Estes produtos precisam ser aquecidos a certa temperatura a fim de controlar as suas viscosidades. Por sua vez, a classe dos claros apresenta coloração clara, são líquidos, leves e poucos viscosos. Os produtos desta classe são caracterizados pelo seu alto padrão de qualidade e valor comercial, muito superior aos produtos da classe dos escuros. Exemplos de produtos desta classe são o diesel, a gasolina e o querosene.

Cada produto da classe de claros pode ser classificado de acordo com diferenças em termos de composição química. Como exemplo, o diesel é classificado em Diesel A (sem adição de biodiesel), Diesel B (com adição de biodiesel), Diesel C (baixíssimo teor de enxofre) e Diesel D (para uso marítimo). Dentro de cada classe, o teor e composição química definem o grau de qualidade ou nobreza de um produto. Particularmente, o diesel do tipo A engloba subprodutos como o Diesel S-50, Diesel S-500, Diesel S-1800 e o Diesel S-2000, os quais se diferem principalmente pelo teor de enxofre em suas composições⁸. Neste caso, a nobreza de cada produto é definida pelo seu teor de enxofre, quanto menor for o teor, mais nobre é o produto.

Mesmo que os subprodutos sejam especializações de uma classe maior de produtos, estes são geralmente armazenados e transportados com o máximo de cuidado para evitar que um produto menos nobre contamine um mais nobre. No entanto, a contaminação pode ser desejável em situações de escassez e demanda de um dado produto menos nobre ou a falta de capacidade em tanques para armazenar um produto mais nobre. Nestes casos, um produto mais nobre é propositalmente misturado com outro menos nobre com a intenção de formar o produto demandado. Este processo é chamado de degradação de produtos.

2.3 MODELO DO PROBLEMA DE PLANEJAMENTO DE TRANSFERÊNCIA DE DERIVADOS DE PETRÓLEO

Conforme abordado na seção anterior, o problema real pode apresentar grau de detalhamento muito elevado para um planejamento em nível tático. Por conta disto, as principais características do problema real foram abstraídas a fim de formar o modelo do problema.

⁸ Nesta nomenclatura, o S é o símbolo químico do enxofre (*Sulphur* em latim) e o valor numérico representa a quantidade em partes por milhão de enxofre na composição do diesel.

O modelo do problema pode ser estruturalmente representado por meio de um grafo direcionado ponderado ou também chamado de dígrafo ponderado. Um dígrafo ponderado consiste em uma relação entre um conjunto de elementos chamados vértices e outro conjunto de elementos chamados arcos, onde cada arco é associado a um ou dois vértices e apresenta uma direção e um valor para representar o peso da associação (TUTTE, 2001). Mais precisamente, este grafo é representado por $G(B, A)$, onde B é o conjunto finito de bases b (equação (1)) e A é o conjunto finito de arcos a (equação (2)). Um arco $a \in A$ conecta um par de bases (b_i, b_j) , onde $b_i, b_j \in B$ são respectivamente bases de origem e destino. A lista com as nomenclaturas dos conjuntos, índices e parâmetros utilizados nas equações definidas neste capítulo está apresentada na seção B.1 do APÊNDICE B.

$$B = \{b_1, \dots, b_{|B|}\} \quad (1)$$

$$A = \{a_1, \dots, a_{|A|}\} \quad (2)$$

Graficamente, os vértices de um grafo são representados por pontos ou círculos e os arcos direcionados são representados por meio de setas que conectam os círculos. Desta forma, a malha de transporte de derivados de petróleo é uma representação natural de um grafo, onde os vértices correspondem às bases e os arcos aos modais de transporte que conectam duas bases unidirecionalmente ou bidirecionalmente com custos e capacidades de transporte associados. A Figura 4 ilustra esta representação, porém, com a omissão dos custos e capacidades de transporte.

Esta representação facilita o entendimento do problema, permitindo tratar os componentes da malha de forma mais genérica, unicamente em termos de vértices e arcos. Ademais, a transferência de produtos entre as bases apenas podem ocorrer por meio de um conjunto finito R de rotas de fluxos (equação (3)). Uma rota de fluxo $r \in R$ consiste em uma lista de arcos $a \in A$ de mesma direção, arranjados de forma adjacente, a fim de formar um caminho válido entre uma base de origem b_i e uma base de destino b_j . As bases intermediárias entre b_i e b_j não são explicitamente consideradas, pois os produtos somente são descarregados nas bases de destino.

$$R = \{r_1, \dots, r_{|R|}\}, \forall r_i = \{a_1, \dots, a_n\}, a_i \in A, \forall n \in \mathbb{N} \quad (3)$$

Além da abstração representacional em termos de grafo, o modelo do problema também é composto por outras formas de abstração. Estas abstrações são apresentadas nas

subseções seguintes fazendo referência às particularidades do problema. Essencialmente, a subseção 2.3.1 descreve a abstração relacionada à discretização do horizonte temporal de planejamento; a subseção 2.3.2 descreve a abstração relacionada à organização dos produtos; a subseção 2.3.3 descreve a abstração em relação à capacidade de armazenamento de cada base e a subseção 2.3.4 em relação à capacidade de transporte dos modais. Finalmente, a seção 2.3.5 descreve a abstração em termos de topologia da malha brasileira e a seção 2.3.6 apresenta uma reflexão final sobre o modelo.

2.3.1 Abstração em Relação ao Tempo

Por se tratar de um planejamento em nível tático, não há a necessidade de considerar o tempo do horizonte de planejamento com a mesma precisão exigida em nível operacional, ou seja, em termos de horas ou minutos. Em nível tático, o tempo pode ser discretizado em intervalos de granularidade mais grossa a fim de suportar um horizonte de planejamento maior do que o praticado em nível operacional.

No modelo do problema foco deste trabalho, conforme a equação (4), o horizonte de planejamento é representado por H , sendo este formado por n períodos de planejamento per . Cada período per normalmente consiste no intervalo de um mês e o horizonte H normalmente corresponde a três períodos de planejamento. Na prática, o planejamento segue o processo de horizonte deslizante, ou seja, o planejamento é realizado a cada mês, considerando o mês corrente e outros subsequentes. Então, as informações de oferta e demanda de produtos em cada base, bem como as capacidades de armazenamento e de transporte são dadas separadamente para cada período.

$$H = \{per_1, \dots, per_n\}, \forall per_i = \{d_1, \dots, d_{|per|}\}, per_i \subseteq H, \forall n \in \mathbb{N} \quad (4)$$

Porém, como a intenção é conceber uma solução de planejamento mais próxima ao nível operacional, o modelo precisa considerar o tempo em parcelas menores. Desta forma, considera-se a discretização de cada período per em unidades de dias d (cf. a eq. (4)). Com isso, todas as operações envolvendo as bases e modais devem automaticamente ser tratadas em termos de dias. A Figura 8 ilustra a forma hierárquica de tratamento do tempo, apresentando o desmembramento do horizonte em períodos e consequente discretização do tempo dentro de cada período em termos de dias.

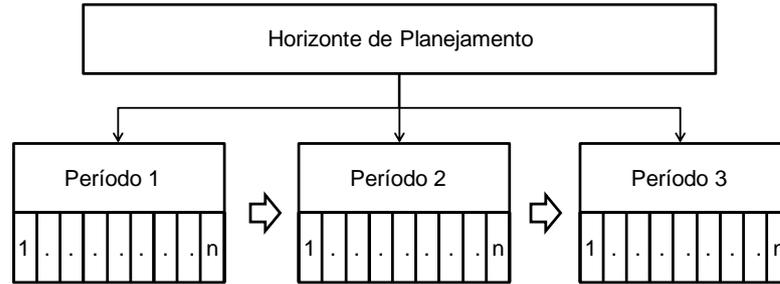


Figura 8 – Desmembramento do Horizonte e Discretização Temporal em Dias

Devido ao desmembramento do horizonte em períodos, o processo de planejamento é realizado de forma incremental em relação aos períodos, ou seja, um período por vez. Porém, as movimentações de produtos entre os períodos também precisam ser consideradas, as quais ocorrem quando o tempo de transporte acrescido à data de escoamento é superior ao dia final de um período per_i , $i < |H|$. Portanto, o planejamento intraperíodo deve gerar fluxos com datas de escoamento e recebimento pertencentes ao período per_i em questão e também gerar, se necessário, fluxos com datas de escoamento em um período per_{i-n} e recebimento em um período per_{i+m} , sendo que $\forall i, n \in \mathbb{N}, m \in \mathbb{N}, i - n \geq 1$ e $i + m \leq |H|, n \neq m$.

2.3.2 Abstração em Relação aos Produtos

A malha brasileira de derivados de petróleo é subdividida em três sub-redes independentes de acordo com as seguintes classes de produtos: claros, escuros e GLP. Apesar das diferenças entre as classes, as particularidades ímpares de cada uma foram desconsideradas no modelo a fim de que o planejamento possa ser executado da mesma maneira para as três. Assim, um mesmo método computacional pode ser aplicado sem modificações para cada classe de produtos. Em termos de planejamento, o conjunto formado por uma sub-rede representativa de uma classe e a disposição inicial dos produtos nesta sub-rede é considerado como um cenário de planejamento.

No entanto, a classificação de produtos em apenas três classes ainda é insuficiente para representar a diversidade de produtos suportados pela malha. Esta classificação se baseia em características muito genéricas, sendo que os produtos que compõem tais classes apresentam várias outras propriedades distintas. Dentro de cada classe, todos os produtos suportados são representados por um conjunto finito PROD, sendo que tais produtos são classificados em grupos de produtos gr de acordo com suas propriedades químicas mais significativas. Ademais, um produto $prod_i \in gr$ pode estar contido em apenas um único grupo de produtos gr . Assim, considera-se que uma classe de produtos é composta por um ou

vários grupos de produtos gr_i e cada grupo gr_i é composto por um ou mais produtos $prod_i$. Esta organização hierárquica é descrita na equação (5) e ilustrada na Figura 9.

$$PROD = \{gr_1, \dots, gr_n\}, \forall gr_i = \{prod_1, \dots, prod_m\}, m \in \mathbb{N}, \bigcap_{i=1}^n gr_i = \emptyset, n \in \mathbb{N} \quad (5)$$

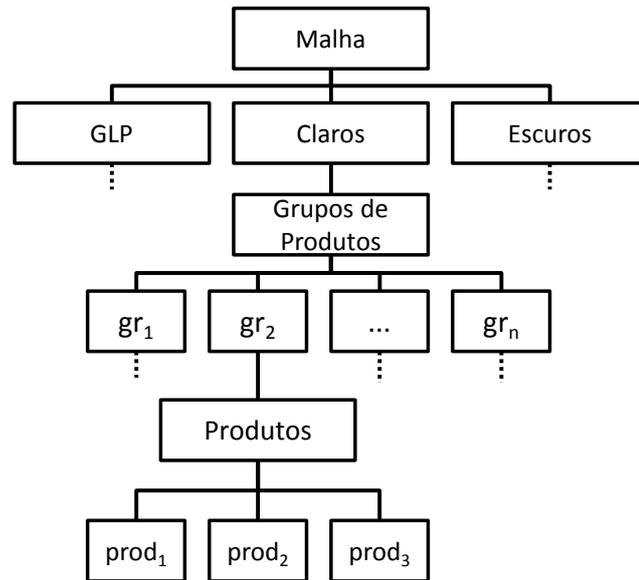


Figura 9 – Organização de Produtos em Grupos de Produtos

Em relação às bases, cada uma suporta um ou mais grupos de produtos gr e conseqüentemente um ou mais tipos de produtos $prod$. No modelo, os dados referentes ao estoque de cada produto e capacidade de armazenamento das bases são informados por período, sendo que a capacidade de armazenamento é informada por grupo de produto. Em referência especial aos dados do estoque (i.e. estoque inicial e balanço), estes são informados particularmente por tipo de produto. A Figura 10 ilustra a organização destes dados.

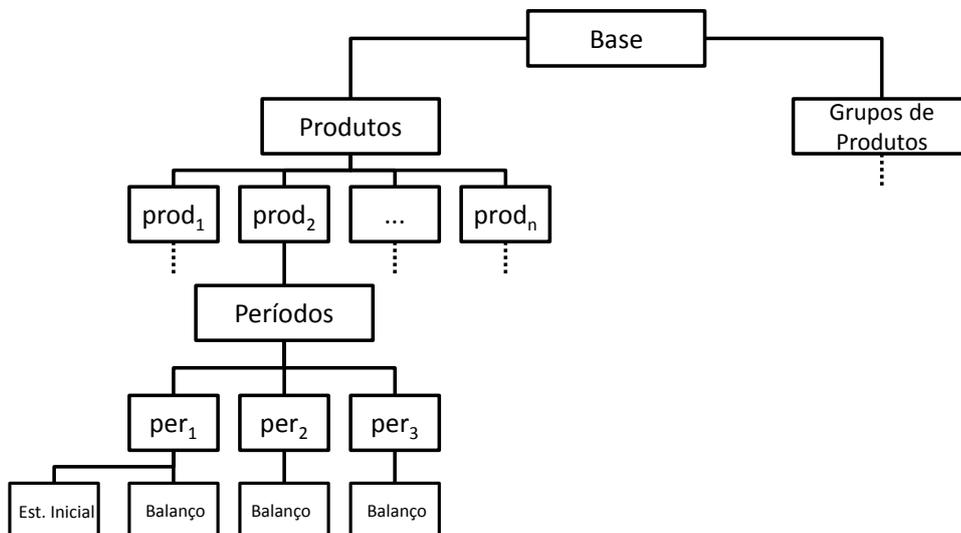


Figura 10 – Organização dos Dados Referentes a Produtos em uma Base

De acordo com a organização apresentada, o balanço de massa $bal_{b,prod,per} \in \mathbb{Z}$ é dado para cada base b , produto $prod$ e período per . Basicamente, o balanço refere-se à diferença entre a previsão de produção e de consumo em cada período para um dado produto. O estoque inicial $e_{b,prod}^{initial} \in \mathbb{N}$ também é dado para cada base b e produto $prod$, mas apenas para o primeiro período per do horizonte de planejamento. Basicamente, o estoque inicial consiste no volume disponível em estoque de um produto no início do horizonte de planejamento. No modelo, as informações de estoque são dadas em valores inteiros em termos de unidades de volume, cabendo ao processo de planejamento decidir quantas unidades inteiras formarão cada fluxo de movimentação.

O valor de balanço $bal_{b,prod,per}$ exprime a situação de estoque de um produto, podendo assumir um valor positivo para representar oferta, negativo para representar demanda ou um valor neutro (i.e. zero). Mais precisamente, quando a produção de um produto for maior do que seu consumo, o balanço corresponderá a um valor positivo, caso contrário, o balanço corresponderá a um valor negativo. Ainda, o balanço poderá apresentar valor zero quando a produção igualar ao consumo. Em referência ao cenário real, as refinarias geralmente apresentam balanço positivo por produzirem mais do que consomem de um dado produto, os pontos de consumo apresentam balanço negativo devido às suas demandas e os terminais apresentam balanço zero por não apresentarem produção e nem demanda de produtos.

Durante o horizonte de planejamento, pode ocorrer de uma base b apresentar balanço positivo para um produto $prod_i$ e negativo ou nulo para outro produto $prod_j$ em um mesmo período per_i ou períodos diferentes. Também, admitindo variações nas taxas de produção e consumo entre os períodos, pode ocorrer de uma base b apresentar balanço positivo de um produto $prod_i$ em um período per_i e balanço negativo para o mesmo produto $prod_i$ em um período seguinte per_{i+1} . Neste caso, nota-se a necessidade de uma abordagem de solução que não foque apenas no planejamento isolado de cada período, mas que também considere as suas dependências.

No modelo atual, por causa da disponibilidade dos dados em termos de balanço por período, há a necessidade de manipulação destes valores para corresponder ao estoque diário de produtos em cada base. Em um momento mais oportuno, as informações de produção e consumo poderão ser dadas em unidades diárias com a intenção de encontrar soluções de planejamento de melhor qualidade. Para o momento, uma forma de contornar esta limitação corresponde à linearização do balanço de cada período pelos dias do respectivo período.

Desta forma, o balanço de massa $bal_{b,prod,per}$ é linearmente distribuído pelos dias de cada período per de acordo com a equação (6). O resto da divisão inteira é adicionado ao balanço do primeiro dia d do período per . Como resultado da linearização, obtém-se o estoque diário acumulado do produto, que graficamente pode corresponder a uma reta crescente, decrescente ou constante. Neste trabalho, o conjunto destes valores em relação ao tempo é chamado de curva de estoque. A Figura 11 apresenta um exemplo da formação de uma curva de estoque para um dado produto a partir dos valores de estoque inicial e balanços apresentados na tabela adjunta.

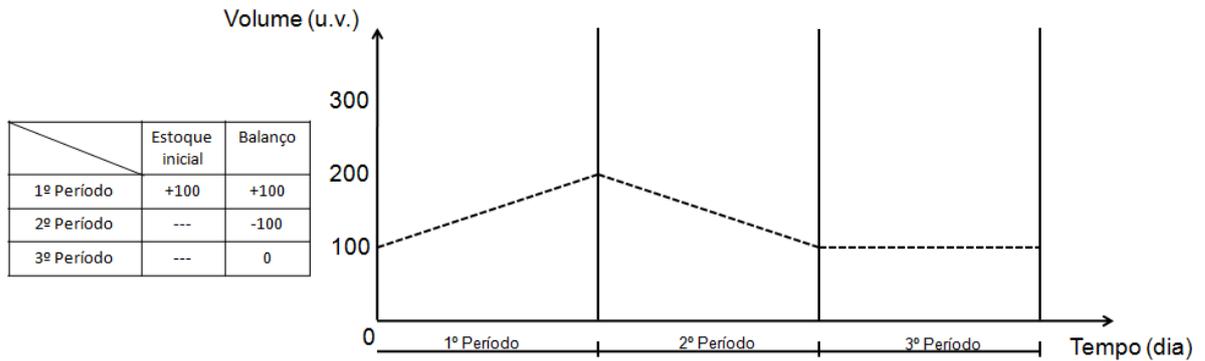


Figura 11 – Formação da Curva de Estoque

Mais precisamente, para a formação de uma curva de estoque $SC_{b,prod}$ de uma base b para um produto $prod$, o valor de estoque $e_{b,prod,d}$ para cada dia d é dado pela equação (7). Assim, o estoque no dia d na base b para o produto $prod$ é calculado pela soma do estoque $e_{b,prod,d-1}$ no dia anterior $d-1$ com o balanço $bal_{b,prod,d}$ no dia corrente d e a diferença entre o volume recebido $vol_{b,prod,d}^{received}$ e volume enviado $vol_{b,prod,d}^{sent}$ pela base b no dia corrente d . O estoque diário $e_{b,gr,d}$ da base b para o grupo gr é dado pela equação (8). Portanto, o estoque diário da base b para o produto $prod$ no horizonte forma a curva de estoque $SC_{b,prod}$ de acordo com a equação (9). A curva de estoque $SC_{b,gr}$ para cada grupo de produto gr é definida na equação (10).

$$bal_{b,prod,d} = \begin{cases} \left\lfloor \frac{bal_{b,prod,per}}{|per|} \right\rfloor, \forall b \in B, \forall prod \in gr, d \in per, d \neq 1 \\ bal_{b,prod,d} + (bal_{b,prod,per} \% |per|), \forall b \in B, \forall prod \in gr, d = 1 \end{cases} \quad (6)$$

$$e_{b,prod,d} = e_{b,prod,d-1} + bal_{b,prod,d} + vol_{b,prod,d}^{received} - vol_{b,prod,d}^{sent}, 1 \leq d \leq |per| \quad (7)$$

$$e_{b,gr,d} = \sum_{prod \in gr} e_{b,prod,d}, \forall b \in B, \forall prod \in gr, \forall gr \subseteq PROD, \forall d \in per \quad (8)$$

$$SC_{b,prod} = \{e_{b,prod,d}, e_{b,prod,d+1}, \dots, e_{b,prod,\sum_{i=1}^{|H|} |per_i|}\} \quad (9)$$

$$SC_{b,gr} = \{e_{b,gr,d}, e_{b,gr,d+1}, \dots, e_{b,gr,\sum_{i=1}^{|H|} |per_i|}\} \quad (10)$$

Na malha brasileira, os produtos transferidos formam um conjunto finito F de fluxos de transferência f . A estrutura de um fluxo f é apresentada na equação (11). Mais precisamente, um fluxo f consiste na transferência de um dado volume v de um dado produto $prod$ por uma rota r com o dia de saída d^{depart} no período per^{depart} e dia de entrega d^{arrive} no período per^{arrive} .

$$F = \{f_1, \dots, f_{|F|}\}, \forall f_i = (prod, v, r, d^{depart}, d^{arrive}, per^{depart}, per^{arrive}) \quad (11)$$

O subconjunto de fluxos de transferência já programados no planejamento anterior que influenciam no planejamento corrente e o subconjunto de fluxos obrigatórios também devem ser considerados na formação das curvas de estoque. Estes fluxos podem se referir a movimentações que já estão em operação ou a movimentações que obrigatoriamente farão parte do conjunto de transferências planejadas para o horizonte corrente. No modelo, os fluxos em operação são denominados de estoque em trânsito e são representados por $F^t \subseteq F$. Por sua vez, os fluxos obrigatórios são denominados de transportes comprometidos e são representados por $F^c \subseteq F$. Estes últimos são especialmente definidos pelos especialistas para o planejamento corrente e não devem ser alterados pela solução computacional. A Figura 12 apresenta a estrutura das informações referentes aos fluxos em trânsito e comprometidos. Ambos os tipos de fluxos apresentam a mesma estrutura.

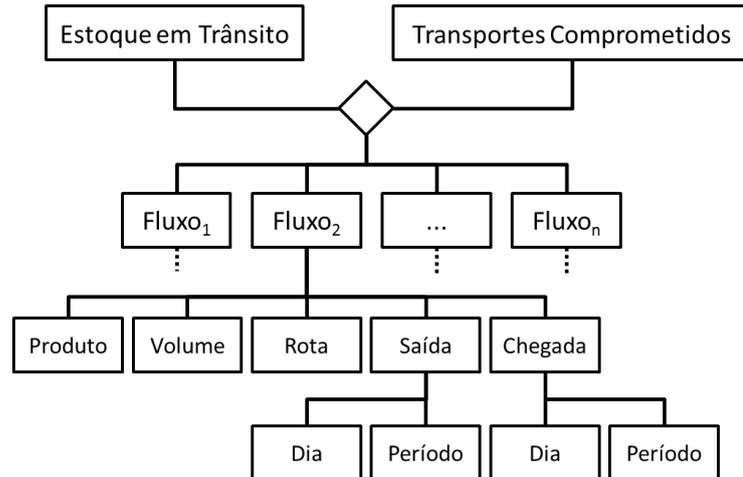


Figura 12 – Organização dos Dados dos Fluxos em Trânsito e Comprometidos

Ademais, em situações de escassez de um produto na malha, pode não ser possível atender a demanda de um produto por vias normais de transferência entre as bases. Também, mesmo que a transferência seja possível, ainda ela pode apresentar um custo muito alto. Nestes casos, pode ser necessário fazer uso de operações de degradação de produtos.

Uma operação de degradação consiste na transformação de um volume v de um produto $prod_i$ mais nobre no mesmo volume v de um produto $prod_j$ menos nobre, quando estes são compatíveis para degradação. A operação de degradação é considerada como uma operação eventual, justamente por ser geralmente empregada em situações de extrema necessidade de estoque.

A Figura 13 apresenta os principais componentes de uma operação de degradação. Uma operação de degradação é formada por um produto fonte $prod_i$ e um produto alvo $prod_j$ e apresenta um custo k^{deg} associado. No modelo, o custo de degradação é discretizado em apenas quatro valores: nulo, baixo, médio e alto.

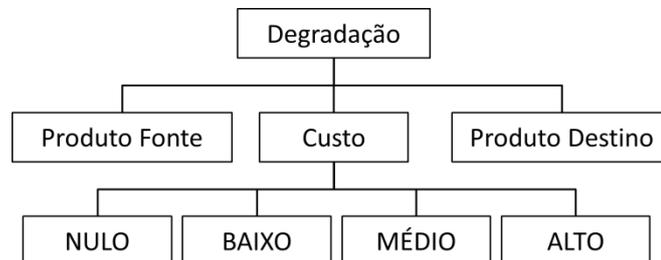


Figura 13 – Organização dos Dados de Degradação de Produtos

A operação de degradação pode também estar associada com a transferência de produtos. Por exemplo, se uma base b_j precisar de um volume v de um produto $prod_j$ para atender a sua demanda e não tiver produtos compatíveis em estoque para degradação, ela pode avaliar a possibilidade de receber um produto $prod_i$ mais nobre de uma base b_i para degradar

para o produto $prod_j$ desejado. Certamente, se houver a possibilidade, a base b_j poderá receber o próprio produto $prod_j$ de uma base b_i com a qual está conectada por rotas de recebimento.

Portanto, uma operação de degradação também contribui para a redução do custo total de transporte ao envolver a possibilidade de transferência de produtos. Por conta disto, qualquer operação de degradação deve ser cuidadosamente avaliada. Deste modo, uma base b_j sempre deve ponderar os custos de degradação e transferência para decidir sobre a execução de uma operação de degradação interna de um produto $prod_i$ para um produto $prod_j$ ou então de uma operação de transferência direta do produto desejado $prod_j$ de uma base b_i . Dependendo do custo da transferência direta do produto desejado, pode haver situações em que a degradação interna pode ser mais vantajosa, principalmente quando a transferência exige uma operação de importação de produtos.

2.3.3 Abstração em Relação à Capacidade de Armazenamento

No modelo, as informações sobre os limites de armazenamento físico máximo $PL_{b,gr,d}^{max}$ e mínimo $PL_{b,gr,d}^{min}$ e operacional máximo $OL_{b,gr,d}^{max}$ e mínimo $OL_{b,gr,d}^{min}$ são dados para cada grupo de produto gr . Estas informações são iguais para cada dia d de um dado período per , podendo variar de um período para outro, principalmente devido à programação de atividades de manutenção e limpeza que podem demandar desativação temporária de um ou mais tanques. Como um grupo gr pode ser formado por um ou mais produtos $prod$, geralmente a capacidade de armazenamento em cada período per é compartilhada pelos produtos $prod \in gr$. A Figura 14 ilustra a organização dos dados referentes aos limites físicos e operacionais por grupo de produto e também referente ao suporte da base a operações de transbordo e sobreestadia para cada grupo de produto. Estas operações serão descritas mais adiante nesta seção.

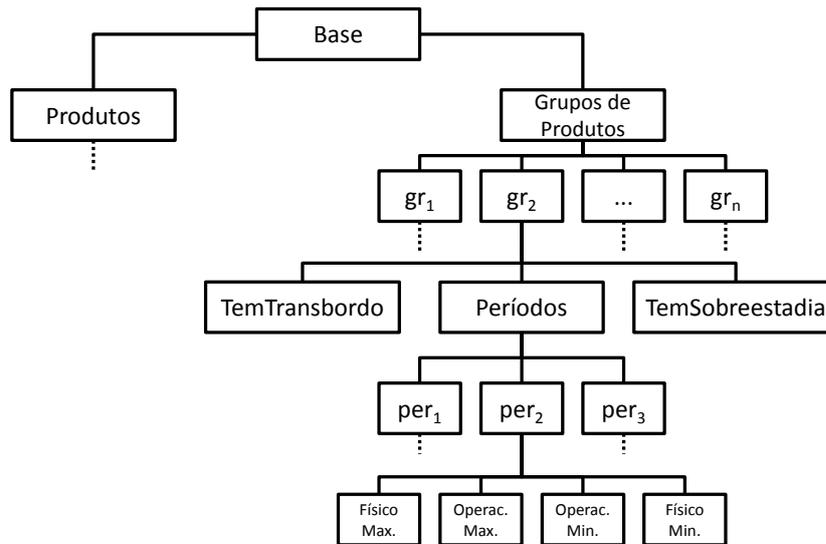


Figura 14 – Organização dos Dados Referentes aos Grupos de Produtos em uma Base

Para conseguir um compartilhamento mais adequado da capacidade de armazenamento de um grupo de produto gr pelos seus produtos, define-se uma capacidade particular física $(PL_{b,prod,d}^{max}, PL_{b,prod,d}^{min})$ e operacional $(OL_{b,prod,d}^{max}, OL_{b,prod,d}^{min})$ virtual para cada produto $prod \in gr$.

Estas capacidades são calculadas proporcionalmente aos valores iniciais de estoque (i.e. definidos por meio do estoque inicial $e_{b,prod}^{initial}$ e balanço de massa $bal_{b,prod,per}$) dos produtos pertencentes ao respectivo grupo gr em cada período per . A forma pela qual ocorre esta distribuição varia de acordo com o tipo da base, ou seja, produtora, consumidora ou terminal. Quando a base é produtora (e.g. refinaria), a distribuição ocorre de forma normal às proporções de estoque de cada produto no último dia de cada período, ou seja, quanto maior o estoque de um produto maior é a o espaço a ser reservado para este produto. Neste caso, uma base produtora apresenta uma maior capacidade para armazenar os produtos que produz em maior quantidade.

Por sua vez, quando a base é uma consumidora (e.g. ponto de consumo) ou terminal, a distribuição ocorre de forma inversa em relação às informações de estoque. No caso de um consumidor, apenas as informações de estoque inicial são usadas para definir o estoque em cada período, uma vez que tais bases sempre apresentam balanço zero (i.e. não apresentam produção ou consumo, $bal_{b,prod,per} = 0$). Por fim, em nível inter-região, a capacidade particular de cada produto de uma região consiste na soma das capacidades particulares dos produtos suportados pelas bases que a compõem.

Em terminologia matemática, o limite particular físico $PL_{b,prod,d}^{max}$ e operacional $OL_{b,prod,d}^{max}$ de cada produto $prod$ em cada dia d de cada período per são definidos pelas

equações (14) e (15), onde $x^{normal|inverso}$ e $y^{normal|inverso}$ representam respectivamente a proporção da capacidade física e operacional de um grupo gr a ser distribuída entre os produtos $prod \in gr$. Esta proporção é calculada de acordo com os valores de estoque dos produtos no último dia d de cada período per_i , ou seja, no dia $d_{per_i}^f$ (eq. (12)). Por questão de cálculo, quando os valores de estoque dos produtos do grupo variam entre positivos e negativos, se faz necessário elevar suas escalas para que todos se situem no mesmo espaço dos números positivos. Isto é feito pelo cálculo do valor de estoque $e_{b,prod,d}^+$ conforme a equação (13), a qual depende do valor de estoque negativo mais baixo entre os produtos, ou seja, o valor de estoque $e_{b,prod,d}^-$. Por fim, os limites mínimos operacional e físico particulares são calculados de acordo com as equações (16) e (17).

$$d_{per_i}^f = \sum_1^i |per_i|, \forall per_i \subseteq H \quad (12)$$

$$\begin{aligned} e_{b,prod,d_{per}}^+ &= e_{b,prod,d_{per}} + \left(|e_{b,prod,d_{per}}^-| * 2 \right), \text{ onde} \\ e_{b,prod,d_{per}}^- &= \begin{cases} \min(e_{b,prod,d_{per}}^-), \forall prod \in gr, \exists e_{b,prod,d_{per}}^- < 0 \\ 0, \text{ senão} \end{cases} \end{aligned} \quad (13)$$

$$PL_{b,prod,d}^{max} = \begin{cases} x^{normal} * e_{b,prod,d_{per}}^+, \text{ tipo} = \text{produtora} \\ x^{inverso} / e_{b,prod,d_{per}}^+, \text{ tipo} = \text{consumidora ou terminal} \end{cases}, \text{ onde} \quad (14)$$

$$x^{normal} = PL_{b,gr,d}^{max} / \sum_{prod=1}^{|gr|} e_{b,prod,d_{per}}^+, \forall prod \in gr, \sum_{prod} \frac{x^{inverso}}{e_{b,prod,d_{per}}^+} = PL_{b,gr,d}^{max}$$

$$\begin{aligned} OL_{b,prod,d}^{max} &= \begin{cases} y^{normal} * e_{b,prod,d_{per}}^+, \text{ tipo} = \text{produtora} \\ y^{inverso} / e_{b,prod,d_{per}}^+, \text{ tipo} = \text{consumidora ou terminal} \end{cases} \\ y^{normal} &= OL_{b,gr,d}^{max} / \sum_{prod=1}^{|gr|} e_{b,prod,d_{per}}^+, \forall prod \in gr, \sum_{prod} \frac{y^{inverso}}{e_{b,prod,d_{per}}^+} = OL_{b,gr,d}^{max} \end{aligned} \quad (15)$$

$$OL_{b,prod,d}^{min} = OL_{b,gr,d}^{min} * \left(\frac{e_{b,prod,d_{per}}^+}{e_{b,gr,d_{per}}^+} \right) \quad (16)$$

$$PL_{b,prod,d}^{min} = PL_{b,gr,d}^{min} * \left(\frac{e_{b,prod,d_{per}}^+}{e_{b,gr,d_{per}}^+} \right) \quad (17)$$

Tais capacidades particulares permitem estabelecer um nível de estoque ideal para cada produto, porém, estas não precisam ser rigorosamente respeitadas, pois os seus cálculos não levam em conta a situação de estoque das demais bases do cenário. Então, em situações em que seja eminente a necessidade de equilíbrio de estoque entre as bases do cenário, tais capacidades particulares podem ser violadas. No entanto, em uma situação ideal de estoque, principalmente quando a capacidade de armazenamento está totalmente ocupada, é preferível que uma base mantenha um estoque de cada produto proporcional às capacidades particulares.

Outra generalização contemplada pelo modelo refere-se ao tratamento da capacidade de armazenamento de forma agregada para cada grupo de produto gr . A capacidade agregada é formada pela soma das capacidades individuais de cada tanque que suportam os produtos de um mesmo grupo gr . A Figura 15 ilustra esta generalização, onde um único tanque virtual ou agregado representa a soma das capacidades dos tanques individuais. Também, a figura ilustra que um tanque virtual suporta o armazenamento de apenas um único grupo de produtos gr .

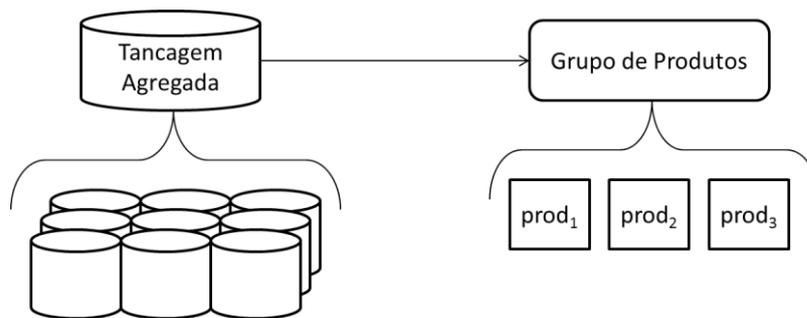


Figura 15 – Abstração da Capacidade de Armazenamento

Assim, considera-se que a manutenção de um nível de estoque satisfatório em um tanque virtual em cada período também satisfaz os níveis de estoques dos tanques individuais. Portanto, as curvas de estoque $SC_{prod,b}$ e $SC_{gr,b}$ de cada base b deve satisfazer restrições fracas e fortes em cada período per a fim de formar uma solução factível. As restrições fortes referem-se à satisfação da capacidade de estoque física e as restrições fracas referem-se à satisfação da capacidade de estoque operacional. A satisfação das restrições fracas é desejável para formar soluções de alta qualidade, mas estas podem ser violadas quando necessário sem

afetar a factibilidade de estoque. As restrições fortes são apresentadas nas equações (18) e (19) e as restrições fracas são apresentadas nas equações (20) e (21).

Nestas definições, o estoque diário de cada base b para cada produto $prod$ e grupo gr , respectivamente, devem respeitar os limites físico $PL_{b,gr,per}^{min}, PL_{b,gr,per}^{max}$ e operacional $OL_{b,gr,per}^{min}, OL_{b,gr,per}^{max}$ do grupo gr em cada período per . Estas restrições são complementares, porque mesmo que a curva de estoque $SC_{gr,b}$ respeite a capacidade física ou operacional, uma curva de estoque $SC_{prod,b}$ de um produto $prod \in gr$ pode estar violando tais capacidades. Por conta disto, esta situação deve ser evitada. Além do mais, mesmo que as capacidades operacional e física reais se refiram a um dado grupo de produto gr , a equação (21) busca garantir que o estoque diário $e_{prod,b,d}$ respeite o limite operacional mínimo particular $OL_{prod,b,per}^{min}$ de cada produto $prod$ a fim de assegurar pelo menos um volume mínimo de estoque para cada produto com demanda.

$$PL_{b,gr,per}^{min} \leq e_{b,gr,d} \leq PL_{b,gr,per}^{max} \quad \forall gr \subseteq PROD, \forall d \in per, \forall per \subseteq H \quad (18)$$

$$PL_{b,gr,per}^{min} \leq e_{b,prod,d} \leq PL_{b,gr,per}^{max} \quad \forall prod \in gr, \forall d \in per, \forall per \subseteq H \quad (19)$$

$$OL_{b,gr,per}^{min} \leq e_{b,gr,d} \leq OL_{b,gr,per}^{max} \quad \forall gr \subseteq PROD, \forall d \in per, \forall per \subseteq H \quad (20)$$

$$OL_{b,prod,per}^{min} \leq e_{b,prod,d} \leq OL_{b,gr,per}^{max} \quad \forall prod \in gr, \forall d \in per, \forall per \subseteq H \quad (21)$$

A Figura 16 ilustra graficamente uma situação de estoque considerada satisfatória. A figura representa o compartilhamento simultâneo da capacidade de um tanque virtual pelas curvas de estoque de dois produtos, durante um horizonte de planejamento correspondente a três períodos. As curvas de estoque destes produtos são apresentadas em linhas pontilhadas e a curva de estoque do grupo é apresentada em linha cheia. No exemplo, nota-se que a curva de estoque do grupo se mantém dentro da faixa operacional em todo o horizonte de planejamento, apesar de o mesmo não ocorrer com as curvas individuais de cada produto.

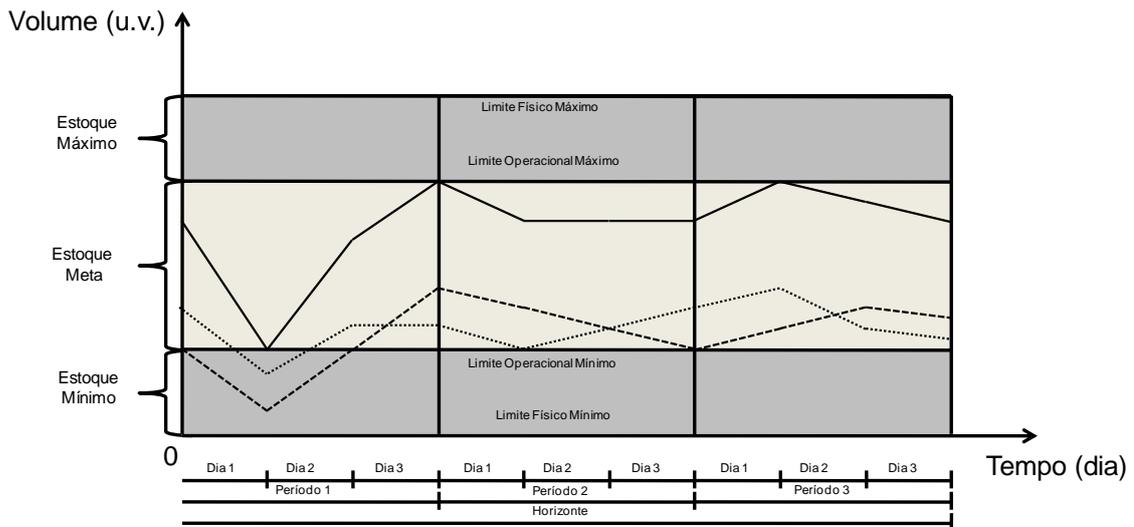


Figura 16 – Compartilhamento do Tanque pelas Curvas de Estoque

Durante o horizonte de planejamento, conforme as restrições fortes, uma situação que não pode ocorrer é a violação dos limites físicos por parte das curvas de estoque $SC_{prod,b}$ e $SC_{gr,b}$. Em relação ao limite físico máximo $PL_{b,gr,per}^{max}$, a violação pela curva de estoque de um produto $SC_{prod,b}$ ou grupo $SC_{gr,b}$ significa a falta de capacidade para armazenamento da produção devido à impossibilidade de escoamento. Esta situação deve ser evitada, pois caso fosse aplicada na prática, certamente resultaria na redução da taxa de produção e em consequentes prejuízos financeiros.

Em relação ao limite físico mínimo $PL_{b,gr,per}^{min}$, a violação pela curva de estoque de um produto $SC_{prod,b}$ ou grupo $SC_{gr,b}$ significa o não atendimento da demanda mínima para um ou mais produtos. Porém, mesmo que todas as curvas de estoque $SC_{prod,b}$ não violem tal limite, não é garantido que a demanda seja totalmente atendida. Esta incerteza se deve a prováveis variações na demanda prevista. Por isso, a curva de estoque do grupo $SC_{gr,b}$ precisa ser mantida na faixa operacional com a intenção de servir como estoque de segurança a fim de contornar tal problema. O estoque de segurança também é usado como prevenção em situações de atraso na entrega de produtos que podem ocorrer por diversos motivos, por exemplo, por causa de prováveis problemas elétricos e mecânicos nos meios de transporte.

Em situações mais críticas em termos de recursos de estoque e capacidade de armazenamento nas bases, algumas operações são utilizadas para ajudar a manter as curvas de estoque dentro das faixas de estoque de cada base. Estas operações são ditas eventuais por ocorrerem apenas em situações de necessidade. Exemplos de tais operações são as operações de transbordo, sobreestadia e de degradação de produtos.

A operação de degradação foi descrita na seção 2.3.2. Por sua vez, as operações de transbordo e sobreestadia ocorrem particularmente em terminais marítimos (i.e. portos) por causa do envolvimento de navios nas operações. Porém, não são todos os terminais marítimos que suportam tais operações. Ademais, o suporte é dado por grupo de produto gr conforme a organização dos dados na Figura 14. Assim, pode ocorrer de um terminal suportar operações de transbordo para um grupo de produto gr_i , mas não suportar para o grupo gr_j .

Uma operação de transbordo consiste na transferência de certo volume de produto recebido por uma base b_i por meio de uma rota marítima r para uma ou mais rotas conectadas a b_i , ou seja, $R_{b_i}^{sent} \subseteq R$. Esta operação permite que uma base b_i possa distribuir o volume de um fluxo recebido diretamente para outras bases $B_{b_i}^{sent} \subseteq B$ (i.e. não é necessário descarregar o volume nos tanques de b_i) ou servir parcial ou totalmente sua própria demanda (i.e. algumas bases apresentam restrições em seus píeres que impedem a atracagem de navios de grande porte). Portanto, esta operação é essencial para contornar certas limitações físicas dos terminais, tal como limitações em capacidade de armazenamento, restrições de atracagem ou simplesmente para reduzir os custos.

Por sua vez, a operação de sobreestadia (em nível tático) consiste na permanência de um navio por mais de um dia na área de um dado terminal. O modelo não determina custos adicionais para as operações de sobreestadia, uma vez que a definição do intervalo de tempo para esta operação não está incluída no escopo do planejamento tático. É importante ressaltar que uma operação de sobreestadia pode ocorrer juntamente com uma operação de transbordo. Isto ocorre quando parte do volume é descarregado diariamente em uma base marítima b_i através de um navio aliviador (i.e. um navio com baixa capacidade e calado) ou então quando o volume é distribuído para outras bases $B_{b_i}^{sent}$ através de navios aliviadores nos dias posteriores a chegada do fluxo na base b_i . Em resumo, a operação de sobreestadia pode ocorrer por causa da falta de capacidade suficiente de armazenamento em um terminal marítimo b_i ou nas bases de destino $B_{b_i}^{sent}$ (de operações de transbordo) no dia de chegada do navio na base b_i .

2.3.4 Abstração em Relação à Capacidade de Transporte

No modelo, considera-se que as operações de transferência de produtos apenas podem ocorrer por meio de um conjunto finito R de rotas já homologadas e cadastradas. Não há a possibilidade de criar ou propor novas rotas, mesmo que estas apresentem menor custo. O conjunto de rotas R está definido na equação (3).

Uma rota r pode ser composta por um ou mais arcos $a \in A$, sendo que um arco obrigatoriamente representa um único tipo de modal de transporte. Deste modo, uma rota r pode ser composta por um único tipo de modal ou uma combinação de tipos de modais a fim de movimentar produtos de uma base de origem b_i para uma base de destino b_j . Entre duas bases b_i e b_j , pode haver zero ou mais rotas registradas. Também, diferentes rotas podem possuir arcos em comum (i.e. $\bigcap_{i=1}^{|R|} r_i \neq \emptyset$), devendo compartilhar suas capacidades em cada período per . A Figura 17 ilustra a composição de uma rota e as informações relacionadas que são consideradas no modelo.

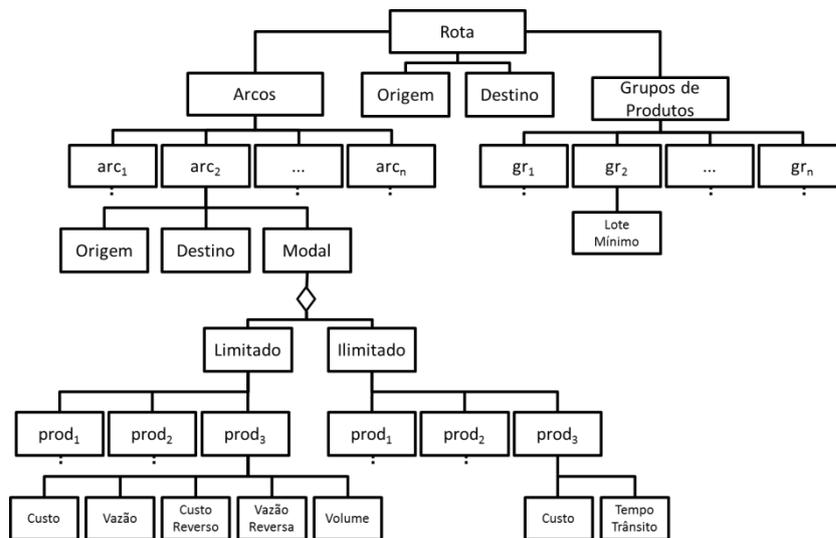


Figura 17 – Organização dos Dados Referentes aos Grupos de Produtos em uma Base

Cada rota r apresenta suporte para movimentação de um ou mais grupos de produtos gr e conseqüentemente de um ou mais tipos de produtos $prod$. Para evitar a movimentação de um volume muito baixo de cada produto por uma rota, define-se um tamanho de lote mínimo $lot_{r,gr}^{min}$ para transferência de qualquer fluxo f de qualquer produto $prod \in gr$ em cada rota r . Na malha dutoviária, particularmente, a definição de um volume mínimo se faz necessário para evitar que duas bateladas de produtos diferentes tenham seus volumes completamente misturados. No modelo, todos os produtos de um mesmo grupo gr devem respeitar um mesmo tamanho mínimo de lote $lot_{r,gr}^{min}$. Porém, não é definido explicitamente um valor de volume máximo, podendo este até mesmo corresponder a toda a capacidade de uma rota. A capacidade de movimentação de uma rota r é definida pela menor capacidade de movimentação entre os seus arcos $a_i \in r$.

No modelo, a capacidade $cap_{a,per}$ de um arco a é calculada de forma agregada, ou seja, por meio da soma das capacidades de todas as unidades de modais que conectam a base de origem e de destino do arco representado. A capacidade $cap_{a,per}$ de um arco a é definida

para cada período per de acordo com o tipo de modal de transporte. Os modais dutos apresentam capacidade insuficiente para suportar todo o volume geralmente transportado pela malha, exigindo o seu uso em conjunto com outros modais de transporte (i.e. navios, trens e caminhões) mais flexíveis.

Com exceção aos dutos, a capacidade dos demais modais não é limitada pelo modelo, uma vez que a frota destes meios de transporte já está dimensionada para atender as necessidades atuais. Ainda, há a possibilidade de alugar novas unidades de modais a fim de aumentar a capacidade de transporte. No modelo, considera-se que estes modais sempre apresentam capacidade suficiente para movimentar qualquer volume entre duas bases. Desta forma, no modelo, os modais são classificados de acordo com as suas capacidades de transporte, ou seja, em modais com capacidade limitada ou com capacidade ilimitada.

A capacidade $cap_{a,per}$ de um arco a é dada pela equação (22) de acordo com o tipo de cada modal. Nos arcos com capacidade limitada (i.e. dutos), as informações de volume χ_a e vazão $\psi_{a,per}$ são apresentadas em cada período per , podendo variar de um período para outro. O volume χ_a corresponde à capacidade física do duto em qualquer instante de tempo e a vazão $\psi_{a,per}$ corresponde à capacidade de transporte diária no período per . Todavia, a capacidade disponível pode ser reduzida ao considerar a capacidade ocupada pelo bombeamento dos fluxos $f \in F^t$ de estoque em trânsito. No modelo, considera-se que todos os produtos que compõem os grupos suportados pela rota apresentam a mesma vazão $\psi_{a,per}$ e esta vazão consiste na média entre as vazões particulares de cada produto. Ademais, como a vazão depende da direção do fluxo de um duto (por causa de imperfeições de relevo), as informações de vazão em fluxo normal e reverso são dadas de forma separada, quando houver reversão.

$$cap_{a,per} = \begin{cases} \psi_{a,per} * |per|, modal = duto \\ \infty, outros \end{cases} \quad (22)$$

A restrição de capacidade de um arco a é dada pela equação (23), onde $\vartheta_{a,per}$ corresponde à soma do volume de cada fluxo $f \in F, v(f)$, de qualquer produto $prod \in PROD$ transportado pelo arco a no período per por qualquer rota $r(f) \ni a$. Ademais, o volume $v(f)$ deve satisfazer o lote mínimo $lot_{r,gr}^{min}$ para o respectivo grupo gr (eq. 24).

$$\vartheta_{a,per} \leq cap_{a,per}, \text{ onde } \vartheta_{a,per} = \sum_{f \in F | r(f) \ni a, per(f)=per} v(f) \quad (23)$$

$$v(f) \geq lot_{r(f),gr}^{min}, \forall f \in F, \forall r \in R, gr \subseteq PROD \quad (24)$$

Nos dutos, o tempo de transporte $trans_{a,gr}^{time}$ de um dado volume ou batelada é calculado por meio das informações de volume χ_a e vazão $\psi_{a,per}$ de tal arco. Em rotas compostas por múltiplos dutos adjacentes e com vazões diferentes, as operações de pulmão devem ser consideradas, uma vez que tais operações impactam no tempo de movimentação. No modelo, o tempo de movimentação é considerado em números de dias.

As movimentações de produtos apresentam um custo k_a relacionado à utilização temporal dos dutos. Este custo k_a pode ser diferente em cada período per e refere-se ao transporte de uma unidade de volume (e.g. mil m³) de um dado produto $prod$ em um arco a . No modelo, considera-se que todos os produtos suportados pelo arco apresentam o mesmo custo k_a de movimentação. Porém, os custos se diferem em relação ao sentido do fluxo de movimentação em um duto, ou seja, em sentido normal ou reverso. Geralmente, o custo do sentido reverso é mais alto do que o de sentido normal.

Em relação aos modais com capacidade ilimitada, o tempo médio de transporte é informado em cada período, ou seja, não precisa ser calculado. Também, o custo é informado em cada período por unidade volumétrica e não há diferenciação de custos em relação ao sentido do fluxo de movimentação.

2.3.5 Abstração em Relação à Topologia da Malha de Transporte

A topologia da malha brasileira de petróleo no segmento *downstream* apresenta grande dimensão e interdependências que levam a um processo árduo de planejamento ao exigir uma grande quantidade de combinações entre possíveis operações de movimentação. Deste modo, a alternativa utilizada pelos especialistas de planejamento consiste na decomposição dos cenários de planejamento da malha brasileira em uma hierarquia topológica de dois níveis. Esta decomposição também envolve a região Exterior. Assim, a subseção 2.3.5.1 descreve esta hierarquia multinível e a subseção 2.3.5.2 descreve sobre as particularidades da região Exterior.

2.3.5.1 Hierarquia multinível

Atualmente, os especialistas de planejamento decompõem a topologia da malha brasileira de petróleo em um conjunto Θ de regiões β (eq. (25)). Uma região β é um subconjunto do conjunto finito B , onde uma base b pode estar contida em apenas uma região β . Cada região β é tratada em separado considerando como entrada as relações com outras regiões.

$$\Theta = \{\beta_1, \dots, \beta_n\}, \beta_i = \{b_1, \dots, b_n\}, \beta \subseteq B, \bigcap_{i=1}^{|\Theta|} \beta_i = \emptyset, \forall i \in \mathbb{N} \quad (25)$$

Para manter compatibilidade com a abordagem de solução utilizada pelos especialistas, sendo estes os potenciais usuários da solução computacional apresentada neste trabalho, o modelo do problema contempla a mesma forma de abstração. A abstração consiste na representação topológica da malha brasileira, no escopo de um cenário de planejamento, em uma hierarquia de dois níveis: o nível inter-região e o nível intrarregião. A Figura 18 ilustra a estrutura e organização dos dados do nível inter-região, do qual o nível intrarregião é parte. Uma descrição mais detalhada da relação entre estes níveis é apresentada na sequência.

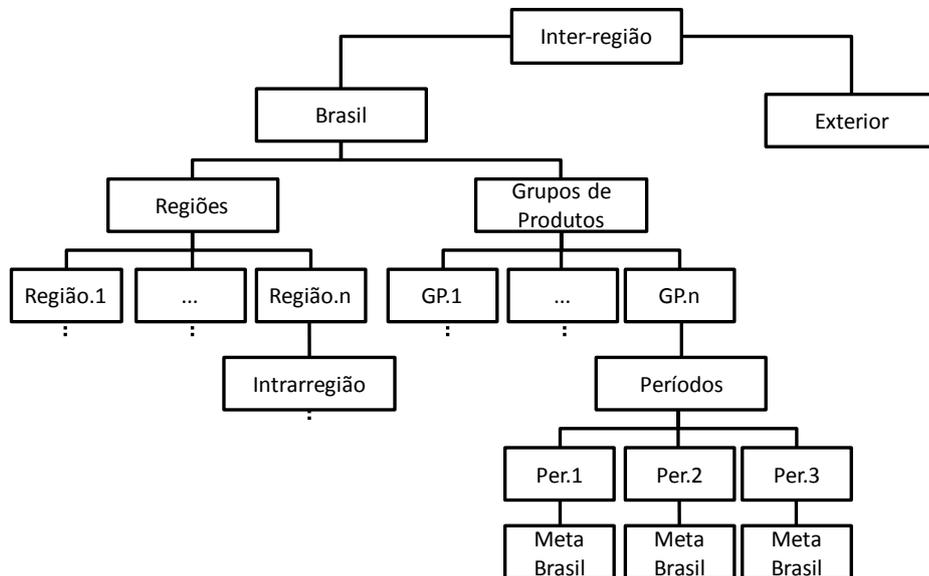


Figura 18 – Organização dos Dados e Relação entre os Níveis Inter-região e Intrarregião

No nível inter-região, um cenário consiste essencialmente nas relações de movimentação de produtos internamente à malha brasileira e operações com o exterior. A malha brasileira é decomposta em uma ou mais regiões β , sendo que cada região β é constituída por um conjunto de bases reais altamente dependentes. Neste nível de abstração, uma região β pode ser considerada como uma base agregada, uma vez que ela compartilha a

mesma estrutura e tipo de informações das bases propriamente ditas, inclusive as informações de estoque por tipo de produto e capacidade de armazenamento por grupo de produto. Portanto, estas informações referem-se a valores agregados de cada base $b \in \beta$ que compõem tal região β .

Assim, no nível inter-região, as regiões $\beta \subset \Theta$ movimentam produtos entre si a fim de manter um nível satisfatório de estoque agregado para cada produto. Essencialmente, cada região β tenta escoar o volume produzido em excesso e tenta adquirir o volume faltante para atender a demanda agregada, mesmo que para isso tenha que realizar movimentações com o exterior, quando há rota e infraestrutura para tal. Cada região β busca satisfazer um nível adequado de estoque agregado para posteriormente distribuir as ordens de escoamento e recebimento de produtos entre as bases propriamente ditas $b \in \beta$. Esta fase de distribuição do estoque agregado de uma região β entre as bases $b \in \beta$ ocorre no nível intrarregião.

De forma semelhante, o exterior também é considerado como uma região e consequentemente pode ser tratado como uma base agregada ξ . Portanto, no nível inter-região, o conjunto de regiões β e a região exterior ξ formam o conjunto de bases B conforme a equação (26). Os países origem e destino das operações de importação e exportação são ignorados, sendo estes abstraídos a uma única região ξ chamada exterior. As movimentações das regiões com o exterior são cruciais para que uma solução de qualidade seja encontrada, uma vez que as operações de importação e exportação permitem manter cada região $\beta \in \Theta$ em um nível de estoque adequado, contribuindo para evitar o excesso ou escassez de produtos em território brasileiro.

$$\bigcup_{i=1}^{|\Theta|} \beta_i \cup \{\xi\} = B \quad (26)$$

No modelo, a região exterior ξ sempre apresenta oferta ou demanda de produtos suficientes para que a meta brasileira de estoque $\omega_{gr,per}$ seja alcançada. A meta agregada $\omega_{gr,per}$ é dada para cada grupo de produtos gr em cada período per . Esta meta é acompanhada por uma faixa de tolerância $\mu_{gr,per}$ também dada para cada grupo de produto gr e período per . Assim, o objetivo é manter o estoque e_{β,gr,d_{per}^f} no último dia d_{per}^f de cada período per dentro da faixa de factibilidade de estoque dada pela equação (27).

$$\omega_{gr,per} - \mu_{gr,per} \leq \sum_{\beta} e_{\beta,gr,d_{per}^f} \leq \omega_{gr,per} + \mu_{gr,per} \quad (27)$$

Como exemplo, se o estoque agregado do Brasil para um dado grupo de produto gr e período per estiver abaixo da meta $\omega_{gr,per}$, a região exterior ξ teria um balanço $bal_{\xi,prod,per}$ positivo estritamente suficiente de cada produto $prod$ no grupo gr para ajudar o Brasil a alcançar a sua meta de estoque $\omega_{gr,per}$. Caso contrário, se o estoque do Brasil estiver acima de sua meta $\omega_{gr,per}$, a região exterior ξ teria um balanço $bal_{\xi,prod,per}$ negativo estritamente suficiente a ser satisfeito pelo excesso de estoque no Brasil.

No nível inter-região, as regiões β movimentam produtos entre si, inclusive com o exterior ξ , por meio de rotas especiais denominadas de rotas inter-regiões $R^i \subseteq R$. Estas rotas conectam apenas regiões β , não fazendo menção às bases propriamente ditas, ou seja, $b \in \beta$. Todavia, no nível intrarregião, as bases reais de origem $b_i \in \beta_i$ e destino $b_j \in \beta_j$ da rota $r \in R^i$ selecionada no nível anterior são reveladas. Com isso, consegue-se definir exatamente a base origem b_i e destino b_j dentro de cada região β envolvida na movimentação.

Nesta representação, o nível inter-região corresponde exatamente a um típico cenário de planejamento, não havendo diferenciações para a forma de planejamento que ocorre dentro de cada região β . Deste modo, cada nível pode ser tratado como um problema menor de planejamento e os mesmos métodos de solução podem ser aplicados sem necessidade de adaptações. Por isso, ambos os níveis são executados sequencialmente com o mesmo modelo de otimização. Neste processo, primeiramente o nível inter-região é executado para gerar o conjunto F de fluxos inter-regiões e posteriormente, o planejamento pode ocorrer sequencialmente ou simultaneamente em cada região β (i.e. nível intrarregião), considerando as movimentações planejadas no nível inter-região.

A Figura 19 ilustra este processo de planejamento multinível. O quadro à esquerda representa o nível inter-região através da decomposição da malha brasileira em algumas regiões β , onde cada região é representada em forma de vértice de um grafo, inclusive o exterior ξ , e as rotas $R^i \subseteq R$ são representadas por meio de arcos direcionados que indicam as direções das movimentações suportadas. A quantidade de regiões β resultantes da decomposição da malha depende do cenário de planejamento. Como exemplo, a rede de GLP é decomposta em 16 regiões, separadas de acordo com a área de abrangência das principais bases produtoras e grandes terminais que suportam os produtos. Por sua vez, o quadro à

direita ilustra a estrutura interna de duas regiões β (i.e. β_5 e β_6) e a relação entre suas bases internas por meio das movimentações definidas no nível inter-região.

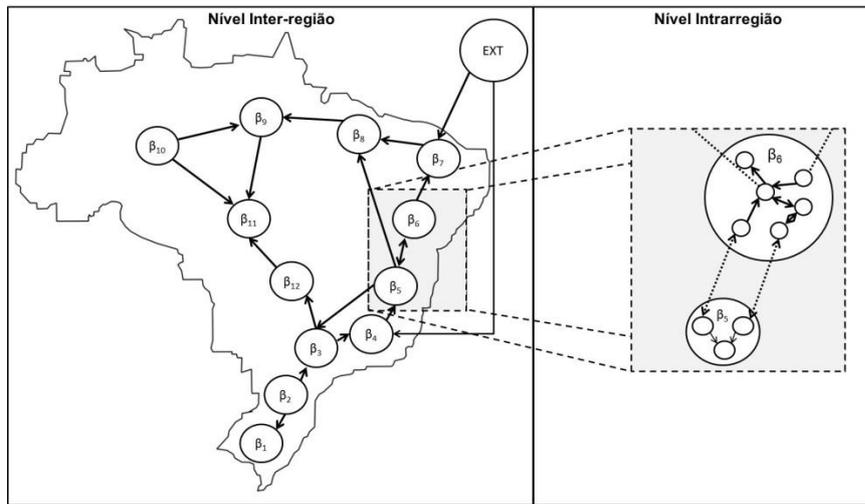


Figura 19 – Desmembramento Topológico em Nível Inter-região e Intrarregião

No entanto, apesar desta forma de abstração reduzir a complexidade da malha e também permitir que o planejamento em cada nível intrarregião possa ser realizado em paralelo, o fato das informações serem apresentadas de forma agregada e das bases reais serem omitidas no nível inter-região pode impactar negativamente na qualidade da solução. Mais precisamente, em uma movimentação inter-região, a seleção de uma rota de movimentação $r \in R$ não leva em consideração o nível de estoque e capacidades de armazenamento (i.e. $PL_{b,gr,per}^{max}$, $PL_{b,gr,per}^{min}$, $OL_{b,gr,per}^{max}$, $OL_{b,gr,per}^{min}$) das bases reais de origem $b_i \in \beta$ e destino $b_j \in \beta$, sendo a decisão tomada unicamente em relação aos valores agregados.

Em um caso pessimista, no tratamento de um fluxo inter-região $f \in F$ dentro de um cenário intrarregião, pode ocorrer da base real de origem $b_i \in \beta_i$ do fluxo f não apresentar estoque suficiente para movimentar o volume planejado ou então da base real de destino $b_j \in \beta_j$ não apresentar capacidade suficiente para armazenar o volume especificado. Nestes casos, se houver rotas entre as bases das respectivas regiões β_i e β_j , algumas movimentações internas poderão ser realizadas para suprir a falta de estoque ou a falta de capacidade de armazenamento em um dado intervalo de dias.

Esta situação ilustra a consequência de uma má seleção de rotas em nível inter-região. Este problema ocorre por não haver conhecimento suficiente no momento da seleção das rotas sobre as bases reais que as compõem. Por conta disso, este problema pode contribuir para elevar os custos totais de movimentação na malha ou então para a não satisfação de um

nível adequado de estoque ou violação da capacidade de armazenamento das bases, quando o problema não pode ser corrigido por meio de movimentações locais.

2.3.5.2 Definição dos Dados Referentes à Região Exterior

O modelo do problema não fornece informações sobre o volume de estoque e capacidade de armazenamento para a região exterior ξ . Há apenas informações sobre quais regiões brasileiras apresentam suporte às operações de importação e exportação. Por conta disto, se faz necessário definir tais informações faltantes para viabilizar a concepção de uma solução satisfatória.

Desta forma, o modelo do problema foi complementado por meio da criação da região exterior. Uma característica desta região criada consiste na disponibilidade de volume estritamente suficiente de um ou mais produtos para atender a demanda do Brasil ou então, de demanda e capacidade estritamente suficiente para armazenar o volume excedente de produtos do Brasil. Estas características são de extrema importância para manter o equilíbrio de estoque nacional.

A meta de estoque do Brasil em cada período per , $\omega_{gr,per}$, é a única informação disponibilizada na definição do problema que pode ser usada para determinar o estoque da região exterior. No modelo do problema, considera-se que a meta $\omega_{gr,per}$ deve ser alcançada no final de cada período per para cada grupo de produto gr . Para isso, se faz necessário conhecer o estoque em território brasileiro de cada grupo $gr \subseteq PROD$ no final de cada período $per \in H$ para decidir sobre a necessidade de exportação ou importação de produtos.

O estoque do Brasil $e_{\theta,gr,per}$ para cada grupo gr em cada período per é obtido por meio da soma do estoque $e_{\theta,prod,per}$ de cada produto $prod \in gr$ em todas as regiões brasileiras θ no último dia d_{per}^f de cada período per , conforme apresentado na equação (29). O estoque $e_{\theta,prod,per}$ de cada produto $prod$ corresponde basicamente à soma dos estoques iniciais $e_{\beta,prod,per}^{initial}$ e balanços $bal_{\beta,prod,per}$ em períodos anteriores e corrente, considerando os volumes importados $v_{prod,per}^{imp}$ ou exportados $v_{prod,per}^{exp}$ deste produto nos períodos anteriores, conforme apresentado na equação (28). Vale salientar que para o primeiro período $per=1$, as informações sobre as transferências anteriores com o exterior são derivadas do conjunto de fluxos em trânsito $F^t \subseteq F$.

$$e_{\theta,prod,per_i} = \sum_{j=1}^i \sum_{\beta}^{|\theta|} e_{\beta,prod,per_j}^{initial} + bal_{\beta,prod,per_j} + v_{prod,per_{j-1}}^{imp} - v_{prod,per_{j-1}}^{exp} \quad (28)$$

$$e_{\theta,gr,per_i} = \sum_{prod}^{|gr|} e_{\theta,prod,per_i} \quad (29)$$

Para definir o volume a ser importado ou exportado de um grupo de produtos gr em um período per se faz necessário comparar o estoque disponível em território nacional do grupo de produtos, e_{θ,gr,per_i} , com a respectiva meta nacional $\omega_{gr,per}$ para o grupo gr no período per . Nesta comparação, o estoque nacional e_{θ,gr,per_i} pode se apresentar superior ou inferior à meta Brasil $\omega_{gr,per}$, sendo que esta diferença entre os valores define exatamente o volume a ser exportado ou importado de um grupo de produtos, respectivamente. Este volume é representado por $v_{\theta,gr,per}^{meta}$ e o seu cálculo é apresentado na equação (30).

$$v_{\theta,gr,per}^{meta} = \omega_{gr,per} - e_{\theta,gr,per_i} \quad (30)$$

Na sequência, se faz necessário definir as parcelas de cada produto $prod$ do respectivo grupo gr a ser movimentado com o exterior. A definição destas parcelas ocorre por meio da distribuição proporcional do volume $v_{\theta,gr,per}^{meta}$ entre cada produto $prod \in gr$ de acordo com os níveis de estoque de cada produto no final de cada período per . Esta distribuição proporcional ocorre diferentemente em operações de exportação e importação. Assim, quando o Brasil apresenta estoque excedente de um grupo de produtos em relação a sua meta (i.e. $v_{\theta,gr,per}^{meta} > 0$), os produtos que apresentam maiores níveis de estoque devem compor as parcelas maiores do volume a ser exportado. Porém, quando o Brasil apresenta estoque insuficiente de um grupo para alcançar a sua meta (i.e. $v_{\theta,gr,per}^{meta} < 0$), os produtos com maiores demandas devem formar as parcelas maiores do volume a ser importado.

No entanto, mesmo que o estoque nacional e_{θ,gr,per_i} exceda a meta de um grupo gr , pode ocorrer de um ou mais produtos que compõem este grupo apresentar déficit de estoque (i.e. $e_{\theta,prod,per_i} < 0$). Neste caso, o volume estritamente necessário de cada produto em déficit deve ser importado do exterior. Certamente, este volume de importação impactará no volume a ser exportado, contribuindo para o aumento desta quantia. Mesmo assim, o volume

de exportação deve ser composto apenas pelos produtos que apresentam estoque suficiente para tal, ou seja, que apresentam estoque positivo no final do período (i.e. $e_{\theta,prod,per_i} \geq 0$)

Em caso de exportação, a definição do volume de cada produto a ser exportado ocorre conforme as equações (31) e (32). A equação (31) define o valor da constante $Z_{gr,per}^{exp}$ pela divisão do volume de exportação do grupo $v_{\theta,gr,per}^{meta}$ pela soma dos estoques dos produtos que apresentam estoque positivo no final do período. Na equação (32), o valor de $Z_{gr,per}^{exp}$ é usado para definir o volume de exportação de cada produto, mas apenas daqueles com estoque positivo no final do período.

$$Z_{gr,per}^{exp} = \begin{cases} v_{\theta,gr,per}^{meta} / \sum_{prod}^{|gr|} e_{\theta,prod,per_i}, & v_{\theta,gr,per}^{meta} > 0 \\ 0, & v_{\theta,gr,per}^{meta} \leq 0 \end{cases} \quad (31)$$

$$v_{prod,per}^{exp} = \begin{cases} Z_{gr,per}^{exp} * e_{\theta,prod,per_i}, & e_{\theta,prod,per_i} \geq 0 \\ 0, & e_{\theta,prod,per_i} < 0 \end{cases} \quad (32)$$

Em caso de importação, para definir o volume de cada produto *prod* a ser importado em um dado período *per*, primeiramente precisa-se verificar se há produto com déficit de estoque no final do período (equação (33)). Se houver, o volume em déficit $v_{prod,per}^{deficit}$ de cada produto *prod* e conseqüentemente do próprio grupo *gr* deve ser obtido. A equação (34) representa a soma dos valores em déficit $v_{gr,per}^{deficit}$ para um dado grupo *gr*. Na sequência, este volume deficitário deve ser decrementado do volume total a ser importado, $v_{\theta,gr,per}^{meta}$, como mostra a equação (35). Com isso, somente o volume remanescente em $v_{\theta,gr,per}^{meta}$ será distribuído entre os produtos do grupo.

$$v_{prod,per}^{deficit} = e_{\theta,prod,per_i}, \quad e_{\theta,prod,per_i} < 0 \quad (33)$$

$$v_{gr,per}^{deficit} = \sum_{prod}^{|gr|} v_{prod,per}^{deficit} \quad (34)$$

$$v_{\theta,gr,per}^{meta} = v_{\theta,gr,per}^{meta} - v_{gr,per}^{deficit}, \quad v_{\theta,gr,per}^{meta} < 0 \quad (35)$$

A distribuição do volume $v_{\theta,gr,per}^{meta}$ entre os produtos ocorre proporcionalmente aos valores de estoque $e_{\theta,prod,per_i}$ dos produtos no final do período. Por questão de cálculo,

quando os valores de estoque $e_{\theta,prod,per_i}$ dos produtos do grupo gr variam entre positivos e negativos, se faz necessário elevar suas escalas para que todos se situem no mesmo espaço dos números positivos. Este processo é apresentado na equação (36). Assim, os estoques $e_{\theta,prod,per}^+$ de cada produto $prod$ mantém a mesma diferença original em termos de estoque com os demais produtos, mas agora no espaço dos valores positivos. Como exceção, o cálculo não eleva o estoque de produtos com balanço zero, uma vez que tal valor expressa que não há demanda para o produto.

$$\begin{aligned} e_{\theta,prod,per}^+ &= e_{\theta,prod,per} + (|e_{\theta,prod,per}^-| * 2), e_{\theta,prod,per} \neq 0, \text{ onde} \\ e_{\theta,prod,per}^- &= \begin{cases} \min(e_{\theta,prod,per}), \forall prod \in gr, \exists e_{\theta,prod,df} < 0 \\ 0, \text{ senão} \end{cases} \end{aligned} \quad (36)$$

Para calcular o volume de importação de cada produto, ainda se faz necessário considerar a forma pela qual as demandas se encontram distribuídas entre as regiões brasileiras. Se um produto é demandado por um número maior de regiões, este produto precisa ter a sua proporção de importação aumentada em relação aos demais produtos a fim de compensar os volumes retidos nas regiões durante o processo de distribuição. Certos volumes podem ficar retidos em algumas regiões caso não satisfaçam a restrição de lote mínimo das rotas de escoamento.

Neste sentido, como valor de estoque $e_{\theta,prod,per}^+$ de cada produto $prod$ em um dado período per é usado para dividir proporcionalmente o volume de importação $v_{\theta,gr,per}^{meta}$, a prática utilizada consiste na penalização deste estoque pela proporção de regiões com déficit do produto no respectivo período. O cálculo da penalização é apresentado na equação (37), onde q representa a proporção de regiões com déficit do produto $prod$ no período per , sendo tal proporção calculada a partir de $B_{prod,per}^{def} \subseteq B$, o conjunto de regiões com déficit do produto no respectivo período. Conforme a equação, quanto menor o número de regiões com déficit de um produto, menor é a penalização do estoque $e_{\theta,prod,per}^+$ deste produto.

$$\begin{aligned} e_{\theta,prod,per}^q &= \begin{cases} 1 * e_{\theta,prod,per}^+, & q = 1 \\ (1 - q) * e_{\theta,prod,per}^+, & q \neq 1 \end{cases} \quad \text{onde} \\ q &= \frac{|B_{prod,per}^{def}|}{|B|}, B_{prod,per}^{def} \subseteq B \end{aligned} \quad (37)$$

Por fim, após calcular os valores de referência $e_{\theta,prod,per}^0$ de cada produto, os volumes de importação $v_{prod,per}^{imp}$ de cada produto $prod$ são obtidos por meio das equações (38) e (39). A equação (38) define o valor da constante $Z_{gr,per}^{imp}$, o qual permitirá distribuir o volume de importação restante $v_{\theta,gr,per}^{meta}$ de forma inversamente proporcional aos níveis de estoque dos produtos do grupo gr . Por sua vez, a equação (39) faz uso da constante $Z_{gr,per}^{imp}$ para definir o volume $v_{prod,per}^{imp}$ a ser importado de cada produto $prod$, considerando também o volume em déficit já reservado anteriormente.

$$\sum_{prod}^{|gr|} \frac{Z_{gr,per}^{imp}}{e_{\theta,prod,per}^0} = v_{\theta,gr,per}^{meta}, v_{\theta,gr,per}^{meta} > 0 \quad (38)$$

$$v_{prod,per}^{imp} = \frac{Z_{gr,per}^{imp}}{e_{\theta,prod,per}^0} + v_{prod,per}^{deficit} \quad (39)$$

No modelo, o volume de cada produto a ser importado ou exportado é usado para compor as informações de estoque da região Exterior. Assim, o Exterior passará a apresentar oferta ou demanda de cada produto de forma estritamente suficiente para satisfazer as metas do Brasil. Para aumentar a viabilidade das operações de importação e exportação, considera-se que os volumes referentes à oferta (positivos) e demanda (negativo) estarão disponíveis integralmente desde o início de cada período correspondente, não havendo a distribuição linear destes volumes pelos dias dos períodos. Assim, a curva de estoque inicial do exterior em um período apresenta uma forma constante, fazendo com que o exterior possa escoar ou receber o volume correspondente em qualquer dia do período.

Em relação à capacidade de armazenamento do exterior, este apresentará capacidade física suficiente para receber o volume demandado em qualquer dia do período correspondente. Ademais, para incentivar o escoamento de todo o volume disponível, considera-se que o exterior apresentará limite máximo operacional sempre zero para cada grupo. Com isso, o exterior sempre apresentará uma grande urgência para escoamento de seus produtos, devendo ser auxiliado pelas regiões brasileiras para manter o seu estoque dentro da faixa operacional, ou seja, em zero. O limite físico mínimo de cada grupo também é zero. Assim, quando o estoque do exterior for negativo, este estará em grande urgência para recebimento de produtos. Esta configuração incentivará as operações de exportação em território brasileiro a fim de escoar o excedente para o exterior.

2.3.6 Propriedades da Solução e Objetivos

O modelo do problema apresentado nesta tese foi concebido para gerar uma solução de planejamento mais refinada. Este refinamento é obtido pela discretização do tempo em dias, o que aproxima a solução de planejamento ao nível operacional. Desta forma, a solução de planejamento deve consistir em um conjunto de fluxos de movimentação F entre as bases do conjunto B . Estes fluxos devem ser formados com o objetivo de reduzir os custos de transporte e principalmente o de manter um nível seguro de estoque de cada produto em cada base.

A Figura 20 ilustra a forma pela qual o resultado da solução do problema deve ser estruturado, ou seja, pelo conjunto de fluxos F . Como se pode perceber, este tipo de fluxo compartilha da mesma estrutura dos fluxos em trânsito e comprometidos descritos anteriormente e apresentados na Figura 12.

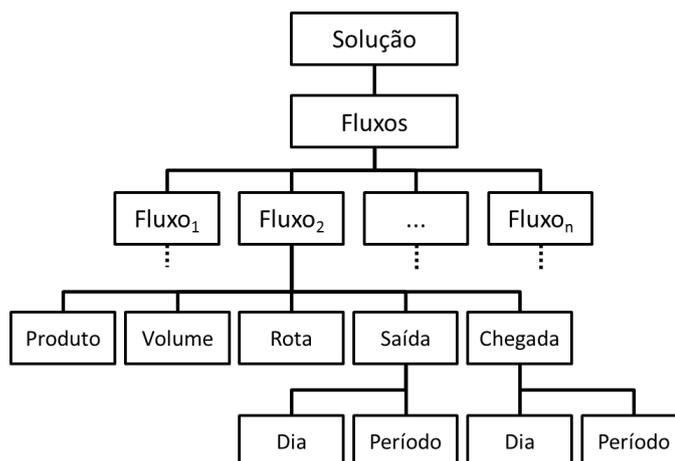


Figura 20 – Estrutura de Apresentação da Solução

Na definição de um fluxo de movimentação, as escolhas dos dias de saída e chegada dos produtos devem considerar os níveis de estoque e capacidades de armazenamento nas bases, bem como as capacidades de movimentação pelas rotas. Em relação às rotas, e conseqüentemente aos modais, o modelo não exige que o controle diário de suas capacidades seja realizado, uma vez que esta é a atividade a ser realizada no planejamento de nível operacional. Porém, este tipo de controle seria desejável para aproximar mais a solução de planejamento ao problema em nível operacional, mesmo estes atuando em granularidades diferentes de tempo.

Neste sentido, a complexidade de planejamento pode ser ditada pela granularidade do tempo considerada na alocação dos recursos do problema, ou seja, na alocação da capacidade de armazenamento e de transporte. Quanto maior for o refinamento do tempo mais

complexo será o problema. Deste modo, a Tabela 1 representa as possibilidades de planejamento em relação à alocação temporal dos recursos de armazenamento e transporte. O tempo é considerado de forma discretizada variando-se a granularidade, ou seja, em termos de dias ou períodos.

Tabela 1 – Detalhamento do Tempo em Relação à Alocação de Recursos

	Caso 1	Caso 2	Caso 3	Caso 4
 Armazenamento	Período	Dia	Período	Dia
 Transporte	Período	Período	Dia	Dia

Entre as possibilidades, o caso 1 consiste no típico problema de planejamento, onde praticamente não se faz menção ao tempo, sendo o tempo tratado em granularidade grossa. Este caso foi abordado como trabalho inicial pelo autor desta tese e os resultados estão apresentados em (BANASZEWSKI; PEREIRA; et al., 2010; BANASZEWSKI; TACLA; et al., 2010). O caso 2 consiste exatamente no problema escopo da tese, se referindo a um problema de planejamento com escalonamento relaxado, uma vez que não há preocupação com a alocação ou sequenciamento diário de produtos nos meios de transporte, mas apenas com os dias de saída e chegada dos fluxos nas bases. Os casos 3 e 4 não são abordados pelo corrente trabalho, no entanto, o caso 4 é uma combinação desejável a fim de gerar uma solução de planejamento mais aderente ao planejamento de nível operacional.

2.4 REQUISITOS DA SOLUÇÃO COMPUTACIONAL

A intenção do corrente trabalho é conceber uma solução computacional de planejamento de acordo com o modelo do problema apresentado. Esta solução será integrada a um sistema computacional maior, o qual é responsável pelas atividades gerais de gerenciamento da cadeia de suprimentos da Petrobras. A integração da solução proposta com tal sistema gerencial se dará por meio da transferência de dados via arquivos XML (*Extensible Markup Language* ou Linguagem de Marcação Extensível em português), não havendo a necessidade de acesso direto aos dados no banco de dados empresarial.

Os dados de entrada para execução do planejamento são apresentados em um arquivo comumente referenciado como XML de entrada. A solução computacional deve processar tais dados e persistir as informações referentes aos fluxos de movimentação em outro arquivo denominado de XML de saída. A Figura 21 ilustra a utilização dos arquivos para a execução do planejamento multinível.

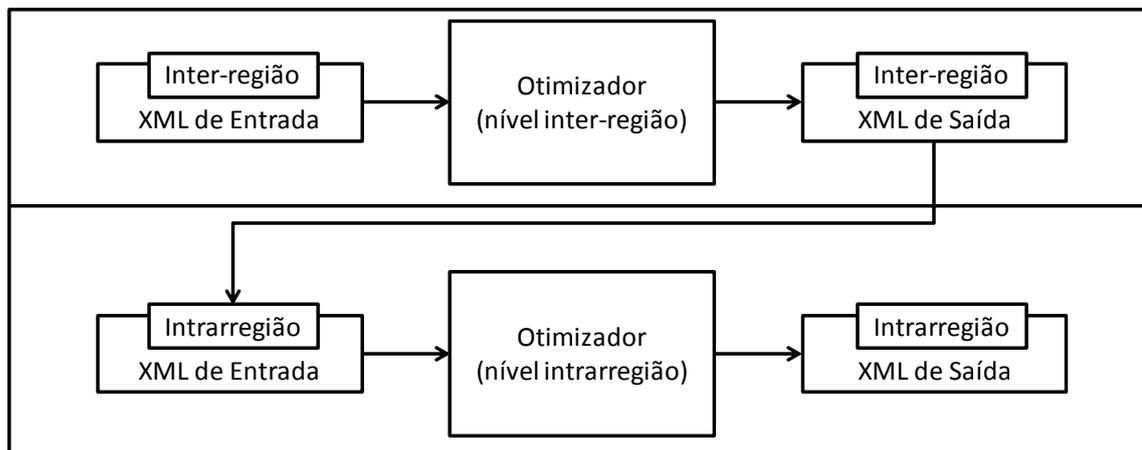


Figura 21 – XMLs de Entrada e Saída no Planejamento Multinível

Na parte superior da figura, uma instância da solução computacional de otimização recebe o XML de entrada, realiza o processamento e persiste as informações dos fluxos de movimentação no respectivo XML de saída. Estes fluxos inter-regiões serão considerados no planejamento interno de cada região envolvida. Assim, na parte inferior da figura, o XML de entrada de uma região particular é incrementado com os resultados pertinentes do XML de saída do nível superior. Na sequência, o mesmo processo de execução se repete, gerando um XML de saída particular para a região. Caso a malha brasileira não seja desmembrada em regiões, toda ela poderia ser representada em um único XML de entrada, não havendo a necessidade deste processo multinível.

Devido a esta integração via XML, a solução computacional proposta manterá certa independência do sistema de gerenciamento geral, sendo executada em um ambiente computacional em separado de outros sistemas. Este ambiente pode consistir de um ou mais servidores locais ou remotos a fim de atender as solicitações de planejamento de um ou mais usuários para o mesmo ou diferentes cenários de planejamento. Estas solicitações podem ocorrer de forma sequencial ou mesmo simultânea, podendo demandar a execução concorrente de várias instâncias do sistema.

Para cada usuário, os resultados de planejamento e os respectivos arquivos de entrada são persistidos em diretórios particulares, podendo o mesmo ter acesso a tais arquivos a qualquer momento. O usuário pode visualizar e analisar os resultados de planejamento por

meio de uma ferramenta gráfica que representa diferentes perspectivas em forma de gráficos e tabelas⁹.

Como há a possibilidade de uso do sistema de planejamento de forma interativa pelo especialista (i.e. definições de transportes comprometidos após a análise dos resultados), um requisito crítico do sistema de planejamento está relacionado ao tempo de processamento. Para incentivar o uso do sistema computacional pelos especialistas, o sistema deve retornar uma solução de planejamento em um curto intervalo de tempo. O tempo máximo de execução pode variar de um cenário para outro, devendo geralmente consistir em alguns poucos minutos.

2.5 SOLUÇÕES DA LITERATURA

Atualmente, o problema de planejamento de transferências de derivados de petróleo brasileiro é resolvido de forma manual pelos especialistas (pelo desmembramento hierárquico da malha). Mais precisamente, o planejamento é realizado de forma centralizada de acordo com as informações e previsões disponíveis na base de dados de um sistema de gerenciamento da empresa e também demanda algumas conversações entre os especialistas e os respectivos profissionais responsáveis pelo gerenciamento das operações nas bases envolvidas. Nestas conversações, cada responsável pode propor certas operações para melhor escoar a produção prevista ou atender a previsão de demanda da base que representa. Estas informações são reunidas, organizadas e potenciais conflitos são resolvidos pelos especialistas (LOPES, T. M. T., 2010).

Como se pode perceber, este processo é bastante oneroso e certamente não considera todas as possibilidades combinatórias a fim de encontrar o melhor plano, uma vez que tais decisões são baseadas estritamente na experiência dos especialistas. No escopo de cada cenário inter-região ou intrarregião, geralmente os especialistas separam o processo de planejamento em duas etapas: a) a definição do volume de cada produto a ser movimentado entre as bases produtoras e consumidoras e b) a escolha das rotas que executarão tais movimentações. Posteriormente, estas decisões são consideradas como entrada para o planejamento operacional ou escalonamento (CAMPONOGARA, 1995).

⁹ Esta ferramenta foi desenvolvida pela equipe da UTFPR com modelagem, orientação e testes realizados pelo autor desta tese.

Na literatura, há vários trabalhos que propõem a automatização do processo de planejamento e escalonamento no contexto da malha de transporte de petróleo (BOSCHETTO, SUELLEN NEVES, 2011), (MOURA, A. V. et al., 2008). Muitos destes trabalhos apresentam soluções que atendem os dois níveis de planejamento, separadamente, principalmente por causa da dependência hierárquica entre ambos (LOPES, T. M. T., 2010). Porém, uma grande parte dos trabalhos aborda o planejamento operacional com exclusividade, uma vez que este apresenta maior grau de detalhamento (RELVAS; BARBOSA-PÓVOA; MATOS, 2009). Também, justamente por causa desta complexidade, se torna praticamente impossível realizar um plano operacional de qualidade por meio de processos manuais.

Ademais, estes trabalhos geralmente apresentam uma abrangência topológica limitada devido à complexidade do problema. Normalmente, os trabalhos relacionados abordam apenas uma única sub-região brasileira ou mesmo parte desta formada por um ou poucos dutos. Por conta disto, esta seção prioriza a descrição das topologias mais complexas, constituídas por várias bases produtoras e consumidoras.

Na literatura, os problemas de planejamento e escalonamento são comumente resolvíveis por meio de abordagens exatas ou então por meio de abordagens aproximadas, havendo trabalhos que propõem a junção das duas abordagens em situações de ineficiência dos métodos exatos. As abordagens exatas mais utilizadas para a resolução deste tipo de problema são os baseados em programação matemática, programação dinâmica e programação lógica por restrições (CLP). Por sua vez, as abordagens aproximativas mais utilizadas referem-se aos métodos heurísticos ou meta-heurísticos, com destaque às estratégias gulosas e algoritmos evolutivos (e.g. algoritmos genéticos, otimização por enxame de partículas), respectivamente.

A programação matemática é o método mais utilizado para a resolução de problemas de planejamento. Simplesmente, a programação matemática consiste na representação da realidade em um modelo matemático composto por um conjunto de variáveis, restrições e uma função objetivo representada por uma fórmula matemática (PAPADIMITRIOU; STEIGLITZ, 1998). Os modelos matemáticos são classificados em lineares ou não-lineares em relação às variações do grau das funções do modelo (i.e. função objetivo e restrições) ou em contínuo (i.e. o modelo apresenta apenas variáveis contínuas), inteiro (i.e. o modelo apresenta apenas variáveis inteiras) ou inteiro misto (i.e. o modelo apresenta variáveis contínuas e discretas) em relação ao tipo de dados suportados pelas variáveis. Para cada

variação, há algoritmos específicos a serem empregados na otimização dos problemas. Por exemplo, o algoritmo Simplex (GASS, 1985) é comumente aplicado na resolução de problemas lineares contínuos e o *Branch and Bound* e suas variações (i.e. *Branch and Cut*, *Branch and Price*) são comumente utilizados em problemas lineares discretos ou inteiros mistos (WOLSEY, 1998).

As heurísticas e metaheurísticas se apresentam como soluções alternativas a problemas em que não se conhecem soluções eficientes por meio de métodos exatos, sendo totalmente aceitável uma solução de menor qualidade, mas viável computacionalmente. As heurísticas comumente utilizadas referem-se às heurísticas de construção, as quais fazem uso de estratégias gulosas para a construção da solução. Basicamente, esta estratégia consiste na adição incremental dos melhores componentes no estado em que se toma a decisão a fim de formar uma solução completa para um problema. Esta estratégia apresenta a inconveniência de geralmente estagnar a solução em um ótimo local, uma vez que as escolhas dos componentes são completamente baseadas em uma visão local limitada e usualmente não há oportunidade para retrocesso. Para sanar esta deficiência, foram propostas as meta-heurísticas, as quais partem de uma solução inicial qualquer e realizam procedimentos sofisticados baseados em buscas locais para melhorar a solução, transferindo-a de um ótimo local para uma posição mais próxima ou exatamente ao ótimo global.

No entanto, estas abordagens apresentam o inconveniente de possuírem natureza centralizada, isto dificulta uma participação mais efetiva no processo global de planejamento pelos responsáveis pelas operações em cada base no PPTDP. Como as bases são naturalmente distribuídas e mudanças ou imprevistos ocorrem com certa frequência, uma solução centralizada impede que tais correções sejam imediatamente e autonomamente consideradas.

Ademais, com a flexibilização do setor petrolífero (i.e. que permite o acesso à malha multimodal brasileira a terceiros), caso futuramente a concorrência neste setor seja mais significativa do que nos dias atuais, o processo de planejamento passaria a ser ainda mais complexo ao demandar planos que sejam compatíveis entre as empresas. Desta forma, um processo centralizado seria futuramente inviável, demandando novas abordagens de solução, pois haveria a necessidade de respeitar o sigilo das informações logísticas dos interessados na utilização da malha, sendo que estas informações nem sempre estariam disponíveis de forma centralizada para a tomada de decisão (MARCELLINO, 2006). Neste sentido, soluções de planejamento descentralizadas são desejáveis para atender esta eminente necessidade.

Neste contexto, esta seção apresenta alguns trabalhos aplicados ao mesmo domínio do problema foco da tese. Estes trabalhos estão organizados em duas subseções de acordo com suas estruturas de execução. A seção 2.5.1 apresenta soluções principalmente centralizadas e a seção 2.5.2 apresenta soluções tipicamente descentralizadas.

2.5.1 Soluções Centralizadas

As soluções centralizadas baseadas em métodos exatos e aproximativos são bastante utilizadas na resolução de problemas de planejamento no domínio petrolífero. Um dos primeiros trabalhos a abordar este tipo de problema foi realizado por Sear (1993), no qual o autor desenvolveu um modelo em Programação Linear Inteira (PLI) para o planejamento logístico no segmento *downstream*, envolvendo as atividades de processamento de produtos em refinarias, transporte e armazenamento. Certamente, muitos outros trabalhos foram desenvolvidos posteriormente para aplicação neste domínio. Porém, esta subseção não busca descrever todos estes trabalhos, mas apenas evidenciar alguns mais importantes para demonstrar os métodos de solução mais utilizados.

Esta seção organiza os trabalhos de acordo com o tipo de cenário de aplicação das soluções propostas. Assim, a subseção 2.5.1.1 apresenta alguns trabalhos aplicados à rede de claros, a subseção 2.5.1.2 apresenta alguns outros aplicados a rede de escuros e a subseção 2.5.1.3 apresenta alguns trabalhos aplicados a redes fictícias, ou seja, redes que não condizem à realidade por não manipularem dados reais. Por fim, a subseção 2.5.1.4 faz referência a um trabalho que aborda todas as redes de produtos em escopo nacional. Este trabalho está sendo realizado em paralelo ao trabalho foco desta tese, pelos membros de uma equipe da UFF, com o objetivo de conceber uma solução baseada em programação matemática para o mesmo modelo do problema apresentado nesta tese.

2.5.1.1 Rede de Claros

Na literatura, os problemas de planejamento e escalonamento de transferência de produtos de petróleo no segmento *downstream* são amplamente abordados por técnicas de PLI ou Programação Inteira Mista (PLIM) (WOLSEY, 1998). Neste sentido, Camponogara (1995) propôs um modelo matemático baseado na representação do PPTDP em um problema de fluxo em redes com múltiplos períodos (BAZARAA; JARVIS; SHERALI, 2009). Neste modelo, as bases e dutos são considerados como vértices e os fluxos de volume como arestas, sendo que o tempo de utilização dos dutos é controlado por períodos temporais discretos. Este

trabalho abordou o problema de planejamento e escalonamento de forma integrada no escopo da rede de claros da região sudeste brasileira. A rede considerada era composta por 13 bases, 28 dutos e 7 tipos de produtos. Porém, devido ao tamanho do problema, não foi possível encontrar uma solução viável para um horizonte de planejamento de 40 horas discretizados em períodos de 4 horas.

Devido à dificuldade em se obter soluções para o modelo, o autor propôs uma segunda abordagem, a qual se baseia na decomposição do problema em três subproblemas e resolução por meio de um conjunto de métodos heurísticos. Mais precisamente, a resolução do problema se baseia em três etapas dependentes: a) definição dos fluxos de movimentação entre as bases, onde um fluxo consiste no volume de um dado produto a ser movimentado entre duas bases com a pré-definição de uma data máxima de entrega, b) escolha de uma rota registrada para realizar a movimentação de cada fluxo e c) escalonamento dos fluxos.

Cada uma destas etapas é resolvida separadamente por um conjunto de algoritmos heurísticos com estratégias gulosas, os quais são executados por um grupo de agentes colaborativos organizados em times assíncronos (TALUKDAR et al., 1998). Um time assíncrono ou A-Team refere-se a uma organização descentralizada de agentes com capacidades para executar diferentes algoritmos de otimização. Estes agentes produzem soluções parciais e mantêm estas soluções em memória compartilhada com todos os agentes (TALUKDAR et al., 1998). Mesmo com esta esquematização do problema, ainda não foi possível encontrar uma solução que fosse ao menos considerada viável. Nos exemplos apresentados, para um horizonte de planejamento de 120 horas, a demanda não foi atendida a partir de 80 e 100 horas (CAMPONOVARA, 1995).

Com o intuito de melhorar os resultados obtidos em (CAMPONOVARA, 1995), outros trabalhos foram propostos posteriormente adotando o processo de resolução baseado na decomposição do problema, mas empregando algoritmos mais sofisticados. Entre estes, Milidiu, Pessoa et al.(2001) fizeram uso da metaheurística GRASP (*Greedy Randomized Adaptive Search Procedure*), um método construtivo que gera uma solução inicial de forma gulosa, aleatória e adaptativa e posteriormente realiza uma busca local para melhorar a qualidade da solução (FEO; RESENDE, 1995). Desta forma, o respectivo trabalho considerou os resultados retornados pela abordagem A-Teams como solução inicial e fez uso de buscas locais para melhorar a solução. Com isso, conseguiu-se encontrar soluções capazes de satisfazer todas as restrições, porém, ainda com um alto tempo de processamento.

Posteriormente, Braconi (2002) também abordou o mesmo problema, inspirando-se no modelo de fluxo em redes multiperíodos proposto em (CAMPONOVARA, 1995). De acordo com a prática de decomposição do problema, Braconi (2002) separou o problema em planejamento e escalonamento, resolvendo cada qual por meio de dois diferentes métodos. O nível de planejamento foi resolvido usando PLIM sobre uma relaxação do modelo de fluxo em redes supracitado a fim de definir os fluxos de movimentação entre as bases, inclusive o montante de volume, rota e data máxima de entrega. Por sua vez, o nível de escalonamento foi resolvido heurísticamente a fim de atribuir tempo aos fluxos gerados no nível anterior, atendendo as restrições de sequenciamento de produtos e da capacidade de armazenamento (agregada) dos tanques, entre outras restrições constituintes do modelo. Com esta abordagem, Braconi (2002) também conseguiu encontrar soluções capazes de satisfazer todas as restrições para as instâncias reais apresentadas, em um tempo de processamento inferior a 20 minutos para instâncias com horizonte de planejamento variável entre 5 a 30 dias.

Em uma abordagem distinta, Liporace (2005) considerou o problema de planejamento com características de escalonamento como um problema clássico de planejamento em inteligência artificial, ou seja, como um problema de busca sobre um espaço de estados. A busca corresponde em encontrar um caminho que leve do estado inicial ao estado objetivo. Cada estado representa uma dada disposição dos volumes de produtos pela rede, sendo que o estado inicial se refere à disposição inicial dos produtos nas bases e nos dutos. Assim, qualquer movimentação de certo volume leva a uma mudança de estado. O estado objetivo consiste na satisfação das restrições de capacidade de armazenamento de todas as bases e atendimento a demanda de todos os produtos.

Como consequência da concepção deste modelo do problema, uma versão mais simplificada do problema foi selecionada para compor um novo domínio de aplicação de soluções de planejamento na competição *International Planning Competition* (IPC, 2006). Esta competição estimula o desenvolvimento de planejadores genéricos para diferentes domínios de problemas. O novo domínio de aplicação recebeu o nome de *Pipesworld* e é inspirado na rede dutoviária de claros da Petrobrás. O *Pipesworld* considera algumas características básicas do problema real, como: demanda a ser atendida, a data máxima para entrega de produtos, capacidade de tanques agregada e vazões diferentes por duto. Porém, como em alguns outros trabalhos, o modelo considera o volume (batelada) de forma discreta e as capacidades como múltiplos deste volume. A solução deve definir as bases de origem e a

quantidade de bateladas a serem movimentadas para atender completamente a demanda dos destinos.

Para solução deste problema, Liporace (2005) propôs um planejador dedicado que faz uso de técnicas e heurísticas provenientes dos melhores planejadores genéricos a fim de tornar o processo de busca mais eficiente, incorporando também um simulador discreto para a rede dutoviária. O planejador foi testado em instâncias com horizonte de 8 dias no planejamento de movimentações de 16 produtos em uma rede constituída por 13 bases, 25 dutos e 49 rotas. O tempo de resolução foi de aproximadamente 1 minuto, sendo o tempo discretizado em horas.

Mais recentemente, o mesmo trabalho inicialmente proposto em Camponogara (1995) foi novamente abordado em (LOPES, T. M. T., 2010), porém com diferenciações pontuais em relação ao modelo do problema, tal como o tratamento da capacidade dos tanques de forma individual ao invés de agregada. Neste trabalho, o problema de planejamento também foi decomposto em nível tático e operacional, sendo cada nível abordado por meio de diferentes métodos. Em uma primeira proposta, o nível tático foi resolvido por meio de heurísticas fundadas em uma estratégia gulosa a fim de definir os fluxos de movimentação. Nesta fase, um fluxo consiste na definição do produto, volume, bases de origem e destino, rota e prazo máximo de entrega.

O modelo heurístico utilizado não visa otimizar o custo de transferência de produtos, mas apenas satisfazer as restrições impostas no problema. Porém, estas restrições não contemplam as capacidades de armazenamento em tanques e de transporte em dutos. Basicamente, esta solução heurística prioriza o atendimento de bases consumidoras com demandas mais críticas em relação ao tempo, ou seja, que apresentam mais alta previsão de consumo em dias mais prévios. O dia previsto para falta do produto corresponde ao prazo máximo de entrega do fluxo. Para atender a demanda destas bases, a heurística consiste em selecionar as bases produtoras mais próximas, ou seja, conectadas por um menor número de dutos. Por fim, ocorre a seleção das rotas, priorizando as de maior vazão, e do volume a ser transferido a fim de atender a demanda.

O plano retornado pela heurística serve como entrada para o planejamento operacional, ou seja, para a realização do escalonamento temporal dos fluxos. Nesta fase, aumenta a quantidade de restrições a serem consideradas, incluindo as capacidades de armazenamento e transporte. Desta forma, caso seja verificado que algum fluxo não respeita alguma restrição, a fase de planejamento é reexecutada.

O escalonamento também não visa otimizar uma função objetivo, mas apenas encontrar uma solução que seja viável. Para isso, os autores propõem um modelo baseado na programação por satisfação de restrições, sendo que tal técnica permite definir variáveis com domínios finitos e restrições a serem satisfeitas sem a exigência de uma solução otimizada (MARRIOTT; STUCKEY, 1998). Para reduzir a complexidade do problema, o modelo foi decomposto na fase de sequenciamento (i.e. define a ordem dos fluxos) e de escalonamento (i.e. atribui os tempos aos fluxos), sendo cada submodelo resolvido de forma separada.

O modelo de planejamento integrado (tático e operacional) foi testado em quatro instâncias reais da malha de claros da região sudeste brasileira, as quais compartilham a mesma topologia composta por 14 bases com 242 tanques individuais de armazenamento, 30 dutos e 32 diferentes produtos. O modelo apresentou soluções que satisfazem as restrições em um intervalo de tempo inferior a 10 minutos, sendo a fase de planejamento mais lenta do que a fase de escalonamento (LOPES, T. M. et al., 2010; LOPES, T. M. T., 2010).

Com a intenção de melhorar estes resultados na fase de planejamento, o mesmo autor propôs um novo modelo matemático representado na forma de um problema de fluxo em redes. Este modelo diferencia dos anteriores ao suportar o uso restrito de rotas cadastradas, evitando que fluxos sigam rotas inadequadas, ou seja, que não são homologadas (LOPES, T. M. T., 2010; MOURA, A. et al., 2008). Nesta representação, a intenção foi considerar uma maior quantidade de restrições e também definir uma função objetivo para a minimização dos custos de movimentação. Em termos de resultados, o modelo de planejamento foi testado sobre 12 instâncias reais, composta por 14 bases com 192 tanques, 19 dutos e 11 produtos para o horizonte de um mês. O tempo de processamento de cada instância foi baixo, apresentando uma média de 20 segundos. Neste mesmo trabalho, os resultados retornados foram comparados com as soluções concebidas manualmente pelos especialistas logísticos da Petrobrás, havendo uma redução de 25% no volume de produtos movimentados (LOPES, T. M. T., 2010; MOURA, A. et al., 2008).

Mais recentemente, este mesmo problema de transferência de derivados foi abordado em (BOSCHETTO, SUELLEN NEVES, 2011; BOSCHETTO, SUELLEN NEVES et al., 2010), consistindo na rede de claros da região sudeste brasileira. Porém, ambos os trabalhos se diferem em termos de certos detalhes no modelo do problema e qualidade de solução. Apesar dos dois trabalhos considerarem o mesmo horizonte de planejamento (i.e. 1 mês) e mesmo cenário composto por 14 bases, 30 dutos e 32 produtos, o modelo de Boschetto (2011) considera as capacidades dos tanques de forma agregada, sendo que o modelo de Lopes

(2010) considera tais capacidades de forma individual. Por outro lado, Boschetto (2011) faz uso de modelos PLIM a fim de retornar uma solução de maior qualidade em detrimento a soluções que apenas obedecem as restrições do problema.

Mais precisamente, Boschetto (2011) propôs uma abordagem de decomposição do problema em cinco principais etapas, cada qual implementada de forma independente em modelos PLIM. As etapas são as seguintes:

- Planejamento: esta etapa consiste na definição do volume de cada produto a ser transferido entre as bases dentro do horizonte de planejamento, especificando as bases de origem e destino e as respectivas rotas. Na fase de planejamento não se faz menção ao tempo e nem ao custo de movimentação, mas consideram-se as capacidades de armazenamento e de transporte dos dutos.
- Alocação de recursos: nesta etapa, o volume mensal de movimentação é subdividido em parcelas menores para formar as bateladas de movimentação. Também é definida heurísticamente uma sequência de envio das bateladas.
- Sequenciamento: nesta etapa, se necessário, as bateladas podem ser reordenadas por meio de outros métodos mais apurados.
- Pré-análise: novas subdivisões de volume são propostas de acordo com as sequências das bateladas e dinâmica da malha.
- Temporização: finalmente, os tempos de movimentação de cada batelada são definidos, buscando satisfazer todas as restrições do problema.

Em relação aos resultados, este modelo foi experimentado em oito instâncias reais com dados referentes há meses distintos. Nos testes referentes à etapa de planejamento, soluções ótimas foram obtidas para todas as instâncias, com uma média de três segundos de execução para cada instância. Quando todas as etapas são consideradas conjuntamente, soluções ótimas são obtidas em tempo inferior a sete minutos.

2.5.1.2 Rede de Escuros

No trabalho de Alves (2007), uma abordagem evolutiva foi proposta por meio de um modelo baseado em algoritmos genéticos para o planejamento da transferência de produtos na malha de escuros da região sudeste brasileira. Por se tratar de um trabalho inicial, muitas restrições não foram consideradas. Por exemplo, o modelo não considera o uso de rotas registradas, os custos de movimentação pelos dutos e a possibilidade de reversão de dutos. Por outro lado, considera a capacidade de armazenamento das bases e dutos por unidades

discretas de tempo, bem como as informações do estado inicial da rede e taxas de produção e demanda por unidades de tempo. Cada unidade de tempo consiste em um intervalo de 4 horas, sendo o horizonte de planejamento variável entre uma ou duas semanas. O volume dos produtos é considerado em termos de lotes discretos e as capacidades de armazenamento e transporte são consideradas como múltiplos do tamanho de um lote.

O objetivo do problema é atender a demanda dos produtos e reduzir a fragmentação das bateladas nos dutos ao mesmo tempo em que reduz o tempo de parada das bateladas. O algoritmo foi experimentado em 5 instâncias de teste com horizonte de 7 e 14 dias, composta por 8 bases e 8 dutos com as respectivas informações de produção, demanda e capacidades, as quais foram extraídas de relatórios internos da Petrobrás. O algoritmo encontrou soluções viáveis para as instâncias experimentadas em um tempo médio de 10 minutos para instâncias com horizonte de 7 dias, e 25 minutos para instâncias de 14 dias.

Mais tarde, Pereira (2008) propôs um modelo PLIM para resolver o mesmo problema da rede de escuros abordado em (ALVES, 2007), considerando as mesmas hipóteses, abstrações e objetivos. Porém, para as mesmas instâncias abordadas em (ALVES, 2007), o modelo PLIM não conseguiu obter soluções viáveis após um intervalo superior a 24 horas de execução, mesmo para as instâncias com horizonte de 7 dias.

Mais recentemente, os trabalhos de (FILHO, ERITO MARQUES DE SOUZA; BAHIENSE; FILHO, 2011; FILHO, ERITO M. DE SOUZA et al., 2010) apresentaram modificações pontuais ao modelo original de Pereira (2008) por meio de relaxações em algumas variáveis. Estas modificações permitiram ao modelo encontrar soluções viáveis às mesmas 5 instâncias da rede de escuros. Em comparação com as soluções encontradas pela abordagem evolutiva em (ALVES, 2007), o modelo PLIM melhorado conseguiu resultados de melhor qualidade. Em termos de tempo, para a instância mais simples, o modelo precisou de 16 minutos para retornar a solução.

2.5.1.3 Redes Fictícias

Há também trabalhos similares em redes mais simplificadas. O trabalho desenvolvido em (DE LA CRUZ et al., 2003) aborda uma rede fictícia composta por 3 bases produtoras, 5 bases intermediárias e 4 bases consumidoras, sendo estas conectadas por meio de 21 dutos unidirecionais responsáveis pela movimentação de 3 tipos de produtos. O modelo do problema considera as capacidades de estoque nas bases e nos modais em termos de lotes discretos, sendo que as informações de produção e demanda também são dadas em termos de

lotes. Cada demanda apresenta uma data máxima de entrega a ser respeitada. Assim, o problema busca definir a quantidade de lotes a ser movimentada entre as bases para que as demandas sejam atendidas e também para reduzir a quantidade de produtos diferentes que são escoados sequencialmente nos dutos, com a intenção de evitar a fragmentação excessiva das bateladas. Este problema foi abordado por meio de um algoritmo evolutivo multiobjetivo baseado em algoritmos genéticos (FONSECA; FLEMING, 1998). Em relação aos resultados, o modelo foi aplicado a apenas uma instância do cenário supracitado, apresentando solução viável em um intervalo de tempo aceitável.

Em Garcia, Martin et. al.(2004), os mesmos autores propuseram uma nova solução ao problema por meio de um modelo PLIM. No entanto, o cenário de experimentação consistiu em apenas 7 bases e 7 dutos. O modelo PLIM encontrou resultados similares à abordagem evolutiva. No mesmo trabalho, eles experimentaram uma abordagem híbrida constituída pelas duas soluções, a qual consiste primeiramente na execução PLIM e posteriormente na abordagem evolutiva para melhorar os resultados. Esta abordagem integrada apresentou melhores resultados do que as formas individuais.

Em Souza (2010), o mesmo problema apresentado em Cruz, de Andres-Toro et al. (2003) e Garcia, Martin et al.(2004) foi resolvido por meio do algoritmo evolutivo de otimização por nuvem de partículas (PSO) (KENNEDY; EBERHART, 1995) e outras duas extensões do algoritmo genético multiobjetivo NSGA-II (Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II)(DEB, 2001). Em testes comparativos com o algoritmo evolutivo de Cruz, de Andres-Toro et al. (2003) realizados sobre 15 instâncias de teste, os três algoritmos propostos apresentaram melhores resultados em termos de qualidade e tempo de execução. Dentre as três abordagens, o modelo baseado no algoritmo PSO apresentou melhores resultados qualitativos em um tempo médio que variou entre 15 segundos para a instância mais simples (i.e. 7 bases e 15 unidades de tempo) a 7 minutos para a instância mais complexa (i.e. 14 bases e 150 unidades de tempo).

2.5.1.4 Todas as Redes

Em paralelo ao desenvolvimento deste projeto de tese, uma equipe da UFF está trabalhando na resolução do mesmo problema em questão. Esta equipe está trabalhando com um modelo matemático baseado em PLIM. Este modelo também tem como objetivo minimizar os custos das transferências de produtos e as violações diárias das faixas de estoque operacionais e físicas.

A versão atual do modelo já se encontra em testes em cenários da rede de GLP e claros, devendo teoricamente apresentar o mesmo comportamento em cenários de escuros. Em um experimento com a versão inicial do modelo para um cenário inter-região de GLP (AIZEMBERG et al., 2011), sem envolver características mais particulares do problema (e.g. degradação, transbordo), o tempo despendido pelo modelo PLIM foi de aproximadamente 7 minutos. Porém, as curvas de estoque diárias não se mantiveram dentro das faixas de estoque desejáveis durante o horizonte de planejamento. No entanto, por se tratar de uma versão preliminar, foram apresentadas algumas propostas de aperfeiçoamentos a fim de obter melhores resultados em uma versão posterior do modelo.

Atualmente, em experimentos com a versão mais recente do modelo, que suporta todas as particularidades do problema, os resultados numéricos denotam soluções satisfatórias e de qualidade. Em experimentos envolvendo 5 instâncias de um cenário da rede de GLP com horizonte de planejamento de 30 dias, o modelo retornou soluções ótimas e quase ótimas em um tempo máximo de execução de 12 minutos. Os resultados oficiais deste modelo são apresentados em um estudo comparativo em relação à versão anterior do modelo em um problema com algumas generalizações ao PPTDP (AIZEMBERG et al., 2013).

No entanto, o modelo experimentado apresenta algumas abstrações que podem impedir a concepção de uma solução factível em cenários que envolvam situações mais críticas de estoque. O modelo tem como característica a discretização dos volumes movimentados, sendo estes múltiplos do tamanho de lote mínimo das rotas. Há esforços da equipe de pesquisa para incorporar a possibilidade de definir fluxos com qualquer tamanho de lote, podendo o volume ser maior ou igual ao lote mínimo. Desta forma, por meio dos avanços e aperfeiçoamentos do modelo, os resultados retornados pelo modelo matemático podem ser utilizados para medir o desempenho da solução multiagente proposta nesta tese.

2.5.2 Soluções Distribuídas

De acordo com o explanado na subseção anterior, a maioria dos modelos baseados em métodos matemáticos e evolutivos apresentaram resultados satisfatórios para as instâncias estudadas. Porém, estes mesmos modelos podem apresentar dificuldades de convergência em problemas de maior escala, tal como no PPTDP com abrangência nacional. Geralmente, os modelos matemáticos demandam diversas formas de abstração ou heurísticas a fim de viabilizar o processo de solução, pois em modelos com muitas variáveis, soluções podem não ser encontradas por exaurirem as capacidades de *hardware* (BOSCHETTO, SUELLEN

NEVES 2006). Nestes casos, o modelo deve ser cuidadosamente construído a fim de se obter soluções eficientes. Em relação aos modelos evolutivos, mesmo que estes sejam mais eficientes, as suas estruturas também podem inviabilizar o seu uso para representação de certas particularidades dos cenários reais. Como exemplo, Crane (1999) constatou que pode ser necessário uma estrutura (i.e. cromossomo) do tamanho de 1 Gbyte para apresentar efetivamente uma solução real de planejamento.

Além disso, estas soluções apresentam natureza centralizada que remetem aos problemas já mencionados. Na literatura, há ainda poucas propostas baseadas em soluções descentralizadas para a resolução do problema, mas esta forma de execução pode ser uma necessidade em um futuro próximo. Além de manter o sigilo das informações entre os envolvidos, estas soluções também apresentam os benefícios da execução de processos de forma concorrente a fim de melhorar o desempenho do sistema. O suporte ao processamento concorrente pode compensar o custo de comunicação entre os processos, quando estes são executados remotamente. Porém, quando tais soluções são executadas em uma mesma máquina provida de múltiplos núcleos de processamento, o custo de comunicação é desprezível.

O trabalho de Marcellino (2006) apresenta um modelo distribuído na forma de um Problema de Satisfação de Restrições Distribuído com Otimização (DCOP, do inglês *Distributed Constraint Optimization Problem*) para a resolução do problema tático de planejamento da malha de claros da região de São Paulo. Esta abordagem tem como objetivo encontrar a solução ótima por meio da distribuição das variáveis e restrições do problema entre múltiplos agentes autônomos, os quais representam as bases. Vários algoritmos foram testados pelo autor para aplicação no problema, sendo que o algoritmo Adopt (Asynchronous Distributed Optimization (MODI et al., 2005)) apresentou melhores resultados e por isso foi selecionado para compor a solução final.

O modelo do problema considera apenas três produtos e um horizonte de uma semana, não fazendo menção ao tempo dentro deste período. Assim, o objetivo da solução é definir os volumes de produtos a serem movimentados entre as bases a fim de atender a demanda dos consumidores no final do horizonte com menor custo de movimentação, respeitando as capacidades agregadas de armazenamento e transporte. Em termos de resultados, a solução foi experimentada sobre 5 instâncias geradas aleatoriamente com base em dados históricos da malha de claros. Para algumas instâncias, o resultado ótimo foi retornado em poucos segundos, mas para outras o resultado foi retornado após algumas horas

de processamento. Em algumas situações, o resultado ótimo não foi encontrado por que o tempo máximo de execução foi alcançado, 14 horas, apresentando como resultado a solução obtida até o momento.

Um problema parecido e também com um método DCOP foi abordado em Pereira (2011). Este trabalho apresenta um novo algoritmo DCOP chamado MOASSÍ (Método Otimização ASSÍncrono baseado em propagação de restrição distribuída) que permite atribuir valores contínuos às variáveis, sendo que os demais algoritmos DCOP apenas atuam sobre domínios discretos. Este algoritmo foi implementado por meio de agentes de *software* que atuam de forma distribuída e assíncrona a fim de resolver uma simplificação do problema de planejamento tático abordado nesta tese.

O problema apresenta uma característica especial, sendo que toda a demanda (balanço negativo) de produtos é exatamente suprida pela produção de produtos (balanço positivo). Assim, o objetivo da solução é definir o conjunto de movimentações entre as bases, as respectivas rotas e volumes dos fluxos a fim de que todas as bases apresentem balanço igual à zero. Em termos de resultados, a solução foi experimentada em 5 instâncias fictícias com variação na quantidade de bases, rotas e produtos. A instância mais complexa consiste na movimentação de 2 produtos entre 7 bases por uma malha composta por 17 rotas. Para as instâncias de estudo, o algoritmo proposto encontrou a solução ótima em poucos segundos.

Neste mesmo trabalho, o algoritmo proposto foi comparado com um dos algoritmos DCOP mais populares e eficientes, o *Dynamic Programming OPTimization* (DPOP) (PETCU; FALTINGS, 2005). Para a instância mais complexa, o DPOP não conseguiu gerar uma solução dentro do intervalo de 3 horas. Porém, em relação às demais instâncias, o DPOP encontrou a solução ótima em segundos para algumas instâncias e poucos minutos para outras, mas sempre apresentando tempo de processamento superior ao algoritmo MOASSÍ (PEREIRA, F. R., 2011). Porém, as instâncias tratadas por estas abordagens não apresentam complexidade significativa, podendo não apresentar resultados em tempo hábil em instâncias com topologias mais complexas ou especificações mais próximas da realidade.

Por fim, o autor desta tese abordou o mesmo problema simplificado de planejamento apresentado em Pereira (2011) na forma de um modelo de negociações entre agentes. Os resultados se mostraram satisfatórios para instâncias com um ou mais produtos, como se pode verificar em Banaszewski, Pereira et al. (2010) e Banaszewski, Tacla et al. (2010). No entanto, esta versão simplificada não considera certas particularidades fundamentais do problema a ser abordado nesta tese, tal como as restrições temporais e de armazenamento.

2.6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este capítulo apresentou essencialmente o problema de planejamento tático de transferência de derivados de petróleo e assuntos relacionados. Primeiramente, uma definição precisa de planejamento na área industrial foi apresentada e alguns conceitos básicos foram elucidados para melhor contextualizar o problema em foco. Na sequência, o cenário real de aplicação do plano foi apresentado para que em seguida as abstrações do modelo do problema fossem descritas. Esta descrição foi sustentada por notações matemáticas e organização dos dados em forma de árvore, uma representação de partes dos arquivos XML a serem considerados pelo sistema computacional. O sistema também considerará outras exigências, como foi discutido.

Finalmente, algumas soluções da literatura para o mesmo domínio do problema foram apresentadas. Com base nos trabalhos correlatos encontrados na literatura, exceto o trabalho paralelo realizado pela equipe da UFF, nenhum outro trabalho apresentado consiste exatamente ao problema a ser abordado nesta tese. Este fato é comum em problemas do mundo real, pois cada modelador pode apresentar percepções e vontades distintas em relação à realidade e, com isso, levar a diferenciações, mesmo que pontuais, nos modelos do problema. Ademais, o problema real abordado apresenta abrangência nacional e multimodal que aumenta significativamente o seu tamanho. Ainda, a maioria destes trabalhos fazem uso de abordagens centralizadas, e por isso, não se beneficiam da característica descentralizada destes tipos de problema. As abordagens baseadas no paradigma de agentes de *software* se beneficiam naturalmente de tal característica, como será visto no próximo capítulo.

3 PARADIGMA DE AGENTES DE *SOFTWARE*

O problema de planejamento de transferência de derivados de petróleo é caracterizado pela sua natureza descentralizada e interativa entre as partes o que motiva o estudo e a aplicação de abordagens que suportem tais características. O paradigma de agentes de *software* se apresenta bastante promissor para aplicação neste tipo de problema, uma vez que oferece uma representação mais fiel da estrutura do problema e dos comportamentos das respectivas entidades (i.e. bases, modais) em comparação com as abordagens centralizadas.

Deste modo, este capítulo descreve os principais conceitos e definições do paradigma de agentes e alguns trabalhos relacionados mais importantes. A seção 3.1 apresenta o conceito de agentes em situações em que eles agem individualmente em relação ao ambiente em que habitam e também em situações de interação com outros agentes. A seção 3.2 descreve sobre a correspondência representacional entre agentes e cadeias de suprimentos. A seção 3.3 descreve sobre as formas de coordenar as interações entre os agentes, enfatizando os mecanismos de negociação. A seção 3.4 apresenta os principais conceitos, definições e variações dos mecanismos de leilão, uma forma de negociação em ambientes competitivos. Por sua vez, a seção 3.5 apresenta os principais conceitos, definições e extensões ao protocolo Contract-Net que também representa uma estrutura de leilão, mas para ambientes cooperativos. A seção 3.6 descreve sobre o uso de plataformas especializadas para suportar a implementação de sistemas baseados em agentes e, por fim, a seção 3.7 apresenta as considerações finais.

3.1 DEFINIÇÃO

De acordo com Jennings (1999), um agente consiste em uma entidade computacional situada em um ambiente, capaz de executar ações de forma flexível e autônoma a fim de alcançar os objetivos estabelecidos no momento de sua concepção. Segundo Russel e Norvig (2003), um agente habita um ambiente real (e.g. um edifício) ou virtual (e.g. um simulador), percebe mudanças no ambiente por meio de sensores e age sobre o ambiente de acordo com as mudanças percebidas.

Estas definições trazem a tona algumas das principais características de um agente:

- Situado: um agente está imerso em um ambiente, sendo capaz de perceber o que acontece neste ambiente e de executar ações para modificar certos estados deste ambiente. Segundo Ferber (1999), a percepção do agente é limitada, possuindo apenas uma representação parcial ou mesmo nula do ambiente.
- Autônomo: um agente deve ser capaz de agir sem intervenção humana e pode aprender a partir de suas próprias experiências. Além disso, um agente deve ser capaz de controlar os seus estados e ações.
- Flexível: um agente é dito flexível quando apresenta comportamento sensível às mudanças do ambiente ou baseado em seus próprios objetivos.

Entre estas características, Wooldridge (2002) considera como suficiente apenas a existência da flexibilidade para caracterizar um agente. Um sistema de agentes é dito flexível quando os agentes são reativos, pró-ativos e sociais (JENNINGS, N. R. et al., 1998). Estas subcaracterísticas são descritas a seguir:

- Reativo: um agente percebe o ambiente em que está inserido e reage às mudanças que ocorrem neste ambiente.
- Pró-ativo: um agente não reage simplesmente às mudanças no ambiente. Ele é capaz de exibir um comportamento proativo guiado por seus objetivos e, portanto, de tomar a iniciativa para executar suas ações.
- Social: um agente deve interagir com outros agentes artificiais ou humanos para ser auxiliado na resolução de seus próprios problemas ou então auxiliar aos demais agentes na resolução dos problemas deles.

As subcaracterísticas de reatividade e pró-atividade são determinantes para diferenciar as formas de raciocínio dos agentes. Um agente pode se comportar unicamente de forma proativa ou de forma reativa ou ainda de forma híbrida, variando sobre os dois comportamentos. Estas diferentes formas de agir permitem classificar os agentes em dois diferentes modelos de raciocínio: modelo cognitivo e reativo.

Os agentes cognitivos (também chamados de deliberativos) possuem um modelo explícito e simbólico do mundo e, portanto, são capazes de raciocinar, planejar e negociar com outros agentes a fim de coordenar as suas ações (NWANA, 1966; WOOLDRIDGE, M.; JENNINGS, 1995). Atualmente, há dois modelos que se destacam para a concepção de agentes cognitivos: o SOAR desenvolvido por uma equipe de pesquisadores da Universidade de Michigan (WRAY; JONES, 2005) e o BDI (*Beliefs, Desires e Intentions*) desenvolvido conceitualmente no SRI (*Stanford Research Institute*) International por Bratman (BRATMAN, 1987) e formalizado

por Rao e Georgeff (1995). Sucintamente, o SOAR e o BDI são modelos cognitivos genéricos para o desenvolvimento de sistemas cujos agentes exibem comportamento inteligente.

No SOAR, o modelo cognitivo é inspirado nos conceitos de Sistemas Baseados em Regras (SBR). Um SBR é arquiteturalmente composto por três módulos: uma Base de Fatos, uma Base de Regras e uma Máquina de Inferência (MI)(FRIEDMAN-HILL, 2003). Nesta arquitetura, a Base de Fatos contém um conjunto de elementos da base de fatos que guardam os estados (fatos) de um SMA. A Base de Regras contém um conjunto de regras para representar o conhecimento ou decisões de controle dos agentes. A MI é o módulo de raciocínio do SOAR e SBR responsável por comparar regras e fatos durante os ciclos de inferência, gerando novos fatos.

Na arquitetura cognitiva BDI, um agente apresenta três estados mentais e um processo de inferência que relaciona estes estados:

- Beliefs (Crenças): referem-se às informações que o agente possui sobre o ambiente em que habita (inclusive dos outros agentes). Estas podem corresponder à realidade ou não.
- Desires (Desejos): representa os possíveis planos de ação disponíveis ao agente. Em outras palavras, este estado mental representa os diferentes estados que o agente pode vir a perseguir ou atividades que ele deseja realizar.
- Intentions (Intenções): é um objetivo ou estado-alvo que o agente se compromete a alcançar.

Por sua vez, os agentes reativos não possuem um modelo simbólico do ambiente e agem no modo estímulo-resposta. O comportamento de um agente reativo pode ser guiado por uma necessidade interna (e.g. para satisfazer uma necessidade) ou por um estímulo proveniente do ambiente ou de outros agentes (BROOKS, 1986; FERBER, 1999).

Em relação às características sociais, estas se fazem necessárias para que os agentes interajam a fim de resolver problemas de alta complexidade que estão além de suas capacidades individuais (JENNINGS, NICHOLAS R., 1999). Nestes casos, a interação entre os agentes formam uma única entidade social, ou seja, um sistema multiagente. Em um SMA, os agentes apresentam papéis, objetivos e interagem entre si a fim de contribuir para a resolução de um problema (MAFIK; PECHOUCEK, 2004).

3.2 RELAÇÃO ENTRE AGENTES E CADEIAS DE SUPRIMENTO

Devido à forma pela qual os agentes são organizados e pela interação existente entre as partes desta organização, um SMA pode ser analogamente comparado a uma cadeia de suprimentos. Segundo Sauer (2003), uma cadeia de suprimentos pode ser vista como uma sociedade de agentes autônomos, enquanto um sistema de cadeia de suprimentos pode ser visto como um SMA, onde os membros da cadeia de suprimentos são representados por diferentes agentes.

Esta analogia também pode ser estendida para as propriedades descritivas dos agentes, tal como a autonomia, reatividade, proatividade e habilidade social. Mais precisamente, um membro de uma cadeia de suprimentos apresenta autonomia suficiente para tomar decisões, capacidade de percepção e de reação às mudanças no ambiente em que está situado, de tomar iniciativa na realização de ações e, logicamente, de interagir com os demais membros da cadeia na troca de dados e materiais (CLOUTIER et al., 2001).

Desta forma, o paradigma de SMA se apresenta viável para aplicação em problemas de SCM. De acordo com Parunak (1999), os SMA apresentam maiores benefícios quando são aplicados em problemas que sejam complexos (i.e. tipicamente combinatoriais), modulares (i.e. entidades industriais com seus próprios conjuntos de dados), descentralizados (i.e. disposição desacoplada das entidades componentes do problema) e preferencialmente dinâmicos (i.e. mudanças frequentes no ambiente).

Ademais, como os problemas de SCM geralmente apresentam características distribuídas e descentralizadas, a própria representação do problema em um SMA já é vantajosa, uma vez que permite naturalmente modularizar e particionar o espaço do problema (JENNINGS, N. R., 2000). Em complementação, Huns and Stephens (1999) salientam que a natureza descentralizada das cadeias de suprimentos pode inviabilizar soluções centralizadas, uma vez que os dados estão sobre posse dos diferentes membros da cadeia.

3.3 MECANISMOS PARA COORDENAÇÃO DAS INTERAÇÕES ENTRE OS AGENTES

As interações entre as partes de um SMA devem ser coordenadas para evitar que ocorra uma comunicação caótica e permitir que os agentes atinjam os seus objetivos particulares ou de todo o grupo. O processo de coordenação consiste em um conjunto de mecanismos necessários para que a carga de serviços seja distribuída de forma equilibrada entre os agentes com redução no acoplamento lógico e dependência de recursos (SUN; WU,

2009). Por meio de uma política de coordenação, os agentes conseguem realizar suas atividades de forma coerente com as atividades de outros agentes. No entanto, o uso de um processo de coordenação não significa que os agentes apenas trabalharão cooperativamente a fim de alcançar o objetivo comum do grupo, mas que estes também podem se relacionar de forma competitiva a fim de priorizar os seus próprios objetivos em detrimento a de outros agentes.

Em sistemas organizados para trabalhar de forma competitiva, os agentes competitivos ou autointeressados interagem a fim de resolver certos conflitos por objetos ou recursos com o intuito de majorar ao máximo o seu próprio valor de utilidade, o qual pode representar o seu bem-estar, lucro financeiro ou mesmo a quantidade de recursos alocada. Estes agentes cooperam com os demais agentes apenas quando isto contribui para a maximização do seu próprio valor de utilidade. Por outro lado, em sistemas organizados para funcionar de forma cooperativa, os agentes cooperativos ou benevolentes compartilham do mesmo objetivo, interagindo para resolver problemas em equipe sem exigir recompensa para tal. Nestes sistemas, os agentes também podem ter objetivos diferentes, mas a sua motivação principal é a maximização do bem-estar social, ou seja, a maximização do valor de utilidade para o conjunto de agentes.

Geralmente, as interações entre os agentes competitivos ou cooperativos são coordenadas por meio de mecanismos de negociação. Segundo Weiss (1999), o mecanismo de negociação consiste em regras de interação entre dois ou mais agentes na tentativa de entrar em um acordo comum sobre possíveis conflitos, propondo concessões e buscando alternativas para que uma solução seja aceita pelos envolvidos.

As negociações podem apresentar caráter competitivo ou cooperativo, tal forma de negociação dependerá apenas das intenções dos agentes envolvidos (BELLIFEMINE; CAIRE; GREENWOOD, 2007). Para que as interações entre os agentes (competitivos ou cooperativos) possam ser coordenadas pelo processo de negociação, faz-se necessário definir três componentes essenciais:

- Linguagem comum para facultar a comunicação entre os agentes. Atualmente, a linguagem de comunicação mais utilizada é a *Agent Communication Language* (ACL) padronizada pela *Foundation for Intelligent Physical Agents*

(FIPA¹⁰)(BELLIFEMINE et al., 2007). A ACL é fundamentada na teoria de atos de fala, a qual define que mensagens trocadas entre os agentes apresentam dois componentes: o ato da fala ou performativa e o conteúdo propriamente dito (SEARLE, 1969). Um ato de fala especifica a intenção do transmissor da mensagem e o impacto do ato comunicativo no estado mental do receptor (SEARLE, 1969).

- Protocolo de interação para direcionar as trocas de mensagens entre os agentes. Basicamente, um protocolo define uma sequência coordenada de troca de mensagens entre os agentes para que estes mantenham uma conversação efetiva e coordenem suas ações (WEISS, 1999).
- Estratégias ou comportamentos para tomada de decisão. Estas estratégias consistem no processo de decisão ou algoritmo usado por agente para determinar os critérios para a concretização de um acordo em uma negociação. Um agente pode adotar diferentes estratégias durante uma negociação, sendo que estas estratégias são determinadas pela seleção de uma tática. Basicamente, uma tática consiste no conjunto de funções que determinam como computar o valor de algum objeto do acordo (preço, volume, duração, qualidade) considerando um único critério (tempo, recurso) (FARATIN; SIERRA; JENNINGS, 1998). A seleção de táticas também pode depender da intenção dos agentes negociadores, ou seja, de agir de forma autointeressada ou cooperativa.

Quando estes três componentes são bem elaborados, eles permitem que os agentes cheguem a um acordo eficientemente sobre os objetos em negociação. Segundo Jennings (2001), dependendo do tipo de protocolo e estratégia utilizada, as negociações podem ser categorizadas em três tipos: leilões, barganha e contratos.

Os leilões consistem em um mecanismo competitivo de negociação, no qual o leiloeiro oferece um recurso e o participante decide se quer ou não adquiri-lo pelas condições apresentadas. A barganha se difere do mecanismo de leilões, pois os dois lados da negociação podem argumentar ativamente de forma competitiva por meio de propostas e contrapropostas a fim de alcançar um acordo. Por outro lado, os mecanismos de contratos referem-se a abordagens cooperativas, tendo o CNet como exemplo mais popular.

¹⁰ Associação internacional sem fins lucrativos criada em 1996 para desenvolver especificações relacionadas ao paradigma de agentes de *software*.

Basicamente, o CNet refere-se à uma abstração do mecanismo de leilões. Esta abstração permite que as estratégias de interação entre os agentes sejam completamente idealizadas para melhor se adaptar ao problema. Assim, o CNet pode ser facilmente moldado para representar interações competitivas ou cooperativas. Porém, o CNet foi inicialmente proposto para utilização em ambientes cooperativos (SMITH, 1980).

O problema de planejamento foco desta tese apresenta natureza cooperativa, sendo que os envolvidos estão inseridos no domínio de uma mesma empresa, havendo interesse comum de que todas as bases alcancem um nível ideal de estoque. Porém, caso haja interesse futuro de inserção de outras empresas para competição pelas alocações dos modais da Transpetro, o problema se caracterizaria como um problema de competição em relação aos modais. Neste caso, haveria a necessidade de usar uma abordagem híbrida de mecanismos de cooperação e competição, sendo que os agentes internos à Petrobras deveriam cooperar para atingir níveis adequados de estoque e estes também deveriam competir com os agentes externos pela alocação dos modais de transporte.

Por conta disso, o CNet é a abordagem mais apropriada para aplicação no problema em foco. No entanto, este protocolo é muito simples para ser aplicado em sua forma pura, necessitando de melhoramentos e adaptações. Deste modo, alguns protocolos baseados em leilões e suas variações, bem como as extensões do CNet são apresentados para sustentar a concepção de novas extensões ao CNet.

3.4 LEILÕES MULTIAGENTE

Esta seção tem como intenção melhor definir o conceito de leilões e apresentar as variedades de protocolos e mecanismos inspirados neste tipo de negociação. A seção é decomposta em duas subseções: a subseção 3.4.1 apresenta uma introdução sobre o conceito e estrutura básica de leilão e a subseção 3.4.2 descreve as variações e extensões propostas a esta estrutura.

3.4.1 Visão Geral

Em uma definição simplista, um leilão consiste em uma estrutura de mercado que permite a oferta com a intenção de venda (pelo leiloeiro) de um ou mais itens para diferentes interessados (os participantes). Neste mecanismo, os papéis de leiloeiro e participantes negociam competitivamente com respeito a um conjunto de regras. Estas regras auxiliam os envolvidos a definirem como a quantidade de itens será distribuída pelos interessados, quais

são os interessados que receberão os itens e qual o valor de venda final destes itens (WOLFSTETTER, 1996). Geralmente, os leilões são usados para determinar o melhor preço de venda que retorne o maior lucro para o leiloeiro em detrimento aos interesses dos participantes, os quais tentam adquirir os itens ou serviços a um preço mínimo (SANDHOLM, T. W., 1999). Geralmente, cada agente apresenta um intervalo de preço no qual se propõe a negociar.

Os mecanismos de leilões se diferem em alguns aspectos pontuais, tais como na quantidade de lances enviados por participante e no sigilo dos valores dos lances. Há leilões em que um participante apenas pode fazer um único lance em um leilão. Estes leilões são comumente chamados de *one-shot* ou de leilões de um único lance. Por sua vez, outros leilões apresentam características mais interativas, sendo que o processo de negociação é organizado em rodadas, dando oportunidade para que os participantes enviem mais de um lance durante o leilão, um lance em cada rodada. Estes leilões são chamados de iterativos. Também, os leilões podem apresentar políticas diferentes em relação à privacidade dos valores dos lances. Há leilões em que os valores dos lances são conhecidos por todos os participantes interessados. Estes leilões são chamados de leilões de lances abertos. Complementarmente, há outros leilões em que os valores dos lances são privados, ou seja, são apenas do conhecimento do leiloeiro e do participante interessado. Estes leilões são chamados de leilões de lances fechados.

Ainda, os leilões podem se diferenciar pelas diretrizes de certos protocolos. Há quatro protocolos básicos de leilões competitivos utilizados para a venda de bens: leilão inglês ou de preço ascendente, leilão holandês ou de preço descendente, leilão de primeiro preço e leilão de segundo preço (KRISHNA, 2002).

No leilão inglês, o leiloeiro oferece o produto por um determinado preço inicial relativamente baixo e espera por lances. Cada lance deve necessariamente apresentar um valor maior do que a oferta já feita ou preço inicial. Para que cada participante esteja ciente do valor da oferta atual, todos os lances dados são de conhecimento de todos os participantes do leilão. Desta forma, o valor do produto ofertado é aumentado sucessivamente por meio dos lances até que nenhum participante ofereça um lance com valor superior ao atual em um dado intervalo de tempo determinado pelo leiloeiro.

No leilão holandês, o leiloeiro oferece o produto por um preço inicial extremamente alto e reduz o mesmo continuamente até que algum participante se disponha a adquirir o produto pelo preço corrente.

No leilão de primeiro preço, cada participante envia o seu lance para o leiloeiro de forma sigilosa, ou seja, os demais participantes não mantêm conhecimento sobre tal valor. Neste tipo de leilão, não há múltiplas rodadas ocasionadas pela variação do preço do produto, uma vez que cada participante pode enviar apenas um lance. Quando o leiloeiro recebe todos os lances, ele os compara e determina o participante vencedor. Assim, o participante vencedor paga pelo produto exatamente o valor ofertado no lance.

No leilão de segundo preço, todo o processo ocorre similarmente ao leilão de primeiro preço. A única diferença é que o participante vencedor do leilão (aquele que fizer o maior lance) pagará pelo produto o valor correspondente ao segundo maior lance.

Nestes leilões apresentados, o cálculo do valor do lance de um participante pode depender de diversos fatores, podendo se tornar bastante complexo e até mesmo demorado em alguns casos, devido a comunicações com outros agentes controladores de recursos complementares. Geralmente, um participante apresenta um conhecimento prévio sobre o produto e determina um preço limite para pagar pelo produto. Outras vezes, o participante não tem tal conhecimento e não consegue avaliar precisamente o valor do produto ofertado.

Este valor pode ser gerado de forma subjetiva pelo participante, não dependendo das avaliações dos outros participantes. Este valor é conhecido como valor privado. Em outras situações, o participante pode mensurar tal valor de forma objetiva, uma vez que tal produto pode não ser adquirido para consumo próprio. Como exemplo, um participante pode tentar adquirir um produto para revenda. Assim, o preço a ser pago pelo produto pode ser definido pelo valor exposto pelos demais participantes do leilão, ou seja, o valor comum (KLEMPERER, 1999).

Quando os participantes avaliam o produto de forma subjetiva, foi demonstrado que os quatro tipos básicos de leilões produzem, em média, a mesma receita esperada pelo vendedor (VICKREY, 1961). Esta proposição é conhecida na literatura como Teorema da Equivalência da Receita. Desta forma, conclui-se que em certos casos o formato de leilão escolhido é irrelevante, uma vez que os mesmos apresentarão praticamente os mesmos resultados (VICKREY, 1961). No entanto, esta afirmação apenas é válida para um único leilão que oferta apenas um tipo de produto indivisível. Para cenários mais complexos, esta afirmação pode não ser válida.

3.4.2 Variações de Leilões

Os tipos de leilões apresentados são os mais populares devido a fatores como simplicidade e confiabilidade por causa de várias aplicações de sucesso (KAGEL; LEVIN, 2008). Porém, para certos cenários, tais tipos de leilões podem não alcançar uma alocação ótima para todos os envolvidos, fazendo com que geralmente os participantes sejam os maiores prejudicados. Exemplos destes cenários são aqueles em que múltiplos itens de produtos são oferecidos para venda, sendo que a dificuldade de encontrar uma alocação ótima é maior quando estes produtos são heterogêneos (CRAMTON, 2004). Ademais, o problema também se agrava quando diferentes produtos devem ser vendidos por diferentes agentes leiloeiros, por exemplo, devido à distribuição física destes produtos. Estes cenários são cada vez mais comuns principalmente com o advento dos leilões *online*, onde um participante tem a oportunidade de participar de vários leilões ao mesmo tempo para adquirir o produto desejado pelo menor preço (ANTHONY et al., 2001; BOYAN; GREENWALD, 2001).

Em leilões de múltiplos itens, os participantes podem estar interessados em adquirir apenas um produto de um dado tipo ou um conjunto de produtos complementares, sendo que a obtenção de todo o conjunto gera o real benefício da compra. Por exemplo, quando pares de sapatos são vendidos separadamente, a compra do pé direito do sapato sem o esquerdo não traz um grande benefício ao participante, mas sim quando ambos são adquiridos conjuntamente (CRAMTON, 2006).

Nestes cenários mais complexos, alguns protocolos mais sofisticados são necessários para que todos os envolvidos sejam beneficiados. Geralmente, na venda de múltiplos itens, os participantes desejam a compra complementar de produtos. Nestes casos, o ideal seria permitir aos participantes a submissão de lances para um conjunto de itens. Os leilões que permitem tal tipo de lance são chamados de leilões combinatórios (CRAMTON, 2006). No entanto, este tipo de leilão pode ser inviável na prática devido à grande quantidade de combinações que podem vir a ser necessárias para encontrar um conjunto de lances sem conflitos e que retorne o maior benefício aos envolvidos.

Outra maneira de leiloar múltiplos itens é por meio de leilões sequenciais e simultâneos. Estas abordagens foram bastante estudadas na área de economia e teoria dos jogos, resultando em algumas comparações práticas que apresentam algumas vantagens e desvantagens de ambos (FATIMA, S., 2006; FATIMA, S. S., 2006; FENG, 2005; HAUSCH, 1986).

De forma sucinta, em um leilão sequencial, os itens são leiloados em uma série de leilões, ou seja, cada leilão ocorre um após o outro. O maior problema neste tipo de leilão refere-se à visão local de um participante, pois muitas vezes este não tem conhecimento sobre o que será ofertado nos próximos leilões e os preços que serão praticados naqueles. Neste tipo de leilão, o participante não possui, no momento de concepção do lance, toda a informação necessária para comprar o produto sem margem a um arrependimento posterior, uma vez que um participante pode se sair melhor em um leilão do que em outro quando os produtos são substituíveis (i.e. não há preferência por uma unidade particular do tipo de produto).

Quando os produtos são complementares, o problema pode ser ainda maior, uma vez que cada leilão oferece apenas um item por vez. Desta forma, o benefício da compra de um item vai depender do sucesso da compra de outro item complementar em um próximo leilão (BRUSCO; LOPOMO, 2006). Esse problema é conhecido como o problema de exposição ao risco (KLEMPERER, 1999). Sendo assim, o licitante precisa criar uma estimativa para os valores de futuros lances. A necessidade de fazer uma estimativa cria um dilema para o participante: fazer um lance conservador e provavelmente perder o leilão ou fazer lances agressivos e mesmo assim acabar adquirindo um conjunto incompleto. Um leilão combinatório é capaz de solucionar o problema de exposição ao risco ao receber lances para um conjunto de itens, mas está sujeito a outros tipos de problemas, tal como o alto tempo de processamento e a necessidade de um único membro centralizador (CRAMTON, 2006).

Os leilões simultâneos podem ser considerados como alternativa para leiloar múltiplos itens de forma mais eficiente. Este tipo de leilão foi primeiramente proposto por Paul Milgrom, Robert Wilson, e Preston McAfee em 1994 para ser usado pela Comissão Federal de Comunicação dos Estados Unidos (FCC) na venda de espectros de frequência (MILGROM, 2004). Este protocolo tem sido adotado com algumas adaptações a outros domínios, tal como na indústria de eletricidade, gás e petróleo (MILGROM, 2004).

Em leilões simultâneos, como o próprio nome expressa, há a ocorrência de vários leilões de forma simultânea ou concorrente, podendo tais leilões vender produtos homogêneos ou heterogêneos (CRAMTON, 2004). Cada leilão praticado é constituído por uma ou várias rodadas, sendo que cada rodada determina um tempo fixo para que os participantes submetam seus lances.

Quando uma rodada termina, o vencedor de cada leilão é anunciado de forma temporária e o valor da oferta se torna público aos demais envolvidos. Assim, os participantes podem oferecer um lance maior na próxima rodada para vencer tais leilões. Quando um

leiloeiro não recebe mais lances em uma rodada, o leilão é então finalizado. Neste caso, o vencedor temporário se torna o vencedor definitivo de tal leilão (CRAMTON, 2004).

Neste tipo de leilão, os participantes podem oferecer lances para uma quantidade ilimitada de leilões, com o lance máximo da rodada anterior sendo usado como base para a próxima rodada de lances. Porém, eles devem executar estratégias para não adquirir uma quantidade menor ou maior do que precisam. Para evitar tais problemas aos participantes, este tipo de leilão pode ser adaptado para permitir lances para itens individuais e conjuntos de itens.

No entanto, este tipo de leilão apresenta um problema: um participante faz uso da estratégia de esperar o envio de lances pelos outros participantes para descobrir o quanto estes estão dispostos a pagar por um dado produto para então optar por dar o lance a um produto com menor preço. Isto ocorre principalmente quando os produtos são substituíveis, ou seja, quando qualquer item de um determinado tipo satisfaz a necessidade do participante. O problema ocorre quando todos os participantes resolvem adotar esta estratégia, não havendo desta forma, a submissão de lances.

Para sanar tal problema, foi proposta como solução a chamada Regra da Atividade (MILGROM, 2004). Nesta regra, cada participante precisa estar ativo em todas as rodadas com lances referindo a uma fração de produtos dos quais ele deseja adquirir. Assim, um participante que deseja adquirir 10 itens de um dado produto, sob uma regra de atividade de 50%, faria lances para pelo menos 5 itens. Essa estratégia pressiona os participantes a fazerem lances e ao mesmo tempo permite maior flexibilidade ao participante para que este mude o destino do lance para um leiloeiro que esteja oferecendo o produto desejado por um preço mais baixo.

Como observado, os leilões sequenciais e simultâneos são bastante utilizados para a venda de múltiplos itens de produtos (BOYAN; GREENWALD, 2001; HAUSCH, 1986). Uma característica particular destas duas abordagens é a relação muitos-para-muitos entre vendedores e compradores, os quais geralmente se relacionam de forma distribuída. Uma abordagem centralizada para resolver o mesmo problema refere-se aos leilões duplos. Neste tipo de leilão, vários vendedores e compradores informam os seus itens e preços para venda ou compra a um membro centralizador. Este membro realiza uma análise de tais ofertas para determinar o conjunto de pares que retorna o maior benefício para os envolvidos (WURMAN; WALSH; WELLMAN, 1998). No entanto, uma abordagem centralizada está propícia a diversos problemas quando aplicada a sistemas multiagentes, tal como a sobrecarga de

processamento sobre o membro centralizador; inatividade do membro centralizador que pode levar a não resolução do problema e espera indefinida dos vendedores e compradores que submeteram suas ofertas.

3.5 PROTOCOLO CONTRACT-NET

Esta seção tem como intenção descrever os principais conceitos do CNet e suas extensões e discutir sobre a viabilidade de aplicação de tais mecanismos no PPTDP. O CNet consiste em um mecanismo de negociação simples, eficiente e com grande capacidade de adaptação a diversos tipos de problemas, principalmente aos quais apresentem características de atribuição de objetos. Mas por outro lado, a sua simplicidade impede que resultados de melhor qualidade estejam presentes em aplicações mais complexas, necessitando para isto, certos ajustes ou extensões. Desta forma, muitas extensões ao CNet foram propostas na literatura com intuito de sanar as suas principais deficiências.

Neste sentido, a presente seção é decomposta em três subseções: a subseção 3.5.1 descreve sobre os conceitos principais do CNet, subseção 3.5.2 descreve sobre algumas propostas de extensão ao CNet e por fim, a subseção 3.5.3 descreve sobre algumas aplicações do CNet a problemas relacionados.

3.5.1 Visão Geral

O CNet foi proposto por Reid. G. Smith em 1980 como um protocolo de interação inspirado no mecanismo de leilões para aplicação na resolução distribuída de problemas (SMITH, 1980). O CNet consiste em um protocolo de alto nível, pois não define uma estratégia ou algoritmo específico a ser utilizado na negociação, mas apenas uma estrutura a ser seguida para implementar tais estratégias (SHOHAM; LEYTON-BROWN, 2009). Em outras palavras, ele apenas define o que cada agente deve dizer ao outro, mas não especifica como o conteúdo da mensagem deve ser concebido (SMITH, 1980).

A racionalidade que envolve o protocolo refere-se ao desmembramento de problemas complexos por um agente, que não apresenta capacidade ou recursos para resolvê-lo, em um conjunto de tarefas a serem alocadas a outros agentes com capacidades ou recursos para tal. Basicamente, este protocolo consiste em um mecanismo de alocação de tarefas que faz uso de negociação e seleção mútua entre os agentes para que tarefas sejam alocadas de forma cooperativa.

As negociações no CNet são realizadas pela interação entre os papéis do leiloeiro e participantes de um leilão, onde qualquer agente pode assumir qualquer dos dois papéis durante a execução do protocolo (FOUNDATION FOR INTELLIGENT PHYSICAL AGENTS, 2002a). Esta interação ocorre por meio de troca de mensagens com semântica expressa por meio de performativas de comunicação. A Figura 22 ilustra estas comunicações por meio de um diagrama de sequência conforme as diretivas da versão 1.x da AUML (*Agent Unified Modeling Language*)(BAUER; MÜLLER; ODELL, 1998).

A versão do CNet apresentada refere-se ao padrão definido pelo órgão FIPA (FOUNDATION FOR INTELLIGENT PHYSICAL AGENTS, 2002a), sendo que esta versão adiciona novas performativas (i.e. possibilidade de rejeição e confirmação de contratos) à versão original de Smith (1980). Atualmente, a versão da FIPA apresenta maior impacto industrial, sendo empregada nas principais plataformas de desenvolvimento de agentes (BELLIFEMINE et al., 2007; FOUNDATION FOR INTELLIGENT PHYSICAL AGENTS, 2011; POSLAD; BUCKLE; HADINGHAM, 2000). Este trabalho de tese considera apenas a versão FIPA do protocolo, sendo esta referenciada no texto como CNet ou CNet convencional e a versão anterior como CNet original.

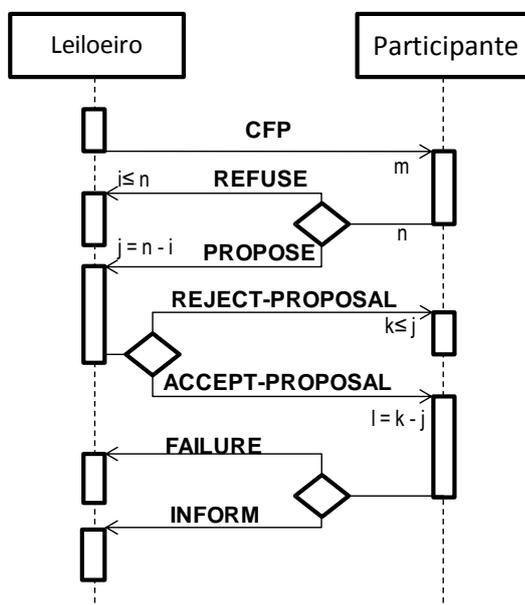


Figura 22 – Protocolo Contract-Net

O protocolo CNet tem início quando um leiloeiro envia um anúncio para uma quantidade (m) de participantes com informações sobre a tarefa a ser executada. Nos termos estabelecidos pelo protocolo, este anúncio é chamado de CALL-FOR-PROPOSAL (CFP). Ao receberem um CFP, os participantes (n) podem decidir por continuar ou não na negociação. Se um subconjunto (j) de participantes desejar continuar devido ao interesse na tarefa

ofertada, cada qual envia uma mensagem de PROPOSE contendo o seu lance ao leiloeiro. Caso o subconjunto complementar (i) decida por não participar do leilão, estes participantes enviam, cada qual, uma mensagem de REFUSE ao leiloeiro. O envio de um PROPOSE expressa a concordância de um participante na execução da tarefa, sendo que os recursos para tal já foram reservados, mesmo não havendo certeza que vencerá o leilão. Por causa disso, um participante geralmente participa de um leilão por vez (quando tem capacidade de executar apenas uma tarefa) para evitar prometer os recursos disponíveis para mais de um leiloeiro, o que geraria inconsistências caso o participante viesse a vencer vários leilões.

Na sequência, o leiloeiro espera por um prazo fixo (i.e. *deadline*) ou o tempo necessário para receber todas as propostas dos participantes. Se o prazo expirar, o leiloeiro apenas considera as propostas recebidas até o momento e começa o processamento para definir o participante vencedor ou participantes vencedores. O leiloeiro envia uma mensagem de ACCEPT-PROPOSAL para cada participante vencedor (l) e uma mensagem de REJECT-PROPOSAL para cada um dos demais participantes (k).

Um participante vencedor recebe o ACCEPT-PROPOSAL que lhe garante a atribuição da tarefa para execução. Neste momento, o acordo entre as partes é concretizado. Assim, a tarefa é executada e o resultado da execução é retornado para o leiloeiro por meio de uma mensagem de INFORM. Caso ocorra uma falha na execução da tarefa, uma mensagem de FAILURE é retornada ao leiloeiro. Assim, o leiloeiro tentará atribuir a mesma tarefa a outro participante, quando houver. Finalmente, quando o leiloeiro recebe as mensagens de INFORM dos participantes com tarefas atribuídas, o leilão é encerrado.

Todavia, o leiloeiro pode iniciar um novo leilão para oferecer outra tarefa ou então oferecer subtarefas obtidas com outro leiloeiro quando exerceu o papel de participante. Também, um participante que recebeu uma tarefa, pode decompô-la em subtarefas e oferecê-las a outros agentes por meio de um novo leilão, no qual ele exercerá o papel de leiloeiro. Esta característica é importante para distribuir serviços entre agentes que não estão conectados diretamente, mas apenas por intermédio de outros agentes.

Esta característica descreve bem a forma de execução descentralizada do CNet. A descentralização também contribui para aumentar o desempenho computacional da solução. Como cada agente fica responsável por uma parcela do problema, este pode ser distribuído a múltiplos processadores (em forma de agente) e resolvido concorrentemente. Logicamente, estas vantagens apenas ocorrem quando o tempo poupado pela execução concorrente dos agentes é maior do que o tempo despendido na comunicação entre eles.

Por outro lado, o CNet apresenta algumas deficiências que muitas vezes inviabilizam a sua aplicação. Como exemplo, o CNet foi proposto para que cada leiloeiro possa oferecer uma única tarefa por vez, não sendo idealizado para oferta de múltiplas unidades em um único leilão. Como alternativa, múltiplas tarefas podem ser oferecidas por múltiplos leiloeiros, cada um oferecendo uma única tarefa. Porém, um participante não atua eficientemente nestas situações. Geralmente, cada participante sequencia a sua participação nos leilões, perdendo boas oportunidades de negociação ao deixar de responder alguns lances. Com isso, leiloeiros também podem não receber lances às suas ofertas por causa deste comportamento dos participantes. Deste modo, alguns aperfeiçoamentos foram propostos na literatura como extensões ao CNet na tentativa de sanar tais deficiências.

3.5.2 Extensões ao Protocolo Contract-Net

Esta seção apresenta algumas propostas de extensões ao CNet convencional em termos comportamentais e estruturais. Mais precisamente, cada extensão é descrita a fim de evidenciar as suas vantagens e desvantagens. Ademais, a estrutura de cada protocolo estendido é apresentada graficamente em forma de um diagrama de sequência conforme as diretivas da versão 1.x da AUML (BAUER et al., 1998).

Estas extensões focam em diferentes aspectos do CNet, tal como: a) na redução do número de mensagens trocadas entre os agentes; b) na medição da qualidade de um acordo; c) na definição do valor de um lance e principalmente, d) na formação de um conjunto de acordos satisfatórios quando agentes negociam simultaneamente. Normalmente, cada extensão contribui para o melhoramento de características específicas das negociações no CNet de acordo com o interesse de aplicação do protocolo em uma aplicação particular, não havendo interesse ou necessidade subjetiva em abordar conjuntamente todas as deficiências do protocolo.

Para melhor apresentar estas extensões, esta seção é organizada em três subseções. A subseção 3.5.2.1 apresenta as extensões interessadas em propor melhorias em termos de eficiência, definição do valor de um contrato (i.e. valor de venda ou de compra) e na qualidade dos acordos. A subseção 3.5.2.2 apresenta as extensões interessadas na concepção de artifícios que dão maior liberdade aos agentes para participação em múltiplos leilões de forma simultânea. Por fim, a seção 3.5.2.3 apresenta uma breve reflexão sobre as deficiências tratadas pelas extensões e a viabilidade de aplicação destas no problema de planejamento petrolífero.

3.5.2.1 Extensões para Melhorar a Eficiência, Valores e Qualidade dos Acordos

Atualmente, a FIPA especifica duas extensões ao protocolo CNet original, o CNet convencional apresentado na seção anterior e também uma versão mais iterativa chamada de CNet Iterativo (FOUNDATION FOR INTELLIGENT PHYSICAL AGENTS, 2002b). A versão iterativa permite aos envolvidos entrarem em ciclos de negociação para melhor definir os valores dos atributos do acordo. Este ciclo de negociação é sempre iniciado pelo leiloeiro, após o recebimento dos lances, por meio de alterações nos valores de um anúncio e reenvio do anúncio a alguns ou todos os participantes.

Para maior precisão na explicação, a descrição deste protocolo é sustentada pelo diagrama de sequência apresentado na Figura 23. Nesta versão, não há diferenças para o CNet convencional em relação ao envio do CFP e recebimento de propostas (mensagem de PROPOSE) ou recusas (mensagem de REFUSE). A diferença ocorre no momento da tomada de decisão do leiloeiro para a definição do lance vencedor. Neste momento, o leiloeiro pode decidir seguir normalmente o processo do CNet por meio do envio de mensagens de ACCEPT-PROPOSAL ou REJECT-PROPOSAL ou então decidir por negociar com os participantes para tentar melhorar os seus valores de lance. Para isso, o leiloeiro seleciona um ou mais dos participantes promissores para os quais pretende enviar um CFP revisado e para os outros participantes, se houver, envia REJECT-PROPOSAL. O leiloeiro pode enviar o CFP quantas vezes achar necessário, criando várias iterações com o participante. Quando o leiloeiro se satisfaz com os valores dos lances recebidos, ele prossegue normalmente a execução do CNet convencional a fim de informar aos participantes sobre a sua decisão. Da mesma forma, o participante vencedor atua conforme o CNet convencional para executar a tarefa e retornar as informações cabíveis ao leiloeiro.

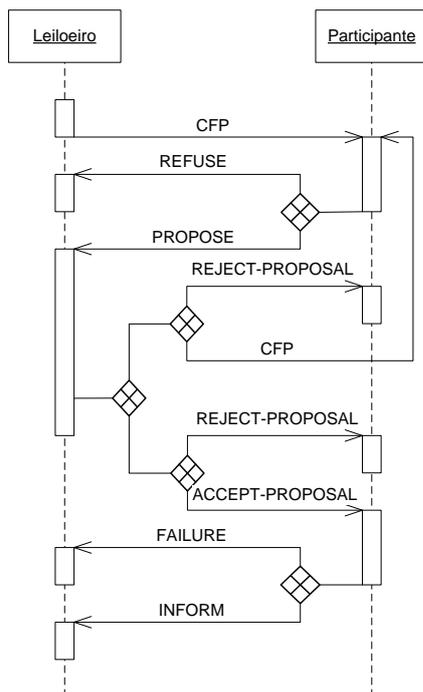


Figura 23 – Protocolo Contract-Net Iterativo

No trabalho de Sandholm (1993), foi proposta uma extensão ao CNet original mais voltada ao comportamento dos agentes em suas tomadas de decisão. A estrutura do CNet original é inalterada. Nesta extensão, as decisões dos agentes são baseadas no cálculo de custos marginais para cada tarefa, ou seja, o custo marginal de uma tarefa para um agente é o custo da solução do agente com a tarefa menos o custo do agente sem a tarefa. Basicamente, o custo marginal significa que um contrato é somente vantajoso para o agente se o ganho de aceitar o contrato é maior do que o ganho de continuar sem o contrato. Neste protocolo, cada agente busca maximizar o seu lucro que é definido pelos seus ganhos menos seus custos, sendo que os ganhos são obtidos pela execução das tarefas e os custos resultam do uso dos recursos para tais execuções.

Em relação à dinâmica do protocolo, um leilão tem início com o envio do anúncio pelo leiloeiro. O anúncio contém o preço máximo que o leiloeiro deseja pagar pela execução da tarefa anunciada. Este preço corresponde ao custo marginal do leiloeiro, ou seja, a diferença entre o custo de continuar com a tarefa ou ficar sem ela. Ao receber o anúncio, o participante calcula o seu custo marginal para a tarefa ofertada e define o preço mínimo pelo qual está disposto a vender os seus serviços. Caso o preço ofertado pelo leiloeiro seja maior do que o seu preço recém-calculado, o participante envia o lance ao leiloeiro informando o seu preço mínimo, caso contrário, o participante ignora o anúncio. Ao receber os lances, o leiloeiro define o lance vencedor de acordo com os seus preços. Para definir o valor a ser pago pela execução da tarefa, ele calcula a média entre o preço máximo dele e o mínimo

especificado pelo participante. Na sequência, o leiloeiro notifica o participante vencedor sobre a sua escolha. Neste momento, o acordo entre as partes é concretizado, sendo que o participante se torna responsável pela execução da tarefa mesmo que o seu custo marginal tenha sido modificado neste intervalo de tempo devido à forte dependência com suas outras tarefas. Finalmente, o participante envia o resultado da execução para o leiloeiro.

Com o foco em outro aspecto do CNet, Ning and Fei-Yan (2009) propuseram melhorias a fim de aumentar a eficiência de execução do CNet em cenários compostos por um grande número de agentes. Basicamente, estas melhorias visam reduzir comunicações desnecessárias entre os agentes e reduzir o processamento despendido nas tomadas de decisão. Segundo o autor, não há um critério no CNet convencional que impeça o leiloeiro de enviar um CFP para todos os participantes. Caso esta situação venha a ocorrer em um ambiente com muitos agentes, os participantes terão que lidar simultaneamente com um alto número de CFPs, sendo que muitos destes podem não apresentar capacidade para execução da tarefa anunciada ou interesse no item anunciado.

Para reduzir a quantidade de comunicações, o autor atribui aos agentes estratégias baseadas em atributos sociais, tais como grau de lealdade, de confiabilidade e de disponibilidade. Estes atributos são computados durante as negociações entre os agentes. Por exemplo, caso o leiloeiro atribua uma tarefa ou item a um participante por meio de um acordo e este venha em seguida quebrar este acordo, o leiloeiro automaticamente decrementa o seu grau de confiabilidade em relação a este participante. Assim, em um próximo leilão, de acordo com o valor retornado por uma equação que representa o conjunto dos atributos sociais de cada agente, o leiloeiro pode omitir este participante da lista de receptores do anúncio. Também, estes atributos sociais podem ser usados na concepção do lance pelos participantes ou na escolha do participante vencedor pelo leiloeiro. Neste último caso, o leiloeiro pode desejar não escolher um participante que outrora estava ocupado para executar uma tarefa, com o receio de que o participante não cumprirá com a sua responsabilidade no contrato.

Caso esta prática ainda não seja suficiente para reduzir a quantidade de CFPs recebidos pelos participantes, o autor propõe um simples artifício para limitar esta quantidade. Este artifício consiste em um *buffer* com capacidade limitada para armazenamento de uma quantidade pré-determinada de CFPs, ou seja, o participante não tratará uma quantidade de CFPs além da suportada pelo *buffer*. No entanto, mesmo que estes ajustes propostos reduzam

a quantidade de mensagens trocadas entre os agentes, estes impedem que os agentes tenham acesso a todas as possibilidades de negociação, influenciando negativamente na solução final.

Com a mesma intenção de Ning e Fei-Yan (2009), o trabalho de Sun e Wu (2009) se propõem a melhorar a eficiência do CNet convencional e também a efetividade de seu processo de coordenação por definir propriedades de raciocínio aos agentes. Os autores propõem uma extensão ao CNet baseado em normas. Uma norma consiste em uma regra ou padrão de comportamento compartilhado entre os membros de uma sociedade que serve para dirigir, coordenar e controlar ações dos envolvidos (WRIGHT, 1963). O uso de normas pode incentivar a representação do conhecimento e regras que existem em um processo de coordenação, que geralmente é negligenciado pelos protocolos de coordenação. Assim, regulamentos institucionais e organizacionais, bem como regras de negócios e operacionais podem ser representadas em forma de normas e compartilhadas entre os agentes.

A extensão do protocolo CNet organiza as interações em duas fases: uma fase preliminar de interação e outra responsável pela definição dos acordos. Na fase preliminar, os agentes que realmente apresentam condições de executar as tarefas são selecionados, restringindo a estes agentes a continuação das interações. Na segunda fase, os agentes selecionados negociam interativamente por meio de decisões multilaterais a fim de formar acordos.

Mais precisamente, as interações nestas duas fases do protocolo são apresentadas na Figura 24. Na primeira fase, o leiloeiro envia o anúncio com a especificação de algumas exigências, tais como as habilidades exigidas para a execução da tarefa, o tempo de expiração do leilão e formato da estrutura do lance. Este anúncio é enviado a todos os participantes. O tempo de expiração e as habilidades exigidas podem ser vistas como exemplo de normas, as quais restringem a quantidade de agentes habilitados a enviarem lances. Por conta disto, em resposta ao CFP, apenas os agentes com as habilidades especificadas e interesse na tarefa prosseguem com a preparação do lance. Ao receber os lances, o leiloeiro realiza a avaliação também por meio de normas sociais. O leiloeiro possui acesso a informações relacionadas à credibilidade de cada participante baseado na história de suas negociações, bem como aos custos e capacidades dos participantes. Pela avaliação destas informações, o leiloeiro seleciona os agentes com maior conformidade com a tarefa para negociarem iterativamente pela tarefa.

O processo de negociação iterativa dá início à segunda fase do protocolo. Esta fase tem como objetivo selecionar melhor os participantes para a efetivação do acordo. Assim, a

negociação tem como resultado um contrato firmado entre o leiloeiro e o participante mais bem sucedido. Com isso, o participante fica responsável pela execução da tarefa. Quando a tarefa é executada, o participante retorna o resultado para o leiloeiro. De acordo com a qualidade da resposta, o leiloeiro avalia o desempenho do participante e atualiza o seu valor de credibilidade, o qual estará disponível para análise por qualquer agente interessado. Desta forma, um bom desempenho do participante na execução da tarefa eleva o seu nível de crédito e vice versa.

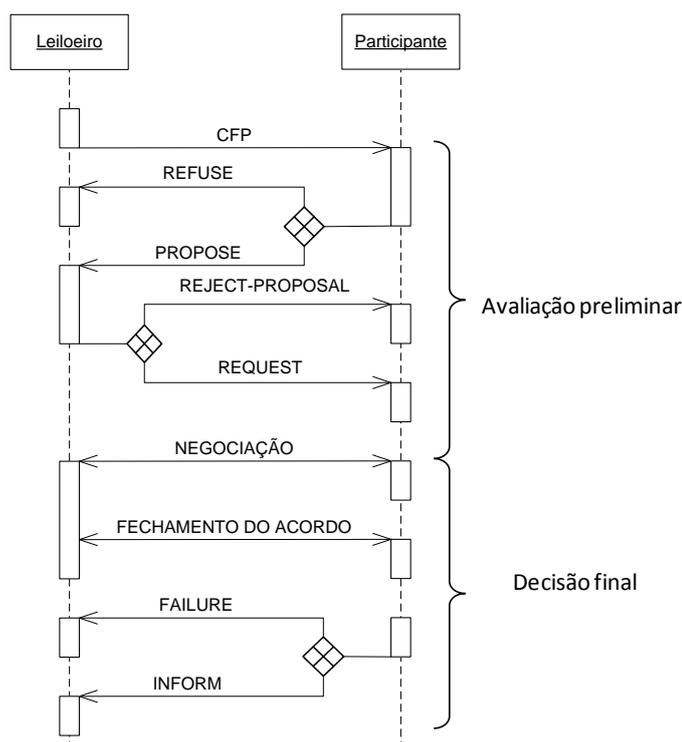


Figura 24 – Protocolo Contract-Net Baseado em Normas

Ainda há outros trabalhos que buscam aumentar a eficiência do CNet reduzindo a comunicação entre os agentes em problemas de larga escala. Basicamente, estes trabalhos investem em mecanismos de aprendizagem para que o leiloeiro possa ter um conhecimento prévio sobre as características dos participantes e assim restringir o número de participantes a receber o anúncio. Como exemplo, Deshpande, Gupta et al. (2005) fazem uso de um método de aprendizagem baseado em instâncias que observa o histórico das negociações para aprender sobre a especialidade dos agentes na execução de diversos tipos de tarefas. Assim, caso um agente leiloeiro apresente um bom conhecimento sobre um dado tipo de tarefa, ele pode proceder atribuindo uma tarefa deste tipo de forma direta a um agente com qualidades satisfatórias para execução. Nestes casos, a redução na quantidade de mensagens trocadas entre os agentes é significativa, principalmente quando há muitos participantes.

Em outro exemplo, o trabalho de Ohko, Hiraki et al. (1997) faz uso da técnica de Raciocínio Baseado em Casos (RBC) para adquirir conhecimento sobre as habilidades dos agentes para a execução de tarefas. Neste contexto, um caso é formado pelas seguintes informações: especificação de uma tarefa, informação sobre os agentes que resolveram a tarefa no passado e a respectiva medida de qualidade de cada agente na realização da tarefa. Estas informações também permitem alocações mais diretas aos agentes.

Mais recentemente, esta técnica de aprendizagem foi empregada na mesma função por Pu-Cheng, Yu-Sheng et al. (2007) para compor uma nova extensão ao CNet. Esta extensão permite que o leiloeiro faça uso de um método multicritério de decisão para avaliar os lances considerando múltiplos atributos, incluindo qualidades do participante (e.g. valor de credibilidade, confiabilidade) e de seus serviços (e.g. custo e tempo de execução).

Em um trabalho ainda mais recente, Raza, Hussain et al.(2010) também propõem uma extensão baseada na medição e avaliação da qualidade dos membros envolvidos nas negociações. Esta extensão é chamada de Q-Contract-Net. Esta extensão permite que o leiloeiro avalie não apenas os valores do lance, mas também atributos qualitativos dos participantes, tal como a reputação, credibilidade e confiabilidade. Da mesma forma, os participantes avaliam não somente o anúncio, mas também os atributos qualitativos dos leiloeiros. Porém, estas operações de medição e avaliação da qualidade elevam o tempo das negociações por demandar acesso a um repositório e sistema de gerenciamento destes atributos, mas por outro lado, esta prática é capaz de sugerir atribuições mais apropriadas que podem contribuir para a redução nos gastos em termos de tempo, recursos e riscos durante a execução das tarefas. Em resumo, esta extensão, tal como as anteriores baseadas em técnicas de aprendizagem evoluem apenas a semântica das negociações no CNet, não alterando de nenhuma forma a estrutura original do protocolo.

3.5.2.2 Extensões para Melhorar a Qualidade de Acordos em Negociações Simultâneas

As versões dos protocolos até então apresentadas não fazem menção a melhorias relacionadas a cenários mais complexos constituídos por vários leilões simultâneos, em quais o CNet é deficiente. No trabalho de Knabe, Schillo et al.(2002), os autores propõem dois novos protocolos baseados no CNet para melhorar a qualidade das atribuições em cenários compostos por múltiplos leilões simultâneos. Nestes cenários, o CNet se apresenta deficiente por restringir a participação dos participantes a um ou alguns leilões por exigir que o participante comprometa seus recursos com o(s) leiloeiro(s) no momento do envio do lance,

ou seja, em um momento em que não há garantia sobre a vitória no leilão. Esta prática degrada a qualidade das alocações, principalmente quando há um grande número de leiloeiros.

Assim, nos protocolos propostos em Knabe, Schillo et al. (2002), a fase de comprometimento com o leiloeiro é postergada para o momento em que o participante é avisado sobre a vitória no leilão. O primeiro protocolo proposto permite aos participantes a participação com maior liberdade de vários leilões simultaneamente e o segundo busca resolver uma deficiência do primeiro que ocorre em situações de negociação em cascata, ou seja, quando uma tarefa contratada por um agente (no papel de participante) é oferecida por este em um novo leilão (no papel de leiloeiro) a outros participantes e assim consecutivamente.

Mais precisamente, o primeiro protocolo proposto em Knabe, Schillo et al. (2002) denomina-se Protocolo Contract-Net com Confirmação (PCNC). Este protocolo insere uma interação adicional ao CNet convencional para confirmar o desejo do participante vencedor em executar a tarefa. A interação entre os papéis neste protocolo é apresentada na Figura 25a.

Neste protocolo, quando o leiloeiro recebe todas as propostas dos participantes, ele ordena os lances de forma decrescente em relação à qualidade de seus valores. Em seguida, o leiloeiro envia uma mensagem de REQUEST ao participante com maior lance a fim de confirmar a execução da tarefa ofertada. O participante pode recusar (mensagem REFUSE) a execução por algum motivo particular ou então concordar (mensagem AGREE) com a execução. Caso o participante envie um REFUSE, o leiloeiro tentará confirmar a execução com outro participante melhor posicionado na lista ordenada. Este processo ocorrerá até encontrar um participante interessado na execução da tarefa ou até que o fim da lista seja alcançado.

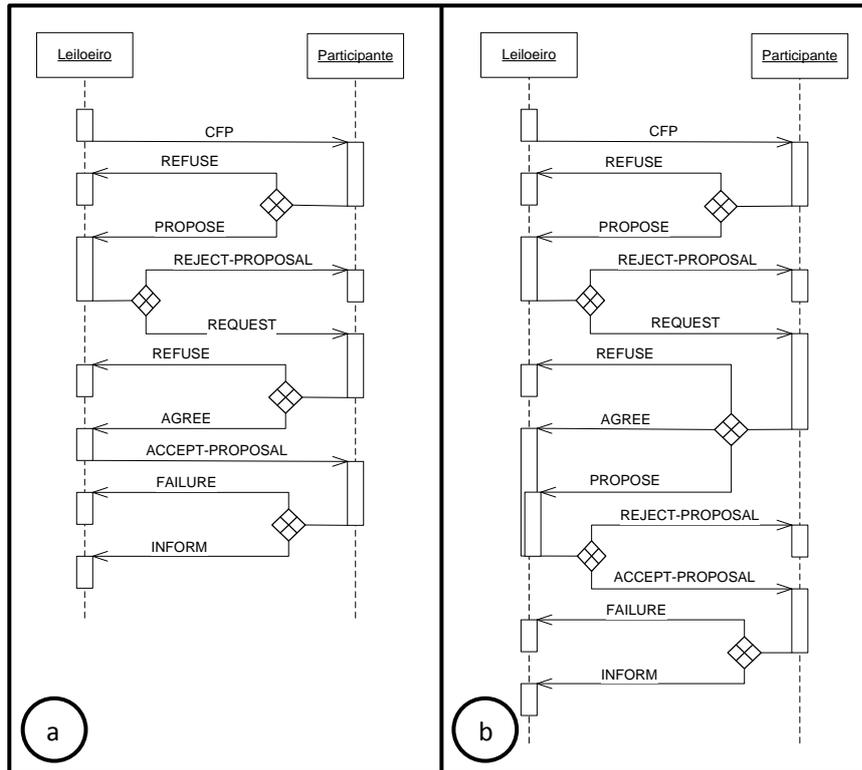


Figura 25 – Extensões ao Protocolo Contract-Net por meio de Interações de Confirmação. a) Protocolo Contract-Net com Confirmação. b) Protocolo Contract-Net Holônico com Confirmação.

No entanto, este protocolo não se comporta adequadamente em situações de negociação em cascata, como no cenário exemplificado na Figura 26. A figura apresenta um cenário de negociação entre cinco agentes, onde A e B são leiloeiros e C realiza o papel de participante em relação a A e B e o papel de leiloeiro em relação a D e E. Estes últimos apenas exercem o papel de participante.

Na Figura 26a, C recebe os CFPs de A e B e repassa este anúncio para D e E na forma de um leilão. Neste momento, A, B e C são leiloeiros. Na Figura 26b, D e E enviam as propostas para C, sendo que D apresenta melhor lance (i.e. melhor custo que é igual a 5). C seleciona o melhor lance (PROPOSE 5) e repassa este lance aos leiloeiros A e B. Na Figura 26c, A envia um REQUEST para confirmar a negociação com C. Por sua vez, C confirma com D. Neste momento, como o recurso de D ainda não foi alocado, uma mensagem de AGREE é enviada por D e propagada por C. Porém, o problema ocorre na situação representada na Figura 26d. Nesta, o leiloeiro B comunica com C a fim de confirmar a negociação, mas o recurso de D não está mais disponível. Desta forma, D responde com REFUSE a C. Quando E é questionado por C, este responde com AGREE, mas o seu lance é incompatível com o de D por causa da diferença de custos. Assim, C envia um REJECT para B, pois o protocolo não permite que C ofereça a B uma nova proposta (i.e. os serviços de E).

Assim, este esquema mostra a ineficiência do protocolo, uma vez que uma alocação satisfatória poderia consistir na atribuição da tarefa de B para o participante E.

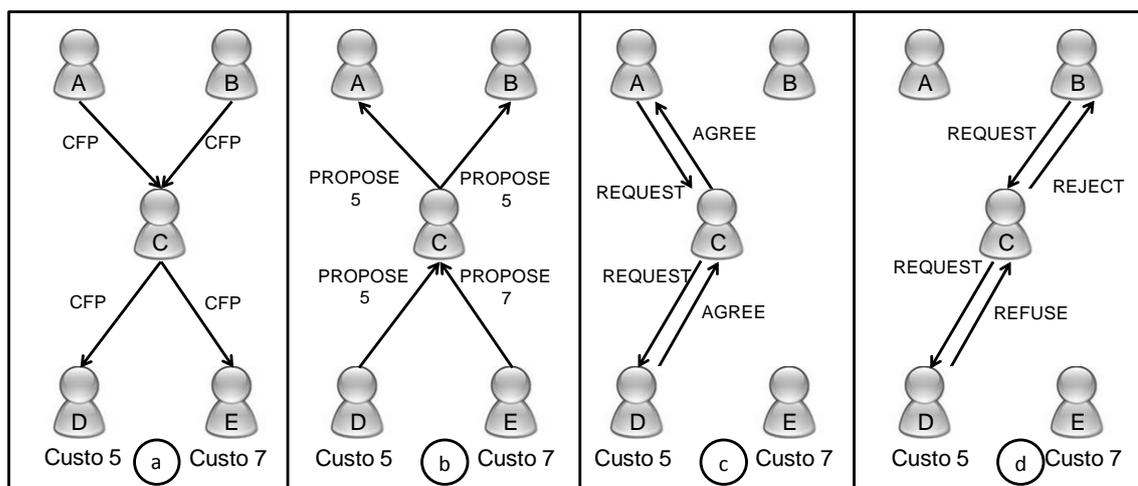


Figura 26 – Negociação em Cascata

O segundo protocolo proposto por Knabe, Schillo et al. (2002) se propõem a resolver este problema. Este protocolo é denominado de Protocolo Contract-Net Holônico com Confirmação. O termo holônico é usado para se referir a estruturas de negociação em cascata, uma vez que um hólón consiste em um agente composto por muitos outros agentes (subholons) e interage com agentes externos na forma de um único agente, representando os seus agentes internos e também mantendo comunicação com estes (KOESTLER, 1971). O protocolo em questão é esquematizado na Figura 25b, sendo que este se diferencia do anterior por permitir o envio de um segundo lance (PROPOSE) após o recebimento da mensagem de confirmação (REQUEST). Com isso, referindo-se ao exemplo da Figura 26, o agente C poderia realizar mais uma proposta para B incluindo os valores do agente E. Se o leiloeiro B aceitasse os novos custos, a sua tarefa seria alocada para execução pelo agente E.

Apesar destes dois protocolos apresentarem um grande avanço em relação ao CNet, estes ainda apresentam certas inconveniências que prejudicam sua eficiência quando a intenção é encontrar alocações de maior qualidade. Devido ao sequenciamento do envio das mensagens de REQUEST, um participante vencedor pode intencionalmente demorar no envio da confirmação ao leiloeiro por desejar esperar respostas de outros leiloeiros com quem negocia simultaneamente. Porém, tais leiloeiros podem demorar a responder por que ainda estão aguardando a confirmação de seus respectivos participantes vencedores. Para solucionar este problema, uma alternativa seria determinar um *deadline* para cada participante vencedor responder ao seu respectivo leiloeiro. Assim, com a expiração do *deadline*, cada leiloeiro receberia a confirmação do participante vencedor e avisaria aos demais participantes

sobre a rejeição de seus lances. Caso um participante se negue a executar a tarefa, o leiloeiro notificaria outro participante mais apropriado. Entretanto, esta prática pode não funcionar corretamente, pois os participantes podem receber tais notificações após a expiração de seus *deadlines*, ou seja, após eles já terem tomado a decisão.

Em Schillo, Kray et al. (2002), a mesma equipe de pesquisa apresenta uma abordagem estatística para determinar, para uma dada quantidade de lances, a probabilidade de um participante adquirir mais tarefas do que a disponibilidade de recursos para resolvê-las. Para calcular tais valores probabilísticos, o participante considera que os demais participantes fazem uso da mesma estratégia de submissão de lances, ou seja, que também apresentam a intenção de enviar o mesmo número de lances. Esta consideração se faz necessária porque o valor de probabilidade depende das ações dos outros participantes. Com este cálculo, o participante pode definir com maior segurança a quantidade de leilões que participará, assumindo um limiar de risco previamente conhecido. Por influenciar somente nas decisões do participante, esta extensão ao CNet não demanda alteração na estrutura do protocolo, sendo indicado, portanto, a situações em que não há oportunidade de alteração da estrutura do CNet. Em termos de resultado, por ser baseado em métodos probabilísticos, não considera todas as possibilidades de negócio, podendo ocorrer de acordos satisfatórios serem negligenciados.

Ademais, tanto nesta extensão estatística como também nos dois protocolos propostos em Knabe, Schillo et al. (2002), os acordos entre os agentes são persistidos definitivamente. Por conta disto, se faz necessário que as tomadas de decisão sejam muito bem formadas, uma vez que os acordos não podem ser cancelados. Na literatura, há algumas propostas de protocolos que buscam minimizar a responsabilidade na tomada de decisão dos agentes, permitindo que estes tenham maiores oportunidades para avaliar certos acordos antes de tomar a decisão final ou mesmo desistir de acordos quando estes não são mais interessantes.

Um dos trabalhos mais significantes em relação a esta questão é o realizado por Aknine, Pinson et al.(2004). Os autores propõem uma extensão ao CNet composto por interações provisórias e definitivas. Durante as negociações provisórias, os participantes disputam as tarefas ofertadas interativamente por meio da variação dos valores dos lances, fazendo com que várias combinações de alocações sejam testadas. Quando o participante reconhece a formação de um acordo satisfatório, ele pode transferir este acordo do estado provisório para o definitivo. Com esta dinâmica, o protocolo permite que os participantes

atuem efetivamente em várias negociações simultâneas, reduzindo significativamente a necessidade de cancelamentos de contratos.

As diretivas do protocolo proposto por Aknine, Pinson et al.(2004) são apresentadas por meio de um diagrama de sequência na Figura 27. Nesta esquematização, notam-se certas diferenças em termos de quantidade de mensagens e principalmente na nomenclatura das performativas em relação ao CNet padrão.

Basicamente, o protocolo tem início com o envio do CFP pelo leiloeiro aos participantes interessados. Ao receberem o CFP, os participantes enviam lances provisórios (PRE-BID) ao leiloeiro. Por sua vez, o leiloeiro seleciona o melhor lance e envia uma resposta de aceitação temporária para o vencedor (PRE-ACCEPT) e uma resposta de rejeição para os demais (PRE-REJECT). O receptor da mensagem PRE-ACCEPT pode enviar uma mensagem de DEFINITIVE-BID caso tenha certeza sobre o fechamento da negociação. Por outro lado, os receptores da mensagem PRE-REJECT podem submeter um novo lance para o mesmo leiloeiro, tanto que seja maior do que o anterior. Estes participantes apenas não poderão enviar um novo lance quando receberem um DEFINITIVE-REJECT do leiloeiro.

Quando um leiloeiro recebe um DEFINITIVE-BID, este compara o atual lance vencedor com os lances recebidos por meio das mensagens PRE-BID de atualização dos demais participantes. Se um destes PRE-BIDs apresentar valor maior do que o valor referente ao agente que enviou o DEFINITIVE-BID, uma nova mensagem de PRE-ACCEPT é enviada ao participante atualmente dono do melhor lance e mensagens PRE-REJECT para os demais. Caso contrário, uma mensagem de DEFINITIVE-ACCEPT é enviada ao atual vencedor e mensagens de DEFINITIVE-REJECT aos demais participantes. O participante que recebe a mensagem de DEFINITIVE-ACCEPT fica responsável pela execução da tarefa. Quando este agente terminar a execução da tarefa, ele retorna o resultado ao leiloeiro por meio da mensagem RESULT.

Neste protocolo, os participantes praticamente não apresentam a intenção de cancelar um contrato, uma vez que estes tiveram muitas oportunidades de negociação para concluir sobre a atribuição de uma tarefa. Como se pode perceber no diagrama de sequência do protocolo, não há mensagens disponíveis que permitam aos participantes recusar uma tarefa ou cancelar um contrato. Por conta disto, um participante apenas pode expressar seu desinteresse por uma tarefa por meio da redução do valor do seu lance. Isto pode ocorrer, por exemplo, quando um participante percebe melhores oportunidades de negociação com outros

leiloeiros. Esta é uma vantagem do protocolo, uma vez que o cancelamento de um contrato pode gerar altos custos computacionais devido à realização de novos leilões.

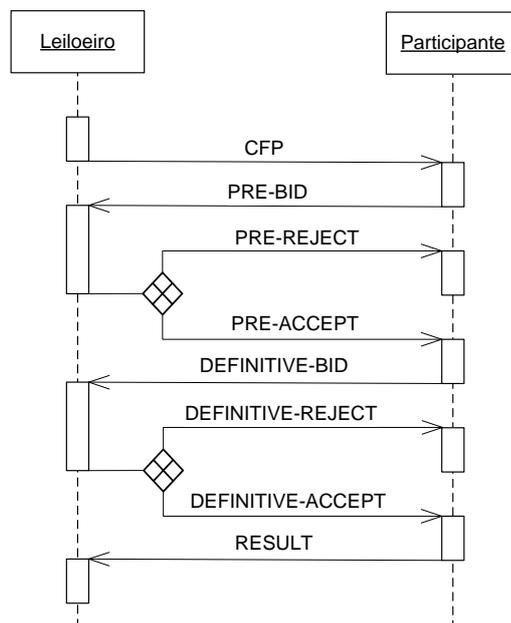


Figura 27 – Extensão ao Contract-Net com Negociações Temporárias e Definitivas

Porém, esta vantagem se torna uma deficiência quando o protocolo é aplicado a problemas de atribuição de itens de produtos. Nestes problemas, mesmo que um acordo seja fechado precavidamente, não há como garantir que este acordo será sempre vantajoso em virtude dos acontecimentos futuros. Como o recurso não é consumível durante um leilão, algumas novas oportunidades de aquisição para o mesmo item podem ocorrer em negociações futuras.

Por conta disto, o trabalho de Sandholm and Lesser (1995) apresenta uma extensão ao CNet que permite aos agentes cancelarem contratos. Porém, esta extensão não se adapta perfeitamente a ambientes cooperativos, uma vez que exige que os agentes paguem uma multa cada vez que desejarem cancelar um contrato ou alterar alguns atributos do acordo. Em ambientes cooperativos, o pagamento de multas não é necessário porque a iniciativa de um agente em cancelar ou alterar um contrato é sempre aceita pela outra parte, uma vez que tal atitude tem como objetivo majorar o bem-estar de todo o grupo. Também, nestes ambientes, a cobrança de multas não é viável porque desestimula a execução de tarefas de forma voluntária pelos agentes.

De qualquer forma, em ambientes competitivos, o pagamento de multa permite um agente recompensar a outra parte pelo esforço despendido ou prejuízos causados com a quebra de um contrato. O valor desta multa é difícil de ser determinado, mas é especificado no momento do envio do anúncio. No anúncio, além da descrição da tarefa a ser executada,

constam as informações do preço que o leiloeiro está disposto a pagar pela execução da tarefa e os valores da multa a serem pagas quando o leiloeiro quebrar o contrato ou quando esta iniciativa surgir por parte do participante. Assim, se o valor de multa definido for muito alto, os participantes agirão de forma mais cautelosa em relação a este leilão, pois tal acordo poderá inviabilizar uma quebra de contrato caso surja futuramente uma melhor oportunidade de negócio.

Para um participante, uma melhor oportunidade ocorre quando outro leiloeiro oferece uma tarefa por um dado preço, que somado ao valor da multa a ser paga para a quebra do contrato atual, ainda se torna lucrativa para o participante. Da mesma forma, em relação ao leiloeiro, uma melhor oportunidade ocorre quando um participante oferece um lance com um custo mais baixo do que o atual lance vencedor, sendo que tal valor somado ao valor da multa pela quebra do contrato ainda é mais vantajoso para o leiloeiro. Ademais, uma oportunidade pode se tornar ainda mais vantajosa para um agente quando ele age estrategicamente. Como exemplo, um agente com a intenção de cancelar um contrato pode aguardar ociosamente por um tempo máximo possível, a fim de não perder a outra negociação, para dar oportunidade para que a outra parte tome a iniciativa para o cancelamento. Se isto ocorrer, além de não precisar pagar a multa, o agente ainda recebe a multa paga pela outra parte.

Em relação à estrutura do protocolo proposto pelos autores, este não altera a estrutura do CNet significativamente, uma vez que as negociações são separadas em três fases distintas. Na primeira fase, os agentes negociam conforme o CNet a fim de gerar contratos. Na segunda fase, os agentes acumulam as ofertas de outros agentes em negociações realizadas simultaneamente. Na terceira fase, os agentes decidem sobre a continuação nos contratos correntes ou por cancelamentos de alguns contratos. Estas fases são executadas ciclicamente até que todos os agentes estejam satisfeitos.

Mais tarde, vários outros trabalhos propuseram novas extensões baseadas no conceito de quebra de contratos com pagamentos de multas. Como exemplo, pode-se citar o trabalho de Excelente-Toledo e Bourne et al. (2001), que propõe o uso do custo despendido pelo agente no processo de negociação para a composição do valor da multa a ser paga na quebra de um contrato.

No trabalho realizado por Vokřínek, Bíba et al. (2007), os autores propõem um protocolo chamado de CNet Competitivo (CCNet) que faz uso de negociações iterativas a fim de definir o valor da multa a ser paga na quebra de um contrato. Além disso, o protocolo dá oportunidade para que um agente envolvido em um acordo concretizado rejeite uma

solicitação de cancelamento de contrato advinda da outra parte do acordo quando estes não entram em um consenso sobre o valor da multa. Neste protocolo, a iniciativa para a quebra de contrato pode surgir tanto por parte do leiloeiro quanto por parte do participante.

Diferentemente do protocolo proposto em (SANDHOLM, T. W., 2001), o CCNet altera o CNet por meio da adição de novas mensagens e performativas de comunicação. O protocolo também é separado em três fases: a) fase de formação de contratos, b) fase opcional de cancelamentos de contratos e c) fase de execução das tarefas ou finalização. A fase de formação de contratos é apresentada na forma de um diagrama de sequência na Figura 28a e as fases de cancelamentos de contrato e finalização de leilões são agrupadas em um único diagrama de sequência apresentado na Figura 28b.

Na fase formação de contratos, o leiloeiro naturalmente inicia um leilão por meio do envio de um CFP a um conjunto de participantes. Cada participante recebe o anúncio e envia um PROPOSE ou REFUSE. Ainda nesta etapa, um participante também tem a possibilidade de participar de um leilão por meio do envio de um lance sem ter recebido o CFP enviado pelo leiloeiro. Este participante é notificado sobre o leilão por meio de outros agentes e obtém as informações pertinentes sobre o anúncio com tais agentes para poder enviar o lance.

Ao receber os lances, o leiloeiro pode agir de forma mais iterativa com os participantes para negociar os valores dos lances, caso alguns destes valores não estejam em consonância com o esperado pelo leiloeiro. O leiloeiro não precisa aguardar o recebimento de todos os lances para iniciar tais negociações. Ele pode tratar os lances de forma independente, ou seja, enquanto está aguardando o recebimento de lances de alguns participantes, o leiloeiro pode entrar em negociação iterativa com um ou mais participantes que tiveram seus lances recebidos.

Nesta negociação, o leiloeiro pode não concordar com um ou mais atributos do lance e enviar uma mensagem de COUNTER-PROPOSAL a fim de convencer o participante a realizar as alterações devidas. O participante pode concordar com a solicitação quando retorna ao leiloeiro uma mensagem de AGREE ou então pode oferecer outra proposta ao leiloeiro (mensagem PROPOSE) que ainda não corresponde completamente ao solicitado. Neste caso, ambos entram em um ciclo de negociação até o momento em que o leiloeiro decide enviar uma mensagem de REJECT-PROPOSAL ou ACCEPT-PROPOSAL para tal participante. Neste protocolo, um contrato é formado quando o leiloeiro envia uma mensagem de ACCEPT-PROPOSAL ao participante. Em uma visão mais macro, esta fase de formação de

contratos é finalizada quando todos os participantes recebem mensagens de REJECT-PROPOSAL ou de ACCEPT-PROPOSAL.

Na fase opcional de cancelamentos de contratos, os leiloeiros e participantes podem propor quebras de contratos quando não estão satisfeitos com certas condições ou apresentam melhores oportunidades com outros agentes. Nesta fase, outro processo de negociação iterativo é realizado, mas desta vez, este processo é utilizado para que os agentes negociem os valores das multas ou penalidades a serem pagas.

Mais precisamente, a fase tem início quando um leiloeiro ou participante enviam mensagens de DECOMMIT para cancelar um contrato. O envio do DECOMMIT ocorre após um leiloeiro ter enviado um ACCEPT-PROPOSAL ou o participante ter recebido este tipo de mensagem e logicamente, antes que o participante tenha executado a tarefa. Se um agente recebe uma mensagem de DECOMMIT, este tem a opção de recusar tal solicitação por meio do envio de uma mensagem de REFUSE ou então negociar com o agente solicitante o valor da penalidade por meio de um processo iterativo de negociação.

Neste processo, o agente solicitado pode propor o valor da multa por meio da mensagem PROPOSE-PENALTY. Por sua vez, o agente solicitante tem três opções ao receber este tipo de mensagem: a) ele pode concordar com o valor retornando uma mensagem de AGREE, b) desistir do cancelamento do acordo informando a outra parte por meio de uma mensagem de TAKE-BACK ou c) então entrar na negociação para melhorar o valor da multa enviando uma contraproposta através da mensagem COUNTER-PROPOSE-PENALTY. Esta negociação é finalizada em duas situações: a) quando o agente solicitante do processo concorda com o valor da penalidade (AGREE) ou b) quando o agente solicitado concorda com tal valor, havendo assim a confirmação da quebra de contrato por meio da mensagem CONFIRM. Neste processo, o uso das mensagens TAKE-BACK e REFUSE permite que a solicitação de cancelamento de contrato seja abortada e que as negociações para a execução da tarefa continuem normalmente na terceira fase do protocolo.

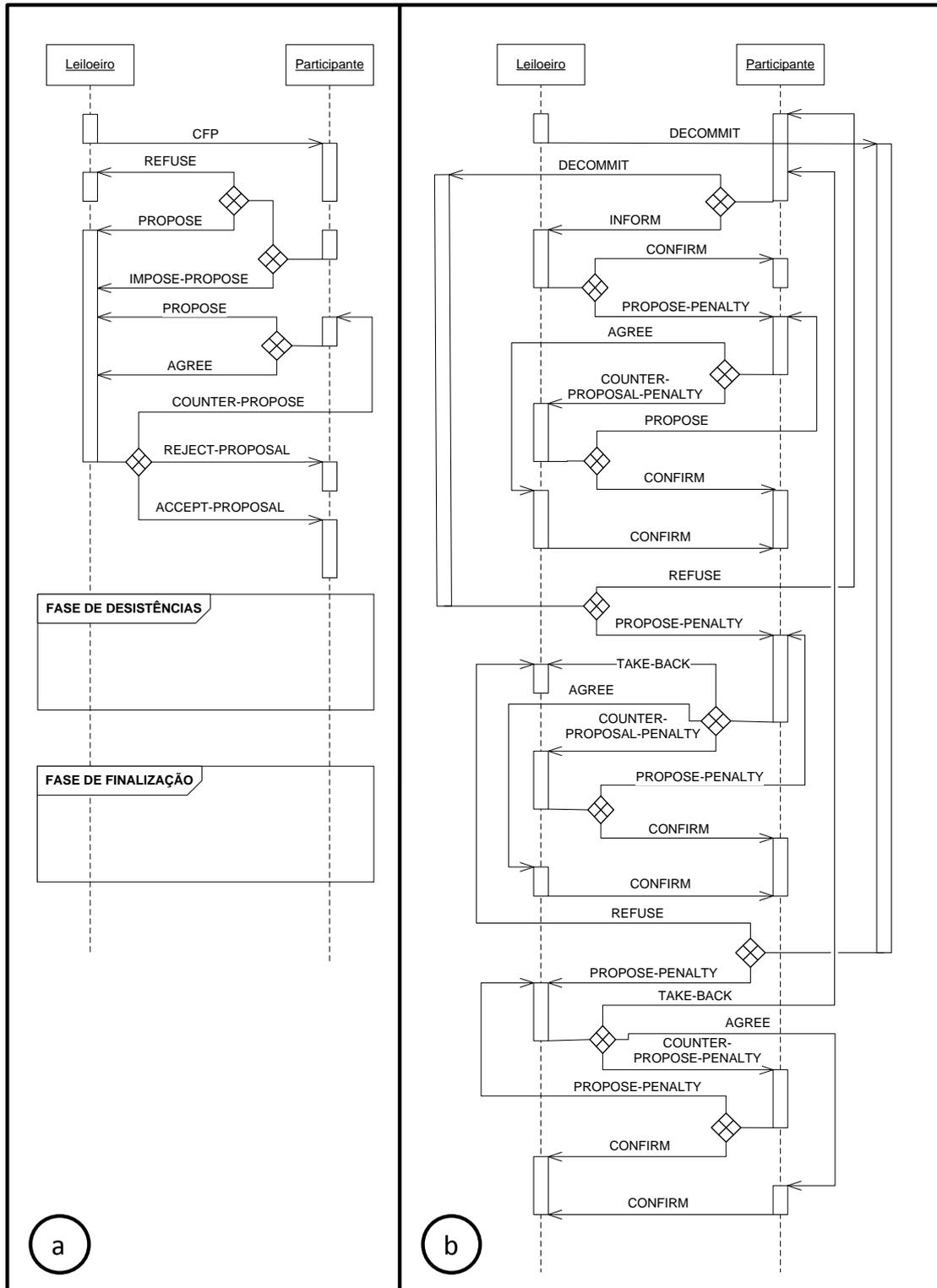


Figura 28 – Protocolo Contract-Net Competitivo. a) Protocolo da Fase de Formação de Contratos. b) Protocolo das Fases de Cancelamento de Acordos e Finalização.

A fase de execução de tarefas ou finalização consiste basicamente na fase de confirmação do CNet incrementada com uma política de avaliação da qualidade do serviço executado. Nesta fase, o participante executa a tarefa e retorna uma mensagem de FAILURE em caso de falha na execução da tarefa ou então envia uma mensagem de INFORM para

informar os resultados da execução. Ao receber um INFORM, o leiloeiro avalia o resultado da execução para conferir se a tarefa foi executada corretamente tal como referido no acordo entre as partes. Caso as condições do acordo tenham sido respeitadas, o leiloeiro envia uma mensagem de CONFIRM para o participante para sinalizar o fim das obrigações do contrato. Caso contrário, o leiloeiro entra em um processo iterativo de negociação com o participante para definir o valor da multa a ser paga pelo participante pelo não cumprimento adequado do acordo. Este processo de negociação ocorre similarmente como o descrito anteriormente, com exceção ao uso das mensagens de TAKE-BACK e REFUSE que não fazem sentido neste estágio da negociação.

3.5.2.3 Reflexões

As extensões apresentadas buscam sanar as principais deficiências do CNet convencional em ambientes cooperativos e competitivos. O interesse deste trabalho de tese está em protocolos cooperativos. Uma das características destas extensões é o uso de negociações mais iterativas entre os agentes para melhor definir os atributos do acordo (i.e. negociação para determinar o preço ou penalidades) ou para melhor selecionar o próprio acordo (i.e. alocações temporárias e cancelamentos de acordo). Apesar de estas práticas serem efetivas para muitos casos, iterações demasiadas podem aumentar significativamente o tempo de execução do protocolo, principalmente quando aplicado a cenários compostos por muitos agentes. Em alguns problemas, tal como o abordado no corrente trabalho, um dos requisitos é o baixo tempo de processamento.

No entanto, estas negociações são cruciais para aumentar a qualidade dos resultados em problemas de alocação de tarefas ou de produtos quando há vários leiloeiros. Porém, as propostas de extensões priorizam o problema de alocação de tarefas, sendo que este se difere pontualmente do problema de atribuição de recursos, tal como o PPTDP. Neste sentido, uma dificuldade não abordada pelas propostas consiste na possibilidade de desistências após o término de um leilão. Isto ocorre porque em problemas de alocação de tarefas não há o interesse em cancelar um acordo após o fechamento de um leilão, uma vez que neste momento a tarefa já foi executada. Porém, em problemas de atribuição de produtos, o produto (não consumível) continua disponível com o fechamento de um leilão, podendo ser devolvido a sua origem a qualquer momento por meio de uma quebra de contrato. Desta forma, ainda há a necessidade de extensões para adaptar tais protocolos a problemas de atribuição de produtos em ambientes cooperativos.

Ademais, nas extensões apresentadas, os valores de lances geralmente consistem em um único valor numérico (e.g. utilidade ou preço) ou então em um conjunto de atributos que é transformado em um único valor numérico por meio de uma equação normalmente ponderada. Este valor é considerado como um objeto de otimização. Esta prática é viável em problemas em que os atributos dos lances não fazem menção às restrições do problema. Porém, em situações em que os atributos dos lances são compostos por valores de otimização e valores que definem penalidades por desrespeito a restrições, esta prática pode não ser tão vantajosa, uma vez que é difícil definir os pesos de maneira equilibrada para que uma classe de atributos não domine totalmente a outra, principalmente quando algumas pequenas relaxações são permitidas às restrições.

Esta situação ocorre no PPTDP. Por exemplo, um atributo de otimização correspondente ao custo de uma movimentação pode dominar outro atributo de restrição responsável pela satisfação dos níveis de estoque. Assim, uma movimentação de custo muito baixo pode ser aceita mesmo que desrespeite uma restrição (que leva uma base a ficar sem produto por um intervalo de dias) ao mesmo tempo em que há outras opções de movimentação com custos mais elevados e que respeitam tal restrição. Se por acaso for dado um maior peso para forçar a satisfação das restrições, pode ocorrer das movimentações nem sempre serem as mais lucrativas. Neste caso, se fazem necessários artifícios que permitam a satisfação de tais restrições ao mesmo tempo em que busca diminuir os custos das movimentações.

Desta forma, este documento de tese se propõe a apresentar um novo protocolo de iteração para melhor atender as particularidades do problema de planejamento em questão. O protocolo é proposto com a intenção de encontrar uma solução factível em tempo hábil para qualquer classe de produtos na malha multimodal brasileira.

3.5.3 Aplicação do Protocolo Contract-Net na Indústria do Petróleo

Apesar de haver várias aplicações do CNet em problemas de cadeias de suprimentos (DAVIDSSON et al., 2008; LOU et al., 2004; TA; CHAI; LIU, 2005), são raros os trabalhos que aplicam tal mecanismo em problemas da indústria petrolífera. Em uma pesquisa bibliográfica, foram encontrados apenas dois trabalhos que aplicam o CNet neste domínio de problema. Estes trabalhos são respectivamente de autoria de Tian, Foley et al. (2006) e Brito (2008). Um fato interessante é que, apesar da complexidade deste domínio de problema,

ambos os trabalhos fazem uso apenas do CNet convencional, não se beneficiando das melhorias propostas nas versões estendidas.

O trabalho Tian, Foley et al. (2006) consiste na aplicação do CNet na cadeia petrolífera chinesa. O protocolo é aplicado para definir movimentações de petróleo bruto ou derivados de petróleo conjuntamente nos três segmentos da cadeia (i.e. *downstream*, *midstream* e *upstream*) chinesa, com possibilidades de movimentação com o exterior. O cenário em que se aplica é formado por um mercado semimonopolizado, sendo este constituído por três empresas nacionais que atuam nos mesmos segmentos, mas em regiões diferentes da China. Este cenário é formado por entidades reais referentes aos consumidores finais, centros de distribuição, refinarias e pontos de extração de petróleo. Estas entidades se comunicam em tempo real para atender demandas inesperadas dos consumidores, as quais surgem em forma de ordem de pedido e apresentam certa quantidade e data máxima para entrega de um dado produto.

Em termos práticos, cada entidade real da cadeia petrolífera é representada por um agente. Estes agentes são agrupados pelos tipos de atividades (e.g. extração, refinamento) que exercem e pela empresa que representam. Assim, as interações ocorrem simultaneamente entre estes grupos de agentes a fim de atender as demandas de produtos. Nestas interações, o protocolo CNet é empregado na definição dos agentes que formarão os contratos e dos valores dos atributos destes contratos.

A interação entre as partes ocorre em forma de cascata ou cadeia de solicitações. A interação tem início com a solicitação de uma quantia de um dado produto por um consumidor final aos centros de distribuição, que por sua vez, podem propagar esta solicitação às refinarias e estas por fim, aos pontos de extração. Nesta interação, sempre o demandante realiza o papel do leiloeiro e o fornecedor realiza o papel do participante. Entretanto, esta interação ocorre por meio da priorização de certos grupos, primeiramente um agente prioriza o recebimento ou envio de produtos aos agentes da mesma companhia, para depois negociar com outras companhias nacionais e por último com o exterior.

Em termos do CNet, o CFP é formado basicamente pelo tipo de produto desejado, o volume desejado e a data máxima de entrega deste volume. O leiloeiro envia o CFP exclusivamente aos participantes que representam as bases sobre o domínio da mesma empresa em que atua. Tais participantes calculam o valor do lance considerando vários fatores, tais como os custos de transporte, armazenamento, refinamento, grau de parceria com o leiloeiro e enviam os lances informando, cada qual, a provável data de entrega.

O leiloeiro aguarda os lances de acordo com um *deadline* pré-estabelecido. Caso o leiloeiro não receba propostas após o término do *deadline*, ele iniciará um novo leilão com o mesmo anúncio, mas enviará tal anúncio apenas para os participantes dentro do território chinês que não compõem a mesma organização. Se ainda não obtiver sucesso, o anúncio será enviado para agentes representativos das bases localizadas no exterior.

Porém, caso o leiloeiro tenha recebido propostas, ele age de forma rígida na seleção da parte contratada. O leiloeiro apenas considera os lances que satisfazem estritamente as restrições especificadas no anúncio. Por exemplo, se um participante oferece um lance que não respeita a data máxima de entrega, tal lance é prontamente rejeitado pelo leiloeiro. Em relação ao volume de um produto, caso este seja menor do que o solicitado, o leiloeiro não rejeita a proposta, mas remete a decisão para o profissional especialista usuário do sistema. Todavia, quando os lances respeitam as restrições ou passam pela análise do especialista, o leiloeiro seleciona o lance vencedor que oferece o menor preço.

Na sequência, o participante vencedor recebe a notificação sobre a vitória no leilão e então pode decidir pela concretização do acordo com tal leiloeiro ou com outros leiloeiros que também lhe enviaram tal notificação na rodada corrente. O participante seleciona o leiloeiro mais vantajoso por meio da avaliação dos custos de movimentação, certamente, priorizando o leiloeiro que apresenta menor custo. Antes de enviar a confirmação de acordo, o participante realiza a atualização de seu estoque por meio da remoção do volume a ser escoado. Da mesma forma, quando o leiloeiro recebe a confirmação, ele atualiza o seu estoque por meio do incremento do volume recebido. Caso a demanda do leiloeiro ainda não tenha sido completamente atendida, este dará início a outro leilão para movimentar apenas o volume faltante. Um leiloeiro somente se torna satisfeito quando a sua demanda for completamente atendida.

De modo geral, a solução apresentada possui algumas limitações decorrentes do uso da versão do CNet convencional, a qual afeta a qualidade da solução nestes tipos de problema. Como exemplo, a falta de conhecimento sobre todas as oportunidades de negócio pode levar o leiloeiro a perder, com certa frequência, boas oportunidades de movimentação de produtos. Também, mesmo que os autores afirmem que a versão do protocolo empregada consiste em uma extensão do CNet, esta versão apenas inclui novos comportamentos de negociação (i.e. decisão por preço e grau de parceria) e múltiplas rodadas, não alterando a estrutura do protocolo.

Assim, como já discutido, uma das limitações principais refere-se a negociações concorrentes. Neste problema de atribuição de itens, quando o leiloeiro envia um ACCEPT-PROPOSAL para um participante, ele automaticamente manda REJECT-PROPOSAL para os demais participantes na mesma rodada. Portanto, caso o participante vencedor não aceite fechar o acordo, o leiloeiro abrirá um novo leilão na rodada seguinte. Porém, os participantes que receberam REJECT-PROPOSAL podem ter fechado contrato com outros leiloeiros durante a rodada, não apresentando assim, recursos disponíveis ou interesse para participar novamente do leilão.

Outra limitação refere-se à direção das negociações em cadeia, sendo que estas são sempre iniciadas pelos agentes demandantes. Mesmo que a intenção desta estratégia seja atender a demanda, tal forma de negociação não contempla situações de excesso de produção das bases. Nesta abordagem, estas bases não têm oportunidades para escoar o volume que excede a capacidade de armazenamento. Porém, esta limitação não afeta a solução do problema, uma vez que as capacidades de armazenamento não são consideradas. Da mesma forma, o trabalho não considera as capacidades de transporte, e conseqüentemente, a possibilidade de compartilhamento de modais por diferentes rotas. Estas restrições aumentam significativamente a complexidade do problema e exigem novos artifícios adicionados ao protocolo para a obtenção de soluções mais satisfatórias.

Apesar das similaridades com o PPTDP, o problema apresentado não consiste em um problema de planejamento por ocorrer em tempo real. Diferentemente, o trabalho de Brito (2008) contempla um problema de planejamento na indústria petrolífera, um planejamento operacional diário no segmento *upstream*. Este trabalho realiza o planejamento de atracação de navios carregados de vários tipos de petróleo cru em píeres para conseqüente descarregamento do volume em tanques de um terminal aquaviário e posterior envio para uma refinaria por meio de uma malha particular de dutos. Os produtos são categorizados em grupos de produtos e apenas são enviados à refinaria após um período de 24 horas em que devem ser mantidos nos tanques para decantação. No processo de decantação, o petróleo se separa da salmoura permitindo seu envio por meio de dutos.

Por se tratar de um planejamento operacional, o trabalho considera cada entidade real (i.e. navio, píer, tanque, refinaria e duto) do problema como sendo um agente. Estes agentes cooperam por meio do CNet convencional aplicado em cascata a fim de alocar os navios aos píeres de forma mais satisfatória, ou seja, com redução dos custos e tempo de descarregamento. Ademais, os agentes cooperam para manter um nível de estoque adequado

de cada produto na refinaria, uma vez que uma refinaria não deve parar suas operações por falta de produtos.

Na resolução deste problema, cada entidade apresenta um conjunto de restrições a ser respeitada. Entre as principais restrições: a) cada navio apresenta uma hora prevista para atracação e desatracação; b) cada píer somente pode receber navios com certas dimensões de calado; c) cada tanque apresenta limites mínimos e máximos de armazenamento que são dados por grupos de produtos; d) cada duto apresenta uma vazão única para qualquer tipo de óleo e, e) cada refinaria também apresenta um limite mínimo e máximo de armazenamento.

O CNet é utilizado em um processo de planejamento por meio de simulação. Neste processo, as negociações são iniciadas apenas quando um evento simulado ocorre, o qual consiste na chegada (simulada) de um navio na área de atracação. Em termos práticos, o navio inicia um leilão e envia um CFP para todos os píeres informando a sua hora prevista para atracação e desatracação, o tipo de produto e quantidade que pretende descarregar. Cada píer recebe o CFP e inicia um segundo leilão enviando outro CFP para os tanques a fim de selecionar aquele com maior capacidade e melhor custo. Os tanques enviam seus lances para os píeres. Cada píer analisa os lances e seleciona um ou mais tanques para armazenar toda a carga do navio e então envia o lance para o leiloeiro navio. O navio avalia os lances de todos os píeres e escolhe o vitorioso, sendo que um navio deve atracar apenas em um único píer durante a sua estadia. Assim, o navio manda a confirmação da negociação para o píer e este também encaminha a confirmação para o(s) tanque(s).

Após o tanque atualizar seu estoque, este verifica se já alcançou um nível adequado de estoque para iniciar o processo de decantação. Em caso positivo, ele agenda a decantação e inicia um terceiro leilão. Neste leilão, o tanque no papel de leiloeiro envia um CFP para os dutos informando a quantidade do produto disponível para escoamento. Cada oleoduto recebe o CFP e prontamente se comunica com a refinaria requisitando sua agenda de produção e com base nesta, elabora o lance e envia ao tanque. Por sua vez, o tanque recebe os lances e seleciona o mais vantajoso, enviando uma mensagem de aceite ao duto vencedor. Com isso, o produto é movimentado para a refinaria.

Em conclusão, o trabalho apresentado possui as mesmas limitações do trabalho de Tian, Foley et al. (2006) por ser baseado no CNet convencional. Ademais, o trabalho apresenta uma limitação adicional referente à sequencialidade das negociações. Esta prática torna a solução dependente da ordem de chegada dos navios. Assim, um píer pode alocar um navio em um dado leilão e descobrir melhores oportunidades em leilões seguintes.

3.6 IMPLEMENTAÇÃO DE AGENTES

Esta seção apresenta com brevidade a forma como os SMA são implementados computacionalmente. Geralmente, os SMAs são implementados sobre uma infraestrutura pré-definida que fornece os serviços básicos necessários para a execução dos agentes. Esta infraestrutura é chamada de plataforma de agentes. Atualmente, há muitas plataformas de código aberto ou comerciais disponibilizadas para uso. As mais difundidas seguem a especificação FIPA (FOUNDATION FOR INTELLIGENT PHYSICAL AGENTS, 2011).

Uma plataforma é dita compatível com a especificação FIPA quando assume a estrutura apresentada na Figura 29. Basicamente, esta estrutura é composta por três módulos principais: o Sistema Gerenciador de Agentes (SGA), o Diretório Facilitador (DF) e o Sistema de Transporte de Mensagens (STM). O SGA exerce o papel de gerenciamento principal na plataforma, sendo responsável, principalmente, pela criação e deleção de agentes e pela atribuição de um identificador a cada agente para que estes sejam facilmente identificados durante as comunicações entre os mesmos. O DF representa os serviços de páginas amarelas no sistema, sendo responsável pelo registro e publicação de serviços disponibilizados pelos agentes. Por fim, o STM representa um canal de comunicação que permite transportar mensagens ACL, localmente ou remotamente, entre os agentes.

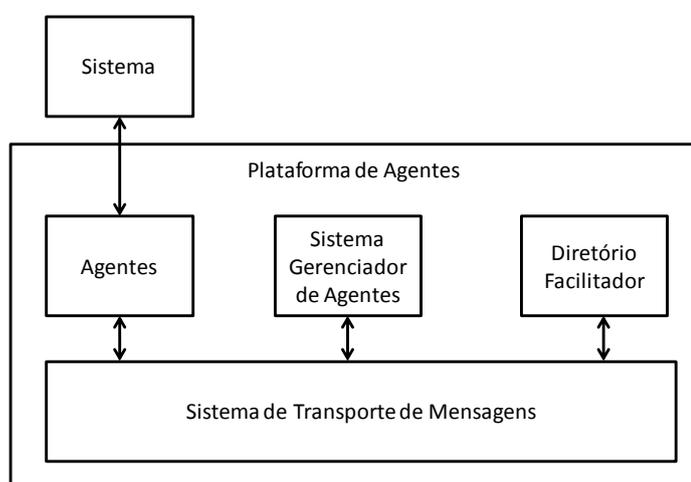


Figura 29 – Plataforma FIPA

Uma das implementações compatíveis com a especificação FIPA que apresenta maior impacto industrial é o JADE (*Java Agent DEvelopment Framework*) (BELLIFEMINE et al., 2007). O *framework* JADE oferece uma biblioteca de classes desenvolvidas em linguagem Java que facilita bastante o desenvolvimento de aplicações baseadas em agentes, principalmente por oferecer muitos protocolos de interação pré-implementados, inclusive o CNet e o CNet Iterativo. Este *framework* é distribuído pela Telecom Itália (TELECOM

ITALIA, 2011) sobre os termos da licença *Lesser General Public License* (LGPL), a qual permite o desenvolvimento de *software* proprietário para uso comercial. Ademais, o JADE é suportado por uma vasta documentação, uma lista de discussão ativa e disponibilização frequente de atualizações à plataforma.

Em JADE, a plataforma é formada por um ou mais containers. Cada container representa um ambiente virtual no qual reside um conjunto de agentes, sendo que um agente pode se comunicar com os agentes que residem no seu container ou também com outros que residem em diferentes containers. O conceito de container permite a execução de agentes em diferentes máquinas. Em termos computacionais, um container consiste em um processo e um agente consiste em um *thread* de execução (i.e. linha de execução).

Um agente JADE possui uma arquitetura previamente implementada que permite sua interação com o ambiente em que reside e também com outros agentes. O desenvolvedor precisa implementar como o agente atuará no ambiente ou em relação aos outros por meio da definição de ações ou atividades dos agentes. Em JADE, este conhecimento é implementado em forma de comportamentos. Um agente pode ter um ou vários comportamentos, sendo que geralmente apenas um comportamento é executado por vez. Em um exemplo simplista, a atividade de preparação e envio de um CFP por um leiloeiro consiste em um comportamento. Um comportamento é implementado na forma de uma simples classe Java, mas também pode ser tratado como um *thread*, permitindo que vários comportamentos executem concorrentemente.

O JADE também permite formar composições de comportamentos para facilitar a representação de situações mais complexas. Como exemplo, um comportamento pode ser representado por uma máquina de estados (i.e. *Finite State Machine* (FSM)), onde cada estado refere-se a um subcomportamento. O papel de leiloeiro e participante no CNet foram implementados com esta estrutura de comportamento. Nesta implementação, um subcomportamento apenas é executado após a ocorrência de um evento da negociação (i.e. recebimento de um CFP, envio do lance). O suporte deste tipo de comportamento também pode ser visto como uma vantagem do JADE, pois viabiliza a proposta de extensões ao protocolo CNet.

Desta forma, devido às vantagens apresentadas, o *framework* JADE foi adotado como base para implementação da solução multiagente proposta neste trabalho de tese. Com a intenção de avaliar de forma prática a viabilidade de aplicação desta plataforma em problemas de SCM, um SMA foi implementado para participar da competição *Trading Agent*

*Competition - Supply Chain Management (TAC-SCM)*¹¹. Esta atividade serviu para adquirir experiência com a plataforma e para validar a suas vantagens. A descrição deste sistema e resultados está descrito em (PEREIRA, F. R. et al., 2010).

3.7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este capítulo apresentou os principais conceitos que fundamentam este trabalho de doutorado. Primeiramente, o capítulo apresentou os conceitos de agentes e SMA, seguidos por uma analogia à estrutura de cadeias de suprimentos. O capítulo também apresentou mecanismos de negociação competitivos e cooperativos baseados em leilões, uma vez que esta forma de negociação facilita a representação da dinâmica do processo de planejamento realizado pelos especialistas na concepção de uma solução ao PPTDP.

Porém, como o ambiente de interesse é cooperativo, o protocolo CNet mereceu maior destaque. Este protocolo foi descrito e algumas deficiências foram apresentadas, que inviabilizam a aplicação efetiva em sua forma pura ao PPTDP. Assim, algumas extensões propostas pela literatura foram apresentadas, as quais sanam a maioria das deficiências do CNet, mas ainda permitem outros melhoramentos. Por fim, a plataforma JADE foi apresentada, evidenciando o suporte para o CNet e possibilidades de implementação de extensões. A plataforma JADE é adotada na implementação das soluções apresentadas neste trabalho.

¹¹ Esta competição simula uma cadeia de suprimentos relativa à compra de componentes, fabricação e vendas de computadores, onde os participantes da competição devem implementar um SMA responsável pela montagem de computadores.

4 MODELO MULTIAGENTE BASEADO EM UM PROTOCOLO DE LEILÕES SIMULTÂNEOS COM SEQUENCIAMENTO NO FECHAMENTO DE ACORDOS

Este capítulo apresenta um novo protocolo de leilões e um modelo multiagente concebido para resolver o PPTDP por meio das diretivas deste protocolo. O protocolo consiste em uma extensão ao CNet e foi proposto para atuar de forma mais efetiva em situações que exigem negociações simultâneas por produtos e recursos compartilhados. Portanto, o modelo faz uso do protocolo para coordenar as negociações entre os agentes representativos das entidades do PPTDP.

As particularidades do protocolo e do modelo multiagente são apresentadas nas seções seguintes. Mais precisamente, a seção 4.1 apresenta as interações e as principais características do protocolo proposto, a seção 4.2 apresenta as particularidades do modelo proposto e por fim, a seção 4.3 apresenta as considerações finais sobre o capítulo.

4.1 PROTOCOLO DE LEILÕES

O protocolo proposto permite uma nova dinâmica na execução de leilões simultâneos. Basicamente, as interações neste protocolo ocorrem entre três papéis: o leiloeiro, o participante e o gerente. Naturalmente, os papéis de leiloeiro e participante negociam por meio de leilões. Por sua vez, o papel de gerente tem a função de organizar estas negociações. Mais precisamente, o papel de gerente é responsável por definir quais entidades podem exercer o papel de leiloeiro e quando um leilão deve ser iniciado e finalizado por tais entidades.

Para que o gerente possa permitir o início dos leilões, ele precisa primeiramente receber candidaturas destas entidades ao papel de leiloeiro. Com isso, o gerente passa a conhecer quais são as entidades realmente interessadas em realizar os leilões. Então, o gerente seleciona estes candidatos e os notifica para que iniciem seus leilões. O gerente notifica os leiloeiros por meio de uma mensagem DO-AUCTION. O envio de tal mensagem dá início ao que é chamado de rodada de leilões. A Figura 30 apresenta a estrutura do protocolo com as principais interações entre as entidades envolvidas.

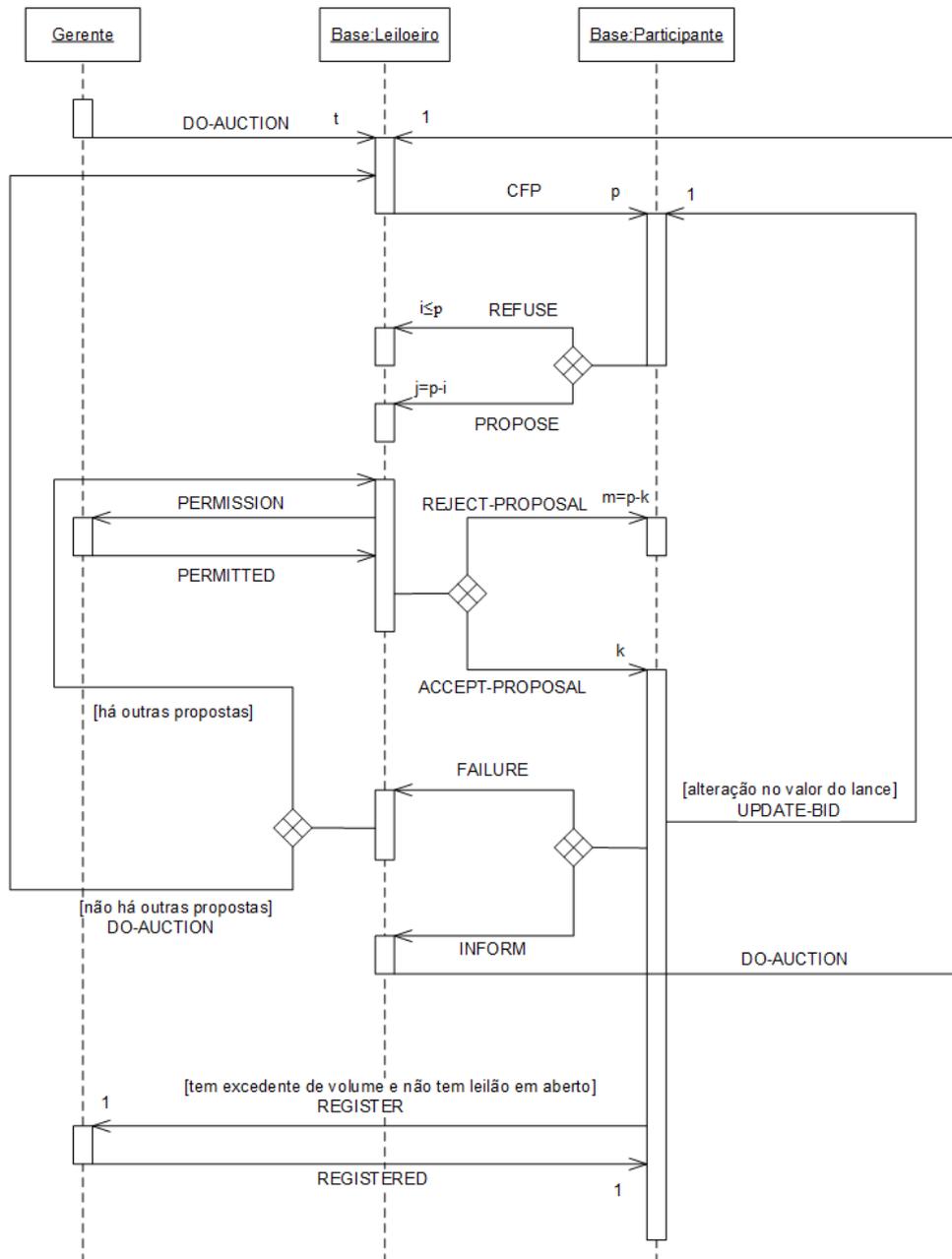


Figura 30 – Diagrama de Sequência do Protocolo Proposto

Tipicamente, um leilão é composto por duas fases: a fase de negociações e a fase de fechamento de acordos. No protocolo proposto, cada fase ocorre similarmente às diretivas do CNet. Porém, a principal diferença está na transição entre as fases. No protocolo proposto, a transição da fase de negociações para a fase de fechamento de acordos ocorre com a intermediação da entidade gerente. Neste caso, o gerente é o responsável por sequenciar os fechamentos de acordos nos leilões. Portanto, uma característica ímpar do protocolo proposto é a execução simultânea dos leilões e fechamento sequencial dos acordos.

A fase de sequenciamento dos fechamentos de acordos é de suma importância para resolver certos conflitos referentes ao uso de recursos compartilhados. Esta prática evita a realização de um leilão particular para cada recurso em situação de compartilhamento e, portanto, contribui para a redução do processamento computacional de uma solução. Esta prática contribui com a redução do número de leilões e conseqüentemente com a redução do tempo de execução do sistema. Ademais, esta fase de sequenciamento também é importante para a priorização dos acordos mais desejáveis para cada participante, principalmente quando estes submetem lances para vários leiloeiros e vencem mais de um leilão.

No protocolo proposto, um leilão tem início com o envio de um anúncio pelo papel de leiloeiro por meio de uma mensagem de CFP. O anúncio contém a oferta de apenas um tipo de produto. Assim, uma entidade pode realizar vários leilões simultaneamente, um para cada tipo de produto que esta pretende ofertar.

Por sua vez, uma entidade no papel de participante pode receber vários anúncios de diferentes leiloeiros e para diferentes tipos de produtos. Um participante pode submeter lances a qualquer número de leiloeiros que lhe apresentem ofertas. Um participante submete uma proposta por meio de uma mensagem de PROPOSE ou se recusa a participar de um leilão por meio de uma mensagem de REFUSE.

Um leiloeiro somente começa a analisar as propostas quando recebe todos os lances esperados ou então, quando expira o tempo máximo definido para espera dos lances (i.e. *deadline* do leilão). Ao avaliar os lances, quando houver, ele escolhe o lance vencedor de acordo com valores que representam os graus de urgência ou necessidade dos participantes em receber o produto em negociação. Na sequência, o leiloeiro se cadastra na fila de escalonamento do gerente e aguarda uma notificação para fechar o acordo. No escalonamento, o grau de prioridade que um leilão assume também é dependente do grau de urgência do respectivo participante vencedor em receber o produto.

Mesmo que não haja um lance vencedor no leilão, o leiloeiro realiza o cadastro com o gerente. Esta ação é importante, pois como o leilão permanece ativo no intervalo de tempo em que está na fila de escalonamento do gerente, os participantes tem a possibilidade de atualizar os seus lances. Com isso, um participante pode alterar um lance de recusa para um lance de proposta e vice-versa, ou então, apenas atualizar os atributos de um lance de proposta. O cadastramento do leiloeiro com o gerente ocorre por meio de uma mensagem de PERMISSION.

Enquanto um leilão permanece em fase de escalonamento, o respectivo leiloeiro aguarda uma notificação do gerente expressando o momento em que ele deve iniciar a fase de fechamento do acordo. O gerente notifica cada leiloeiro por meio de uma mensagem de PERMITTED. O gerente pode autorizar o fechamento de um ou vários leilões de uma única vez. Porém, para que um subconjunto de leilões possa finalizar simultaneamente é imprescindível que o gerente garanta que tais leilões sejam independentes, ou seja, que não apresentem recursos ou participantes em comum.

Assim, quando um leiloeiro recebe a mensagem de PERMITTED do gerente, ele envia uma mensagem de ACCEPT-PROPOSAL para o participante vencedor e aguarda uma resposta de tal participante para poder enviar as mensagens de REJECT-PROPOSAL para os demais participantes. O leiloeiro apenas realiza acordo com um participante por leilão.

Por sua vez, o participante vencedor do leilão pode confirmar o acordo por meio do envio de uma mensagem de INFORM ou então rejeitar o acordo por meio de uma mensagem de FAILURE. Caso o participante decida confirmar o acordo, ele materializa o objeto do acordo por meio da simulação do recebimento do produto e conseqüentemente, da alocação dos recursos internos cabíveis. Caso contrário, nenhum recurso ou estrutura interna precisa ser alocada.

Durante o fechamento de um acordo, o grau de urgência do participante para o produto pode sofrer alguma alteração. Neste caso, o participante precisa recalcular e atualizar os seus lances com os demais leilões ativos. O participante notifica a atualização de um lance através de uma mensagem de UPDATE-BID. A atualização de lances é importante para que os leilões ativos não se tornem obsoletos, e sempre reflitam as necessidades correntes dos participantes envolvidos. Certamente, estas atualizações podem resultar na troca da entidade vencedora em alguns leilões e conseqüentemente, na necessidade de reescalonamento de tais leilões.

Ainda antes de confirmar o acordo com o leiloeiro, o participante deve analisar a possibilidade de iniciar um novo leilão a fim de repassar o produto recebido para outras entidades. Para isso, a entidade se candidata com o gerente para o início deste leilão por meio de uma mensagem de REGISTER e aguarda a confirmação da candidatura por meio de uma mensagem de REGISTERED. Por sua vez, o gerente autoriza imediatamente o início deste leilão por meio de uma mensagem de DO-AUCTION. É importante salientar que o gerente precisa ser notificado sobre o início de qualquer novo leilão a fim de ter total controle sobre a quantidade de leilões ativos. Com isso, o gerente somente autoriza o próximo fechamento de

acordo quando receber todas as solicitações dos leilões ativos para a realização do escalonamento. Desta forma, um novo leilão recém-iniciado não é prejudicado, pois já participa da rodada seguinte de escalonamento.

Com a possibilidade de uma entidade participante dar início a um leilão, torna-se possível a uma entidade assumir dois papéis distintos para um mesmo produto, ou seja, os papéis de participante e de leiloeiro. Vale salientar que esta troca de papéis é importante para que uma entidade contribua com a distribuição do produto para um número maior de outras entidades. Porém, a permissão para iniciar este novo leilão somente é solicitada pela entidade participante se ela ainda não estiver realizando um leilão para o produto recebido. Essa verificação garante a condição de que uma entidade somente pode ter um leilão ativo por tipo de produto que suporta. Por fim, independente da abertura do leilão ou necessidade de atualização dos lances, o participante confirma o acordo com o leiloeiro por meio de uma mensagem de INFORM.

Ao receber a mensagem de INFORM do participante, o leiloeiro materializa o acordo e inicia um novo leilão a fim de ofertar a quantidade remanescente do produto. Se não houver estoque, o leilão é realizado da mesma forma. A entidade leiloeira é notificada sobre a necessidade de iniciar um novo leilão por meio de uma mensagem interna de DO-AUCTION. Neste caso, o gerente não precisa ser notificado, pois para ele, a entidade corrente já possui um leilão ativo.

Uma situação especial ocorre quando, ao receber um ACCEPT-PROPOSAL, o participante opta por desistir do fechamento de acordo por meio do envio de uma mensagem de FAILURE. O participante desiste de um acordo quando não precisa mais do produto ou quando algum recurso utilizado no momento do lance não se encontra mais disponível. Geralmente, esta situação ocorre quando o participante vence mais leilões do que o necessário, e certamente, quando alguns destes leilões foram escalonados mais previamente por serem mais satisfatórios ao participante. No protocolo proposto, a desistência de um acordo é totalmente possível porque o participante não se compromete com o leiloeiro no momento do envio do lance (tal como ocorre no CNet), mas apenas após ser notificado sobre a vitória no leilão. Porém, uma vez que o acordo é fechado entre as partes, o protocolo não permite que o mesmo seja cancelado.

Caso o leiloeiro receba uma mensagem de FAILURE do participante vencedor, ele deve decidir sobre a abertura de um novo leilão ou continuação do mesmo leilão por meio da escolha de um novo participante vencedor. Desta forma, caso o leiloeiro não tenha recebido

outros lances com propostas para o produto no leilão corrente, ele imediatamente inicia um novo leilão do mesmo produto com o intuito de dar mais uma oportunidade para que os participantes calculem os seus lances, principalmente para aquele que enviou a mensagem de FAILURE. No entanto, se neste novo leilão o leiloeiro apenas receber mensagens de REFUSE e também nenhuma atualização de PROPOSE durante o intervalo em que o leilão se encontra na fase de escalonamento, ele decide por enviar mensagens de REJECT-PROPOSAL para todos os participantes e então, por finalizar o leilão. Após esta decisão, o leiloeiro deixa de ser proativo e passa a ser reativo, ou seja, ele somente abrirá um novo leilão caso seja solicitado por algum participante interessado no produto por meio das notificações de atualização de lances.

Por outro lado, caso o leiloeiro que recebeu uma mensagem de FAILURE tenha outros participantes interessados no produto, ele não finaliza o leilão. Ele procede por meio da seleção de outro lance vencedor e se registra novamente com o gerente (por meio de uma mensagem PERMISSION) para que o leilão seja novamente escalonado. Certamente, com a mudança do participante vencedor, o leilão pode assumir outra prioridade na lista de leilões a serem escalonados.

Portanto, no protocolo proposto, os leilões ocorrem simultaneamente e repetidamente a fim de atender as necessidades dos envolvidos. O protocolo incentiva interações colaborativas entre os envolvidos a fim de que todos alcancem os seus objetivos. Neste sentido, as decisões em um leilão são compartilhadas entre os papéis de leiloeiro e participante. O papel de participante possui uma contribuição maior na tomada de decisão, pois ele é responsável por formar as propostas e informar os valores que expressam sua urgência de atendimento. Todavia, um leiloeiro também pode expressar sua urgência de envio de produtos, principalmente quando há limitações de recursos. Neste caso, mesmo que um participante já esteja satisfeito para um produto, ele contribui com o leiloeiro para a liberação dos recursos excedentes. Desta forma, o protocolo incentiva a busca por um estado de satisfação geral entre os envolvidos por meio de negociações colaborativas através de leilões.

4.2 MODELAGEM BASEADA NO PROTOCOLO PROPOSTO

Esta seção descreve com maior precisão a modelagem do PPTDP com base no novo protocolo de leilão. Basicamente, o modelo é formado por um conjunto de agentes representativos das principais entidades do problema, ou seja, as bases, rotas, arcos e um agente gerente. No modelo, os papéis de leiloeiro e participante são executados pelos agentes

do tipo base; o agente gerente exerce praticamente as mesmas responsabilidades definidas no protocolo e os agentes do tipo rota e arco controlam suas respectivas capacidades de transporte.

Em um leilão, o objeto de um acordo consiste em um plano de transferência de um produto entre uma base leiloeira e participante por uma rota homologada. Conforme o protocolo, os leilões podem ser realizados simultaneamente por múltiplas bases envolvendo a oferta de vários tipos de produtos para escoamento. Cada base pode realizar um ou múltiplos leilões de forma simultânea, um para cada tipo de produto que suporta. No entanto, estes leilões ocorrem no escopo de um período de planejamento, sendo que os períodos são tratados sequencialmente, ou seja, um período por vez.

Em um leilão, um agente base $b_i \in B$ no papel de leiloeiro anuncia praticamente todo o volume em excesso de um produto $prod_i$ ao subconjunto de participantes $B_{b_i}^{sent}$. Cada participante $b_j \in B_{b_i}^{sent}$ analisa tal anúncio para definir os principais atributos do lance, ou seja, os valores que expressam o seu grau de urgência em receber o produto e uma proposta de um fluxo de movimentação $f_j \in F$ com as informações do volume v e datas da transferência (i.e. d^{depart} , d^{arrive}).

A responsabilidade de conceber um fluxo recai sobre o papel de participante, porque os participantes são os reais interessados no atendimento de suas próprias demandas e apresentam conhecimento suficiente para tal. Da mesma forma, quando um participante b_j está satisfeito para um produto $prod_i$ e um leiloeiro b_i apresenta excesso de estoque e previsão de falta de capacidade para armazenamento, o papel de participante continua sendo responsável pela concepção do fluxo. Neste caso, se houver capacidade de transporte e de armazenamento, o participante b_j forma um fluxo f_j com um volume v preferencialmente suficiente para resolver a falta de capacidade de armazenamento na base leiloeira b_i . De qualquer forma, quando uma base leiloeira b_i recebe seus lances, independente de sua urgência de escoamento, ela prioriza o atendimento de participantes com maior necessidade do produto.

No PPTDP, as capacidades de armazenamento das bases e de transporte dos arcos consistem nos recursos disputados durante o planejamento das transferências dos produtos. Os conflitos por estes recursos podem ocorrer internamente ou externamente a uma base. Um conflito interno a uma base ocorre na alocação de capacidade de armazenamento dos produtos de um grupo gr_i (quando $|gr_i| > 1$). Um conflito externo a uma base ocorre em relação a

outras bases na alocação da capacidade de transporte nos arcos, quando tais arcos são compartilhados por diferentes rotas sobre o domínio das bases conflitantes.

Estes recursos são complementares, ou seja, um acordo apenas poderá ser concretizado quando ambas as capacidades de transporte e armazenamento forem alocadas para um determinado produto. Uma prática comum nestes casos é formar um leilão particular para cada recurso. Porém, uma base teria que vencer cada leilão referente aos recursos complementares a fim de formar um fluxo de movimentação para um produto. Esta complementação pode ser inviável computacionalmente quando as negociações ocorrem entre um grande número de agentes, podendo ocorrer frequentemente o problema de interbloqueio de recursos (i.e. *deadlock*). Desta forma, a fase de sequenciamento dos fechamentos de acordos realizado pelo agente gerente resolve esta inconveniência.

Em referência ao propósito do modelo proposto, este foi concebido na intenção de formar uma solução factível com um baixo tempo de execução. Entretanto, em problemas complexos, nem sempre é possível obter uma execução eficiente sem prejuízos à qualidade da solução. Por conta disto, o modelo proposto não se compromete em garantir uma solução ótima global, mas apenas uma solução ótima local que esteja em conformidade com as restrições do problema e permita atender a demanda das bases preferencialmente por movimentações menos custosas.

O entendimento do modelo proposto exige uma descrição mais detalhada de suas particularidades. O protocolo apenas define a ordem e os tipos de mensagens a serem trocadas entre os agentes, mas não define como estas mensagens são formadas e nem como os recursos são atualizados. Além do mais, o modelo proposto faz uso de algumas interações adicionais com os agentes rotas e arcos, que por serem mais específicas ao problema, não foram contempladas na descrição do protocolo na seção 4.1. Ainda, o modelo faz uso de outras interações mais periféricas relacionadas à inicialização e finalização do sistema. Deste modo, os detalhes da concepção do modelo são apresentados nas próximas subseções.

A subseção 4.2.1 apresenta os papéis dos agentes no modelo. Por sua vez, as demais seções estão organizadas de acordo com as fases de execução do modelo. Deste modo, a subseção 4.2.2 apresenta a fase de inicialização dos agentes; a subseção 4.2.3 aborda a fase de inicialização dos períodos; a subseção 4.2.4 descreve a fase de execução dos leilões, a qual envolve o protocolo proposto e finalmente, a subseção 4.2.5 descreve a fase de finalização do sistema. Por fim, para prover uma melhor leitura das equações apresentadas neste capítulo, a

lista das nomenclaturas dos conjuntos, índices e parâmetros utilizadas nas equações estão apresentadas nas seções B.1 e B.2 do APÊNDICE B.

4.2.1 Papéis dos Agentes

O modelo multiagente proposto é composto por quatro tipos de agentes: agentes bases, rotas, arcos e gerente. Estes tipos de agentes podem assumir um ou mais papéis no processo de interação. As relações entre estes agentes são apresentadas na Figura 31 em forma de um diagrama de classe. Neste diagrama, os agentes são representados por classes estereotipadas e os seus papéis e cardinalidade de relação são apresentadas nas associações entre as classes.

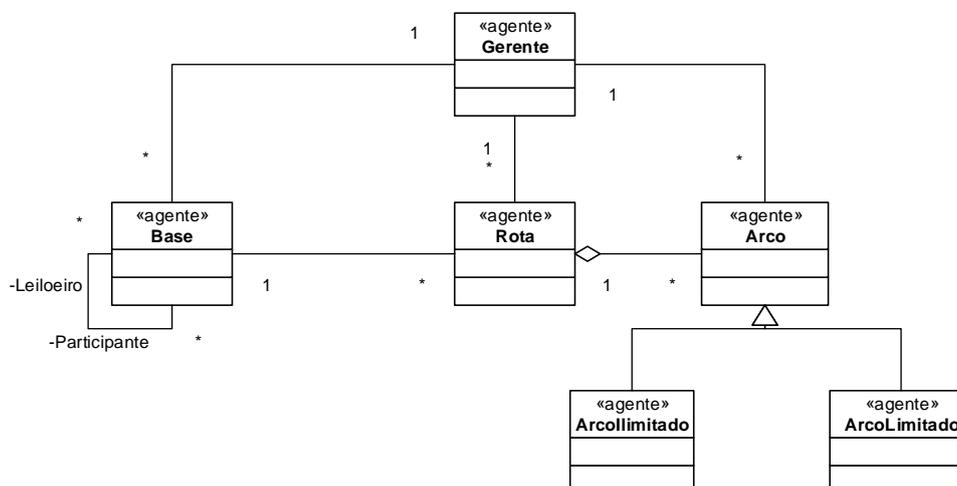


Figura 31 – Estrutura de Classe dos Agentes do Modelo

Entre os agentes, o agente gerente exerce um papel essencial no sistema. Ele é o responsável pelo gerenciamento dos dados do problema e também pelo gerenciamento global das interações entre os demais agentes durante os leilões. O agente gerente é responsável pela leitura dos dados do cenário da malha em planejamento e consequente criação dos agentes correspondentes para representar as entidades deste cenário. Ele também é responsável por autorizar o início e fim dos leilões em um dado período $per_i \in H$, bem como determinar o período seguinte per_{i+1} para a realização dos leilões.

Conforme as diretivas do protocolo proposto, outra importante responsabilidade do gerente refere-se ao sequenciamento dos fechamentos de acordos nos leilões. Ainda, o gerente é responsável por determinar o encerramento de todas as negociações e encerramento do ciclo de vida dos agentes, com consequente finalização do sistema. Esta decisão pode ser tomada quando todos os agentes já alcançaram os seus objetivos ou quando um tempo máximo de

execução do sistema foi alcançado. Por fim, o gerente é responsável por persistir os resultados das negociações em um arquivo de saída (em formato XML).

Por sua vez, cada agente base representa uma base $b \in B$ (i.e. refinaria, terminal ou ponto de consumo) ou região $\beta \in B$ (em nível inter-região) no cenário de planejamento. Esta classe de agente encapsula as principais estruturas e interesses de uma base no processo de negociação. Como uma base b pode suportar um ou mais grupos de produtos $gr \in PROD$, sendo que cada grupo gr possui uma capacidade de armazenamento física e operacional para ser compartilhada por produto $prod \in gr$, a intenção de um agente base é manter a curva de estoque de cada produto e grupo (i.e. $SC_{prod,b}$ e $SC_{gr,b}$) dentro destas faixas de estoque em todos os dias do horizonte de planejamento H conforme as restrições definidas na seção 2.3.3.

No modelo multiagente, cada agente base b negocia a transferência de um ou mais tipos de produtos por meio de leilões. Um leilão é realizado para a oferta de apenas um tipo de produto e um agente base pode assumir simultaneamente o papel de leiloeiro e de participante para o mesmo ou diferentes tipos de produtos. O papel de leiloeiro é executado por bases com a intenção de escoar produtos, ou seja, este papel pode ser executado por qualquer base $b \in B$ que suporta um conjunto de produtos $PROD'_b \subseteq PROD$ quando $PROD'_b \neq \emptyset$ e tem ao menos uma rota registrada para enviar produtos, i.e. $R_b^{sent} \neq \emptyset$, onde $R_b^{sent} \subseteq R$. Uma base leiloeira b_i envia o anúncio para o conjunto de bases $B_{b_i}^{sent} \subseteq B$ com as quais b_i está conectada através das rotas do conjunto $R_{b_i}^{sent}$. Por sua vez, o papel de participante é executado por bases com a intenção de receber produtos, ou seja, este papel pode ser executado por qualquer base $b \in B$ que tem ao menos uma rota registrada para receber produtos, i.e. $R_b^{rec} \neq \emptyset$, onde $R_b^{rec} \subseteq R$.

Mais precisamente, um agente base b pode realizar um máximo de n_b leilões simultâneos em um instante qualquer da execução de um período per , onde $n_b \leq |PROD'_b|$. Ademais, conforme a equação (40), um agente base b pode participar de um máximo de m_b leilões simultâneos em um instante qualquer da execução do mesmo período per , onde $B_b^{rec} \subseteq B$ consiste em um subconjunto de bases com as quais a base b está conectada através de rotas R_b^{rec} para receber produtos.

$$m_b \leq \sum_{i=1}^{|B_b^{rec}|} |PROD'_{b_i}| \quad \forall b \in B, i \in \mathbb{N} \quad (40)$$

O papel que uma base b assume em um leilão (i.e. leiloeiro ou participante) depende unicamente da situação de sua curva de estoque $SC_{prod,b}$ para o produto $prod$ em cada período de planejamento per , não importando se esta representa uma refinaria, terminal ou ponto de consumo. Assim, mesmo que uma base b_i apresente balanço negativo (i.e. $bal_{b_i,prod,per} < 0$) em um período per , que gera uma curva de estoque decrescente para o produto, ela também pode realizar o papel de leiloeira caso haja estoque remanescente do produto. Esta prática busca incentivar transferências de menor distância entre as bases e mesmo evitar desabastecimentos quando certa base b_j não apresenta outra opção de recebimento, a não ser com a base b_i .

Um agente arco representa um arco $a \in A$ do cenário de planejamento. Um arco a pode ser classificado em ArcoLimitado ou ArcoIlimitado em virtude de sua capacidade de transporte. Os agentes da classe ArcoLimitado representam os modais com capacidade limitada, ou seja, referem-se unicamente aos dutos. Por sua vez, os agentes da classe ArcoIlimitado representam os modais com capacidade ilimitada, ou seja, referem-se aos demais modais de transporte. Um agente da classe ArcoLimitado tem como responsabilidade principal o gerenciamento de sua capacidade de transporte de produtos. Por sua vez, um agente da classe ArcoIlimitado não apresenta um controle de sua capacidade de transporte de produtos, uma vez que sempre apresentará capacidade para transportar qualquer volume de produtos.

Por fim, um agente rota representa uma rota $r \in R$ em um cenário de planejamento e atua como uma entidade intermediária entre uma instância de participante e os agentes arcos representativos dos arcos $a \in r$ na intenção de verificar a viabilidade, tempo e custo de movimentação de um determinado volume por tais arcos. Uma base participante b_j possui acesso prévio aos custos de suas rotas com qualquer leiloeiro b_i e comunica com tais rotas de forma sequencial, iniciando pela de menor custo até que seja encontrada uma rota que satisfaça suas necessidades. Os agentes rotas exercem um papel importante no modelo, pois estes poupam as bases participantes da interação direta com os agentes arcos, permitindo que se dediquem unicamente aos leilões que participam.

4.2.2 Fase de Inicialização dos Agentes

O primeiro agente a ser criado no modelo é o agente gerente. Em sua criação, ele é informado sobre a localização do arquivo de dados de entrada (i.e. XML de entrada) para leitura e o local para persistir o arquivo de saída (i.e. XML de saída) com o resultado do

planejamento. O agente gerente cria os agentes do sistema de acordo com os dados disponíveis no arquivo XML de entrada. Este arquivo apresenta as informações de toda a estrutura da malha brasileira formada pelas bases (em nível intrarregião) ou regiões (em nível inter-região), rotas e arcos.

No processo de criação dos agentes, o gerente distribui os dados e controle do PPTDP entre os agentes. Assim, cada agente fica responsável por uma parte do problema, reduzindo a complexidade global do problema. A interação do gerente para a criação e inicialização dos agentes é representada na Figura 32.

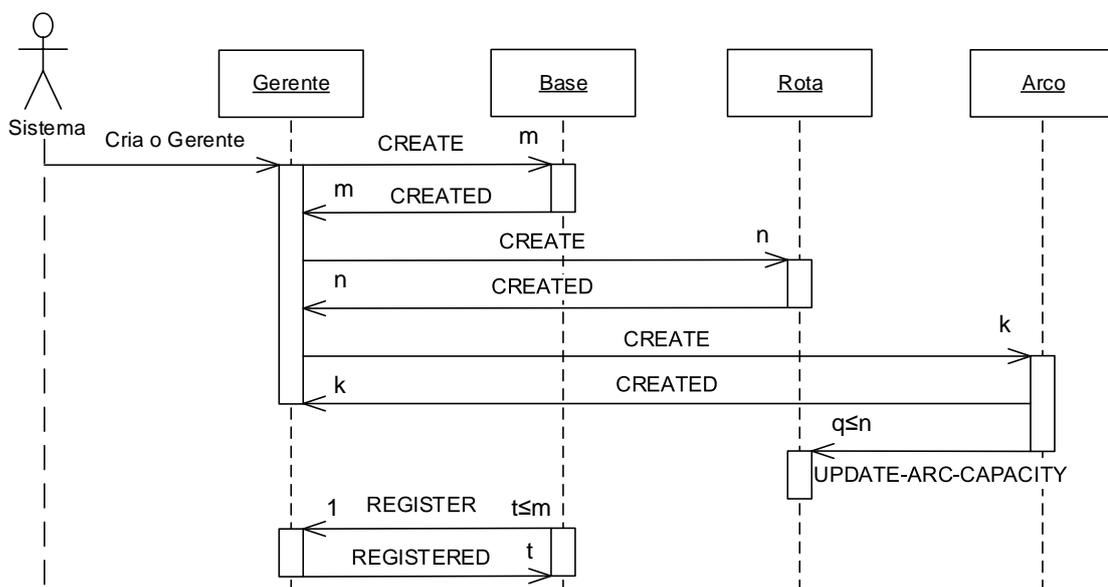


Figura 32 – Inicialização e Criação dos Agentes

O agente gerente envia mensagens com a performativa CREATE a todos os agentes com os dados separados em duas classes: os dados comuns a todos os agentes e outros particulares a cada tipo de agente. Os dados comuns consistem basicamente nas informações sobre os períodos de planejamento (i.e. quantidade de períodos e número de dias de cada período) e composição de cada grupo de produto. As informações particulares recebidas pelos agentes referem-se basicamente aos atributos descritivos das entidades reais contemplados pelo modelo do problema (apresentado na seção 2.3) e aos fluxos em trânsito $F^t \subseteq F$, comprometidos $F^c \subseteq F$ ou inter-região $F^i \subseteq F$, quando for o caso.

As informações contidas nestes fluxos são usadas para que os agentes atualizem as suas informações de estoque e capacidade de transporte ou armazenamento. Particularmente, cada agente arco a , da classe ArcoLimitado, faz uso das informações de vazão $\psi_{a,per}$, volume χ_a para criar a sua agenda de alocação de capacidade e posteriormente atualizar tal agenda com as informações pertinentes destes fluxos. Quando um agente arco a é criado, ele informa

a sua capacidade de transporte para os agentes rota $r \ni a$ por meio de uma mensagem de UPDATE-ARC-CAPACITY. Este mesmo processo ocorre durante a execução do protocolo de leilões. Assim, cada agente rota sempre terá a informação atualizada sobre sua capacidade ociosa de transporte, evitando, requisições redundantes e desnecessárias aos arcos para obter tal informação.

Por sua vez, cada agente base b faz uso das informações de estoque inicial $e_{b,prod}^{initial}$, balanço $bal_{b,prod,per}$ e períodos de planejamento H para compor as curvas de estoque (i.e. $SC_{b,prod}, SC_{b,gr}$) de cada produto $prod$ e grupo gr , e posteriormente atualiza tais curvas de estoque com as informações dos conjuntos de fluxos recebidos (i.e. F^t, F^c e F^i). Ademais, as bases também definem a forma de compartilhamento da capacidade de armazenamento física (i.e. formada pelos limites $PL_{b,gr,d}^{max}, PL_{b,gr,d}^{min}$) e operacional (i.e. formada pelos limites $OL_{b,gr,d}^{max}, OL_{b,gr,d}^{min}$) de cada grupo gr pelos produtos de tal grupo. No modelo proposto, o compartilhamento da capacidade de armazenamento de um grupo ocorre através da definição de limites particulares estáticos e dinâmicos para cada produto $prod \in gr$.

A capacidade particular estática consiste na distribuição da capacidade de armazenamento de um grupo de forma proporcional aos valores de estoques dos produtos do respectivo grupo. Estes limites não variam durante a ocorrência das movimentações e suas formas de cálculo foram apresentadas na seção 2.3.3. Por outro lado, a capacidade dinâmica varia durante as movimentações e é definida conforme as necessidades de cada base.

A capacidade particular estática é útil para prover um melhor compartilhamento da capacidade de armazenamento de um grupo pelos produtos. A Figura 33 ilustra graficamente à esquerda, a capacidade agregada de um grupo gr com dois produtos, $prod_i$ e $prod_j$, e à direita, as respectivas capacidades particulares destes produtos. As curvas destes produtos são constantes, uma característica natural de bases terminais. Na representação da capacidade do grupo, as duas curvas de estoque inferiores representam o estoque diário dos produtos $prod_i$ e $prod_j$ e a superior representa a curva de estoque do grupo, ou seja, a soma dos estoques destes produtos. Na representação da capacidade particular de cada produto (à direita), cada curva de estoque $SC_{b,prod}$ possui seus próprios limites particulares (i.e. $PL_{b,prod,d}^{max}, PL_{b,prod,d}^{min}, OL_{b,prod,d}^{max}, OL_{b,prod,d}^{min}$). Notavelmente, a capacidade particular dos produtos é inversamente proporcional à quantidade de produtos de um grupo.

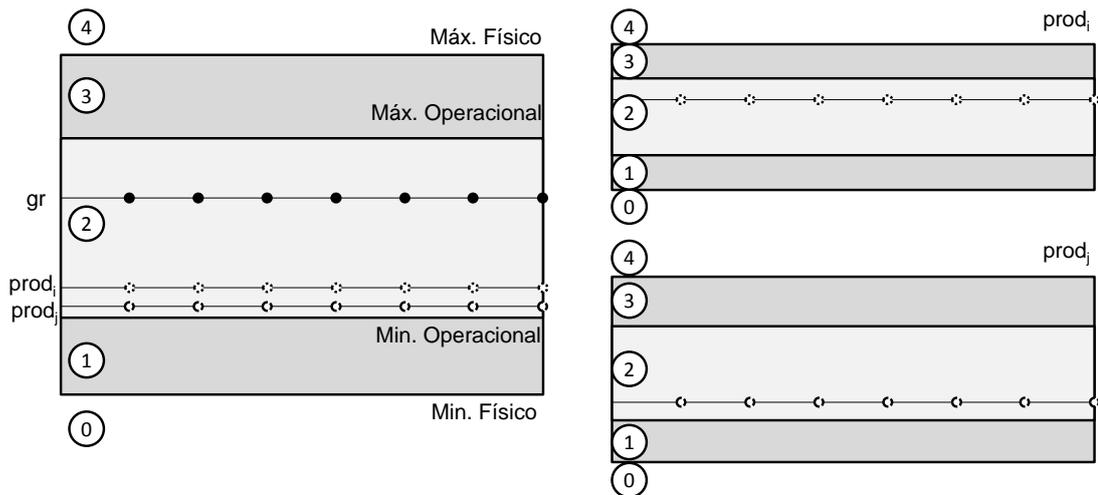


Figura 33 – Representação das Capacidades de Estoque do Grupo (à esquerda) e Particulares dos Produtos deste Grupo (à direita)

Também, a capacidade em ambas as representações é demarcada por cinco faixas de estoque formadas pelo espaço entre os limites operacionais e físicos. A divisão da capacidade em faixas auxilia na definição dos volumes a serem movimentados entre as bases durante os leilões para tentar mantê-las em equilíbrio de estoque, ou seja, para que as bases apresentem as suas curvas de estoque do grupo e de cada produto na mesma faixa de estoque.

Em um leilão, cada base leiloeira e participante calcula as suas faixas de estoque para o grupo e produto em negociação, sendo que um participante apenas participa de um leilão quando apresenta faixa de estoque igual ou inferior para o grupo e produto. As faixas de estoque de um produto $prod$ e de um grupo gr são representadas respectivamente pela variáveis $l_{b,per}^{prod}$ e $l_{b,per}^{gr}$ para um dado período per . Para definir as faixas $l_{b,per}^{prod}$ e $l_{b,per}^{gr}$ para um período per , considera-se apenas o estoque disponível nas curvas de estoque $SC_{b,prod}$ e $SC_{b,gr}$ no último dia d_{per}^f do período. Esta definição se faz necessária porque uma curva de estoque pode ter seus valores situados em diferentes faixas durante um mesmo período.

Entretanto, esta forma de compartilhamento de estoque não é adequada para ser usada durante as negociações por leilões. Ela limita a quantidade de cada produto baseando-se apenas nas informações locais de cada base, antes mesmo de conhecer as reais situações de estoque de toda a malha. Em um exemplo, caso uma base tenha uma produção excessiva de um produto, a capacidade de armazenamento particular alocada para este produto pode ser insuficiente para acomodar toda a produção, enquanto que parte ou toda a capacidade reservada a algum outro produto com alta demanda pode estar ociosa (por não conseguir obter tal produto com outras bases). Assim, a capacidade estática é apenas usada na intenção de

manter o equilíbrio de estoque, sendo que a capacidade de um tanque é compartilhada de fato por meio de limites operacionais e físicos dinâmicos.

Neste sentido, como a capacidade de armazenamento é definida pelos valores dos limites superiores, os limites dinâmicos operacional $OL_{b,prod,per}^{dyn}$ e físico $PL_{b,prod,per}^{dyn}$ de cada produto $prod$ referem-se somente aos limites superiores. Mais precisamente, os limites dinâmicos correspondem exatamente à curva de estoque do produto $SC_{b,prod}$, quando houver capacidade disponível para isto. Assim, as capacidades de armazenamento operacional e física não ocupadas pelas curvas de estoque de um grupo gr são disponibilizadas em duas estruturas de dados globais referentes ao grupo para serem requisitadas à medida que mais espaço venha ser necessário para alocação de qualquer produto $prod \in gr$.

As capacidades ociosas operacional e física são representadas respectivamente por $I_{b,per}^{op}$ e $I_{b,per}^{phy}$ para o período corrente per . As capacidades ociosas de armazenamento podem aumentar durante os leilões devido ao escoamento dos produtos do grupo gr , ou seja, as capacidades ociosas aumentam com a redução dos limites dinâmicos. Vale salientar que a definição de limites particulares dinâmicos é consistente, pois se cada curva de estoque $SC_{b,prod}$ de cada produto $prod \in gr$ não violar em nenhum dia os seus limites dinâmicos particulares, então a curva de estoque do grupo $SC_{b,gr}$ também não violará os limites estáticos do grupo gr .

Após cada agente base inicializar as suas estruturas internas, cada qual deve responder ao gerente com uma mensagem de CREATED a fim de notificar o sucesso de sua criação e inicialização dos dados. Os agentes do tipo rota e arco também devem enviar esta mensagem ao agente gerente com o mesmo propósito.

Após isso, cada agente base deve analisar as curvas de estoque de cada produto $prod \in gr$ e verificar a possibilidade de escoamento de um ou mais produtos para o período corrente per_i ou posterior per_{i+1} , quando $i + 1 \leq |H|$. Um agente base, independente de seu valor de balanço $bal_{b,prod,per}$, somente decide realizar um leilão para escoar um produto quando a curva de estoque $SC_{b,prod}$ está acima do mínimo operacional particular $OL_{b,prod,d}^{min}$ no término do período corrente per_i . Mas quando o produto apresenta balanço negativo, mesmo que haja sobra de estoque no último dia do período, o estoque somente deve ser ofertado se houver rota para recebimento do mesmo produto em períodos posteriores, i.e. $R_b^{rec} \neq \emptyset$. Esta condição deve ser satisfeita porque as capacidades de transporte das rotas de recebimento poderão estar parcialmente ou completamente indisponíveis devido a possíveis

operações de manutenção. Portanto, quando possível, uma base b_i oferece todo o seu estoque disponível no final do período corrente per_i , uma vez que alguma base consumidora $b_j \in B_{b_i}^{sent}$ pode apresentar somente oportunidades de aquisição por custos maiores com outras bases $B_{b_j}^{rec} - \{b_i\}$ ou então, em um caso mais grave, não apresentar tais oportunidades com qualquer outra base, i.e. $B_{b_j}^{rec} - \{b_i\} = \emptyset$.

Conforme as diretivas do protocolo proposto, uma base b que deseja realizar um leilão para um ou mais produtos em qualquer período $per \subseteq H$ deve notificar o gerente sobre esta intenção (mensagem REGISTER) e aguardar a confirmação de sucesso da candidatura (mensagem REGISTERED). Uma base se candidata a leiloeiro com o gerente enviando uma mensagem com as informações sobre os produtos com disponibilidade para escoamento. Vale salientar que uma base b somente pode se candidatar ao leilão de um dado produto $prod_i$ para um único período $per \subseteq H$ por vez, ou seja, ela não pode se candidatar simultaneamente em múltiplos períodos para o mesmo produto $prod_i$.

4.2.3 Fase de Inicialização dos Períodos

Nesta fase, o agente gerente tem a responsabilidade de atribuir as permissões para o início da rodada de leilões no período corrente per_i . O gerente controla as execuções dos períodos para que ocorram sequencialmente, ou seja, um após o outro. Na inicialização do sistema, o gerente recebe as candidaturas dos agentes bases para a realização de leilões e as classifica em ordem crescente de período. Então, o gerente seleciona todos os t candidatos a leiloeiros para o período corrente e notifica-os (mensagem com performativa DO-AUCTION) para que iniciem os leilões para seus respectivos produtos.

O agente gerente mantém controle sobre os estados dos leilões, sendo que este sempre é notificado pelo respectivo leiloeiro quando um leilão é finalizado. Assim, quando todos os leilões do período corrente estiverem finalizados, o gerente seleciona os candidatos a leiloeiros para o período seguinte per_{i+1} , se $i + 1 \leq |H|$, e os autoriza a realizar leilões. O gerente recebe candidaturas para qualquer período, tal como aquelas recebidas na fase de inicialização e aquelas recebidas de leiloeiros que estão satisfeitos para o período corrente e por isso decidiram se candidatar para um período subsequente. Portanto, esta fase ocorre repetidamente durante a execução do sistema, sempre no início de cada período de planejamento.

4.2.4 Fase de Execução dos Leilões

Na fase de execução de leilões, múltiplas bases podem realizar leilões simultaneamente para diferentes produtos em um mesmo período *per*. Uma base b pode realizar mais de um leilão simultaneamente, um para cada produto suportado. O mecanismo de leilões proposto inclui o agente gerente como um elemento de tomada de decisão durante a execução dos leilões. O escalonamento realizado pelo gerente é uma das fases mais importantes do modelo, uma vez que esta é responsável pela (a) resolução de conflitos relacionados à alocação da capacidade dos arcos; (b) definição do melhor acordo para cada participante e, (c) definição da ordem de recebimento de produtos para alocar melhor a capacidade de armazenamento das bases. A Figura 34 mostra as interações entre os agentes do modelo conforme as diretivas do protocolo proposto, com a inclusão de pontuais comunicações com os agentes do tipo rota e arco.

Por conta da importância desta fase de execução de leilões, esta é descrita em maiores detalhes nas subseções seguintes. Com o intuito de prover uma melhor explicação do processo envolvido, a fase de leilões foi subdividida em subfases, onde cada qual corresponde a uma subseção. Mais precisamente, a subseção 4.2.4.1 apresenta a subfase de concepção do anúncio; a subseção 4.2.4.2 descreve as particularidades da subfase de concepção do lance e a subseção 4.2.4.3 aborda a subfase de abertura de um leilão de repasse. Por sua vez, subseção 4.2.4.4 aborda a forma de escolha dos lances vencedores de um leilão; a subseção 4.2.4.5 trata do sequenciamento do fechamento dos acordos e a subseção 4.2.4.6 apresenta as particularidades da subfase de fechamento dos acordos. Por fim, a subseção 4.2.6 descreve sobre o suporte do modelo às operações eventuais (i.e. degradação, transbordo e sobreestadia).

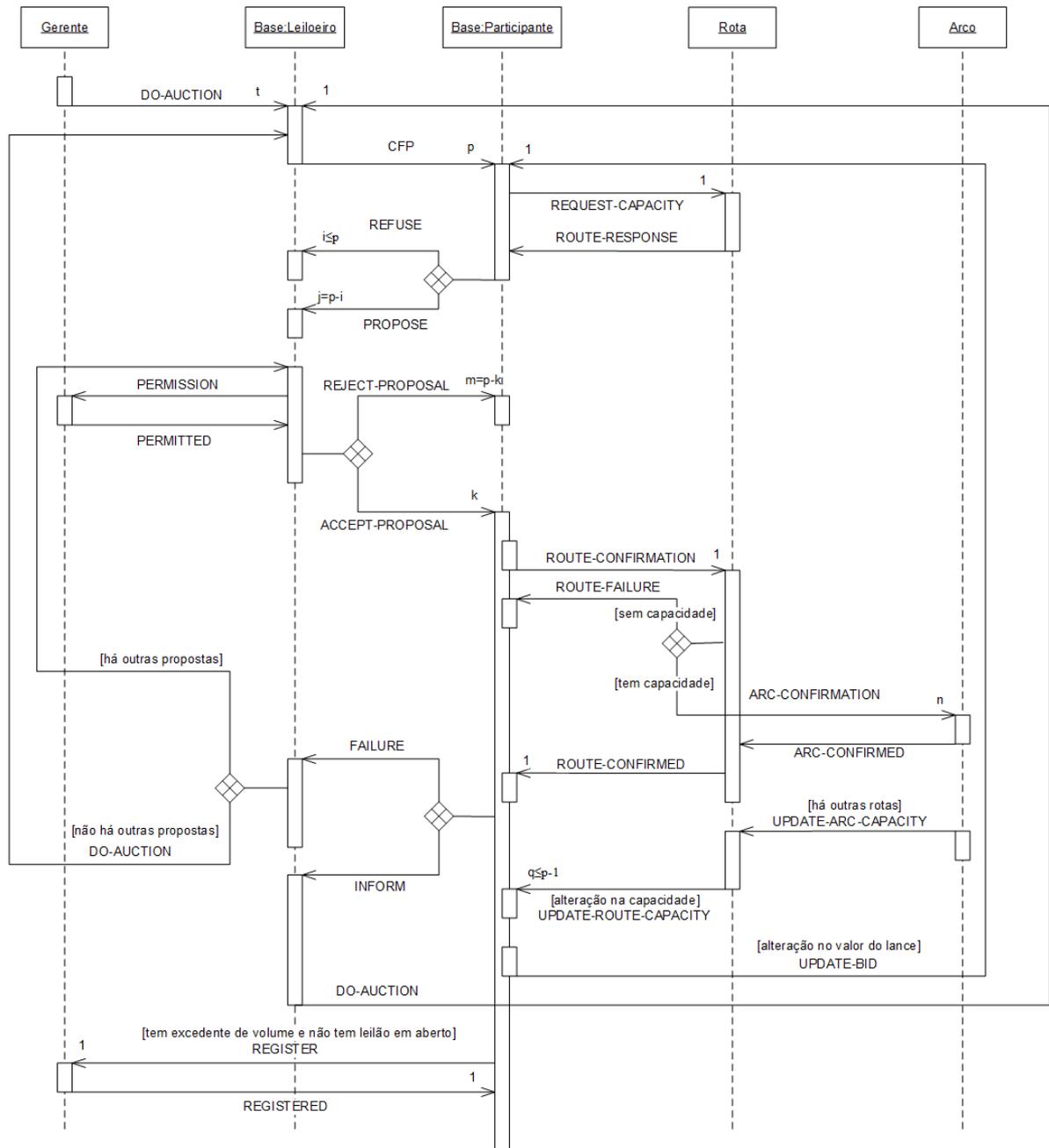


Figura 34 – Interações entre os Agentes do Modelo conforme as Diretivas do Protocolo Proposto

4.2.4.1 Subfase de concepção do anúncio

Nesta fase, os agentes do tipo base iniciam os leilões simultâneos para os produtos em estoque. Porém, antes de um leilão ser iniciado, cada base leiloeira b_i deve verificar se a curva de estoque $SC_{b_i,prod}$ do produto a ser ofertado no leilão respeita diariamente os limites operacionais e físicos dinâmicos (i.e. $OL_{b_i,prod,per}^{dyn}$, $PL_{b_i,prod,per}^{dyn}$). Caso o leiloeiro note que tais limites estão sendo violados em um certo intervalo de dias e o grupo $gr \ni prod$ apresenta

capacidade ociosa de armazenamento (i.e. $I_{b,per}^{op} > 0$ ou $I_{b,per}^{phy} > 0$), ele deve tentar aumentar tais limites dinâmicos.

As capacidades ociosas de armazenamento $I_{b,per}^{op}$ e $I_{b,per}^{phy}$ de um grupo gr são disputadas entre os papéis de leiloeiro e participante de uma mesma base b , mas o papel de leiloeiro sempre tem maior prioridade para alocação de tais capacidades. Esta preferência se deve principalmente pela incerteza do papel de leiloeiro sobre o recebimento de propostas em um leilão e também porque geralmente o leiloeiro apresenta curva de estoque crescente, sendo que a preferência para aumento de tais limites pode evitar uma provável violação do limite físico máximo $PL_{b,gr,per}^{max}$ e consequente paralisação das atividades de produção.

Com os limites particulares dinâmicos atualizados, o leiloeiro prossegue com a preparação do anúncio. Os principais componentes do anúncio estão representados na equação (41). Basicamente, um anúncio é composto pelos seguintes atributos: a) identificador do tipo de produto $prod$; b) identificador do período corrente per ; c) estoque diário operacional E^{op} e físico E^{phy} disponível do produto no período corrente per ; d) os volumes e respectivos dias de violação do limite máximo dinâmico operacional e físico, quando houver, representados respectivamente pelos vetores V^{op} e V^{phy} . Estes vetores são informados para que os participantes possam solicitar pelo menos o volume excedente referente aos dias de violação para contribuir para a satisfação da curva de estoque do leiloeiro; e) os níveis de estoque $l_{b,per}^{gr}$ e $l_{b,per}^{prod}$ do grupo gr e produto $prod$, respectivamente e, f) uma lista de nomes de bases, B_{per}^{rec} , de quem o leiloeiro recebeu volumes do produto $prod$ no período corrente.

$$\tau_{b_i,prod} = (prod, per, E^{op}, E^{phy}, V^{op}, V^{phy}, l_{b,per}^{prod}, l_{b,per}^{gr}, B_{per}^{rec}) \quad (41)$$

Em relação ao estoque ofertado, o leiloeiro informa o montante diário disponível para escoamento por meio de duas diferentes estruturas de dados lineares na forma de vetores. A primeira estrutura é o vetor operacional E^{op} , descrito na equação (42). E^{op} consiste em uma lista de valores de estoque $e_{prod,d}^{op}$ de um produto $prod$ referente ao intervalo do primeiro dia d_i do horizonte de planejamento H até o último dia d_{per}^f do período corrente per_i . O estoque diário $e_{prod,d}^{op}$ em cada dia d_i é calculado conforme a equação (43) por meio da diferença entre o estoque $e_{b,prod,d} \in SC_{b,prod}$ e o limite operacional mínimo particular $OL_{b,prod,d}^{min}$, considerando o volume excedente mínimo $e_{prod,d}^{min,op}$ a partir do dia d_i até o último dia do horizonte de planejamento d_H^f . A verificação do volume excedente mínimo é realizada

até o final do horizonte de planejamento para evitar violações do operacional mínimo nos períodos subsequentes devido ao processo de planejamento baseado no horizonte deslizante.

Desta forma, mesmo que todo o volume oferecido em um dia d qualquer seja escoado, a curva de estoque do produto ainda se manterá acima do mínimo operacional particular. Este vetor também pode ser chamado de curva operacional por ser composta por parte do volume da curva de estoque do produto no intervalo de dias especificado.

$$E^{op} = \left(e_{prod,d=1}^{op}, \dots, e_{prod,d_{per}^f}^{op} \right), \quad d \in H, d_{per}^f \in H \quad (42)$$

$$e_{prod,d}^{op} = \begin{cases} e_{prod,d}^{min,op}, & e_{b,prod,d} - OL_{b,prod,d}^{min} > e_{prod,d}^{min,op} \\ e_{b,prod,d} - OL_{b,prod,d}^{min}, & \text{senão} \end{cases} \quad (43)$$

$$\text{onde, } e_{prod,d}^{min,op} = \min_{d \leq d_H^f} e_{b,prod,d} - OL_{b,prod,d}^{min}$$

A segunda estrutura é o vetor físico E^{phy} , descrito na equação (44). E^{phy} também consiste em uma lista de valores de estoque diário $e_{prod,d}^{phy}$ com o mesmo intervalo de dias do vetor E^{op} . O estoque diário $e_{prod,d}^{phy}$ no dia d_i é calculado pela diferença entre o valor de estoque $e_{b,prod,d} \in SC_{b,prod}$ e o estoque operacional $e_{prod,d}^{op} \in E^{op}$, considerando o estoque excedente mínimo $e_{prod,d}^{min,phy}$ conforme descrito na equação (45). O vetor físico também pode ser chamado de curva física por também consistir em parte da curva de estoque do produto.

$$E^{phy} = \left(e_{prod,d=1}^{phy}, \dots, e_{prod,d_{per}^f}^{phy} \right), \quad d \in H, d_{per}^f \in H \quad (44)$$

$$e_{prod,d}^{phy} = \begin{cases} e_{prod,d}^{min,phy} - e_{prod,d}^{op}, & e_{b,prod,d} - PL_{b,prod,d}^{min} > e_{prod,d}^{min,phy} \\ e_{b,prod,d} - PL_{b,prod,d}^{min}, & \text{senão} \end{cases} \quad (45)$$

$$\text{onde, } e_{prod,d}^{min,phy} = \min_{d \leq d_H^{last}} e_{b,prod,d} - PL_{b,prod,d}^{min}$$

O uso de ambos os vetores é importante para assegurar que as curvas de estoque $SC_{b,prod}$ de cada base b permaneçam dentro da faixa de estoque desejável $[PL_{b,gr,per}^{max}, PL_{b,gr,per}^{min}]$. Geralmente, somente o vetor operacional é usado pelos participantes para calcular os lances. Porém, o vetor físico é usado em casos de urgência, quando a curva de

estoque $SC_{b,prod}$ do participante estiver violando o limite mínimo operacional $OL_{b,prod,per}^{min}$ ou físico $PL_{b,prod,per}^{min}$ em um dado intervalo de dias P^{op} (equação (46)) ou P^{phy} (equação (47)), respectivamente, do período corrente per e não houver oportunidades de recebimento com outros leiloeiros.

$$P^{op} = (d_i, \dots, d_n) \mid e_{b,prod,d_i} < OL_{b,prod,per}^{min}, \forall e_{b,prod,d} \in SC_{b,prod}, \forall d_i \in per_i \quad (46)$$

$$P^{phy} = (d_i, \dots, d_n) \mid e_{b,prod,d_i} < PL_{b,prod,per}^{min}, \forall e_{b,prod,d} \in SC_{b,prod}, \forall d_i \in per_i \quad (47)$$

Neste caso, o volume ofertado no vetor operacional E^{op} pode ser insuficiente para suprir a demanda de um participante nos dias desejados ou mesmo porque o volume é menor do que o mínimo exigido para transporte pela rota selecionada (i.e. $lot_{r,gr}^{min}$). Geralmente, o vetor físico E^{phy} oferece um volume que está disponível para escoamento em dias mais prévios. Porém, o uso deste volume deve ser evitado quando possível, pois o seu uso pode fazer com que a curva de estoque $SC_{b,prod}$ do leiloeiro viole o limite operacional mínimo $OL_{b,prod,per}^{min}$. A Figura 35 ilustra graficamente a composição dos vetores operacionais e físicos para três diferentes configurações de uma curva de estoque.

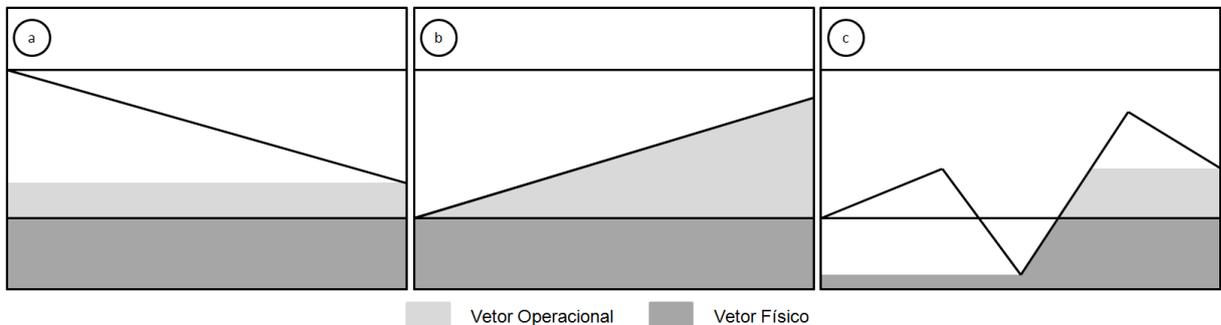


Figura 35 – Exemplo Gráfico do Volume Referente aos Vetores de Anúncio

O vetor físico é geralmente utilizado para levar as bases envolvidas a um equilíbrio de estoque, permitindo que as mesmas mantenham seus estoques pelo menos dentro da faixa física. No entanto, quando um participante vence este tipo de leilão e ainda outros simultaneamente, o protocolo permite a priorização dos acordos mais satisfatórios ao participante por meio da fase de sequenciamento dos fechamentos de acordos. Mas mesmo que o acordo chegue a ocorrer e leve a curva de estoque do leiloeiro para baixo do mínimo operacional e conseqüentemente contribua para a elevação da curva de estoque do participante, ainda é mais preferível que a curva de estoque do participante esteja na faixa operacional do que a do leiloeiro, pois geralmente o leiloeiro apresenta uma curva crescente de produção.

A soma do vetor operacional e do vetor físico corresponde exatamente à curva de estoque do produto. Nestes dois vetores, o volume diário disponível para escoamento é calculado considerando apenas o estoque do produto disponível no início do dia corrente, não considerando a produção diária. Esta prática tenta evitar oferecer um volume que ainda não foi produzido no dia, uma vez que não há conhecimento sobre o momento do dia em que o produto será escoado. Também, há a possibilidade de configurar o modelo para que nenhum volume seja ofertado em ambos os vetores nos dias em que a curva de estoque viola o limite físico máximo dinâmico. Esta prática busca antecipar escoamentos a fim de evitar parar as operações de produção por falta de capacidade de armazenamento. Assim, à medida que o volume é escoado em dias precedentes ao dia de violação, a curva de estoque é reduzida nos dias posteriores, podendo retardar ou suprimir o dia de violação do limite físico máximo.

Ademais, como os leilões são incrementais em relação aos períodos, o leilão do primeiro período apenas oferece os volumes disponíveis para escoamento nos dias deste período. Porém, em anúncios de períodos posteriores, o leiloeiro oferece novamente o volume não escoado em períodos anteriores. Assim, mesmo que os leilões ocorram por período, esta prática permite que ocorram movimentações entre períodos. A redundância nos vetores de anúncio é intencional para permitir que participantes que não puderam participar de leilões em períodos passados por não terem capacidades disponíveis em rotas, espaço para armazenamento ou mesmo por causa do tempo muito longo de transporte, possam calcular um lance considerando os recursos do período corrente. Com isso, pode naturalmente ocorrer de um montante ser escoado em um período per_i e ser entregue no destino em um período per_{i+1} . A Figura 36 ilustra a estrutura de um vetor de anúncio oferecido incrementalmente em relação aos períodos, sendo que o volume não escoado em um período anterior é replicado nos períodos posteriores. Nesta figura, cada período contém exatos sete dias, sendo estes representados pela linha inferior de cada vetor.

Período
Corrente

1º	0	0	0	0	0	50	60															
	1	2	3	4	5	6	7															
2º	0	0	0	0	0	50	60	60	60	60	60	70	70	70								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14								
3º	0	0	0	0	0	50	60	60	60	60	60	60	70	70	70	80	0	0	0	0	0	0
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	

Figura 36 – Estrutura do Vetor de Anúncio Incremental em Relação aos Períodos

Assim, após a concepção do anúncio, a base leiloeira b envia o CFP para as bases participantes $B_{b,prod}^{sent} \subseteq B$ com quem mantém rota para escoamento do dado produto $prod$ e aguarda pelos lances de tais participantes.

4.2.4.2 Subfase de concepção e envio de lances

Nesta fase, cada base participante b_j deve proceder com a concepção do lance. Uma base b_j pode participar simultaneamente de vários leilões iniciados pelas bases leiloeiras $B_{b_j,prod}^{rec} \subseteq B$. Para cada leilão, uma base b_j executa uma instância do papel de participante. Tecnicamente, o papel de participante é representado por um comportamento FSM dentro da plataforma JADE. Portanto, como cada agente executa em um *thread*, apenas um comportamento FSM executa em um instante de tempo. Porém, muitos FSMs podem executar concorrentemente se for considerado um intervalo maior de tempo, pois se consegue assegurar a atomicidade de execução de apenas um subestado. Assim, cada instância de participante consegue tratar apenas uma única mensagem de CFP. Para cada CFP recebido por um agente b_j , um lance deve ser preparado a fim de enviar uma mensagem de proposta (i.e. PROPOSE) ou recusa (i.e. REFUSE) ao leiloeiro b_i .

Basicamente, um lance deve conter as informações sobre um fluxo de transferência $f \in F$ e três atributos que expressam a urgência do participante em receber o produto. Estes atributos influenciam tanto nas decisões dos leiloeiros como nas decisões do gerente ao sequenciar os fechamentos dos acordos, tal como será apresentado posteriormente. Mais precisamente, um lance de proposta ρ para um produto $prod$ calculado por um participante b_j para um leiloeiro b_i é representado por uma tupla conforme a equação (48), onde k consiste no custo de transporte de uma unidade de volume pela rota selecionada, δ refere-se ao grau de urgência calculado sobre o estoque do produto e η refere-se ao grau de urgência calculado em relação às rotas de recebimento $R_{b_j}^{rec}$.

$$\rho_{b_i,b_j,prod} = (f, \delta, \eta, k) \quad (48)$$

No modelo, um participante b_j não precisa se comunicar com um leiloeiro b_i para definir os atributos de um fluxo f , sendo que o papel de leiloeiro dá total liberdade para que o papel de participante decida da melhor forma possível sobre tais valores, uma vez que é de interesse particular do participante o atendimento de sua própria demanda. O participante sempre tenta conceber um fluxo de menor custo que atenda a sua demanda sem atraso. A concepção de um fluxo com atraso ocorre quando o dia de entrega d^{arrive} de um volume v

acontece após o dia previsto para a curva de estoque $SC_{b_j,prod}$ violar o limite mínimo operacional particular $OL_{b_j,prod,per}^{min}$ do produto. Nesta tese, fluxos que atendem a demanda com algum atraso de dias são chamados de infactíveis e os que atendem a demanda sem atraso são chamados de factíveis. Mais precisamente, um fluxo f é considerado factível quando $d^{arrive} \notin Pop$ e infactível quando $d^{arrive} \in Pop$.

Quando um participante recebe um CFP, ele deve seguir uma sequência de etapas para decidir sobre a viabilidade de participação no leilão e consequente formação do lance. As principais decisões para a concepção de um lance estão apresentadas no diagrama de atividades ilustrado na Figura 37.

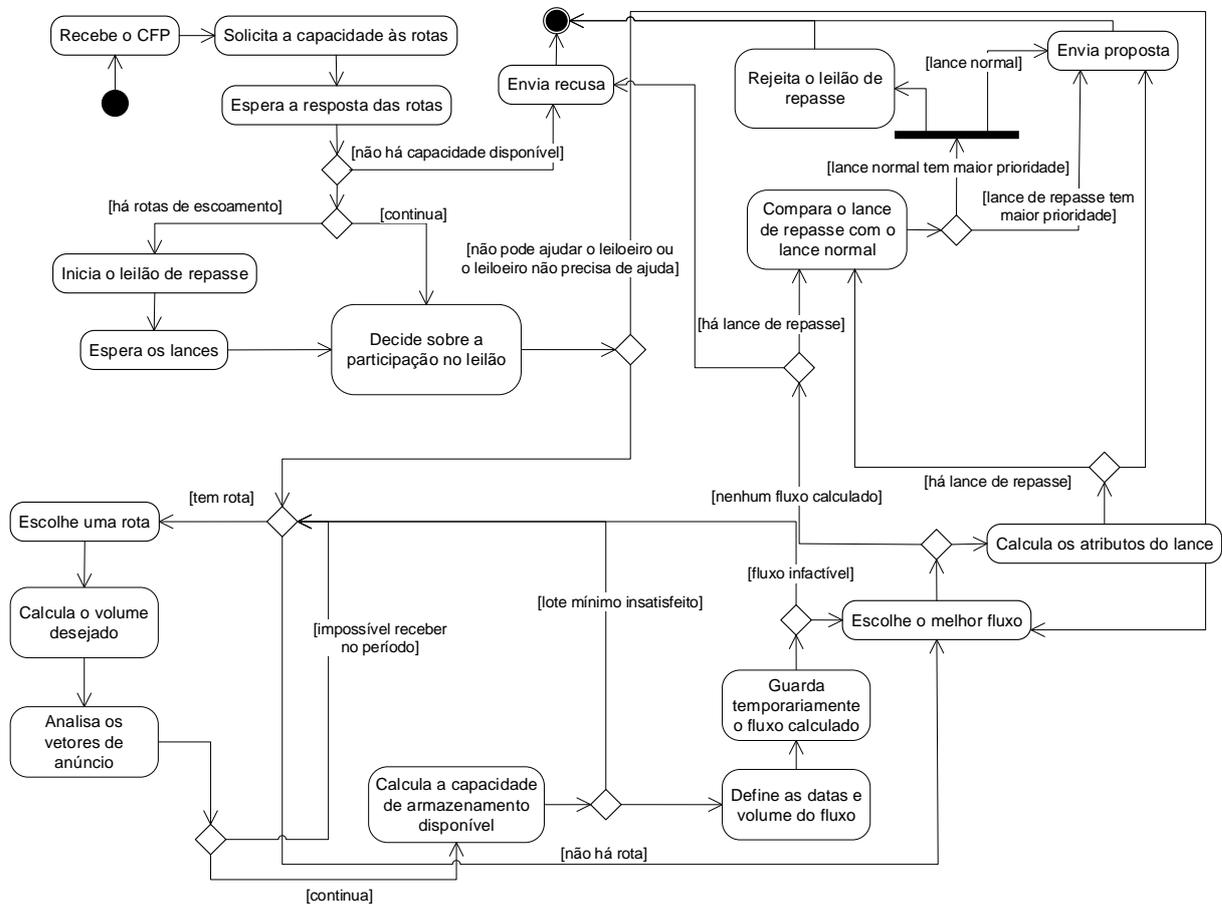


Figura 37 – Diagrama de Atividades de Tratamento do CFP

Estas decisões estão organizadas e descritas nas seguintes subseções: a subseção 4.2.4.2.1 apresenta as decisões iniciais relacionadas à viabilidade de participação no leilão. Caso a participação seja viável, a subseção 4.2.4.2.2 descreve sobre o processo de escolha da rota para o cálculo do lance. Por sua vez, a subseção 4.2.4.2.3 descreve sobre a definição do volume desejado pelo participante; a subseção 4.2.4.2.4 apresenta o processo de escolha das datas de início de escoamento e entrega do produto a fim de transferir o volume desejado e

então, a subseção 4.2.4.2.5 descreve sobre a verificação da capacidade de armazenamento para os dias de entrega e finalmente a subseção 4.2.4.2.6 apresenta a forma de cálculo do tempo de movimentação do produto pela rota selecionada. Com estas etapas e verificações, o participante consegue formar a proposta do fluxo de movimentação. Assim sendo, a subseção 4.2.4.2.7 define os valores do lance que se referem aos custos e à urgência do participante para o recebimento do produto.

4.2.4.2.1 Decisão sobre a participação no leilão

Primeiramente, a base participante deve decidir sobre a viabilidade de concorrer ao produto ofertado por conta da existência de capacidade de transporte. Para isso, o participante b_j calcula o total de capacidade de transporte com o leiloeiro b_i no período corrente per requisitando a capacidade ociosa de transporte $cap_{r,per}$ de cada rota $r \in R_{b_j}^{rec}$ no período corrente per . Caso nenhuma rota $r \in R_{b_j}^{rec}$ tenha capacidade de transporte suficiente para transportar o seu próprio lote mínimo (i.e. $cap_{r,per} < lot_{r,gr}^{min}$) no período corrente, então o participante envia uma mensagem de REFUSE ao leiloeiro b_i . Se houver capacidade suficiente de transporte, o participante b_j verifica a possibilidade de iniciar um leilão de repasse.

Basicamente, um leilão de repasse consiste no repasse do CFP recebido pela base participante b_j para as bases $B_{b_j}^{send} - \{b_i, B_{b_i}^{send}\}$, $B_b^{send} \subseteq B$. Neste caso, a base b_j passa a atuar como leiloeira, estando apta a receber lances de seus participantes. A base b_j seleciona o melhor lance recebido de seus participantes a fim de comparar posteriormente com o seu próprio lance criado no papel de participante a fim de decidir qual dos dois será submetido ao leiloeiro b_i . Vale ressaltar que a base b_j (no papel de leiloeira) somente repassa o CFP (recebido de b_i) para as bases participantes que não receberam o CFP do leiloeiro b_i no leilão corrente e certamente, quando tem pelo menos uma rota $r \in R_{b_j}^{send}$ disponível para transferir o produto. Uma descrição mais completa sobre os leilões de repasse é apresentada na seção 4.2.4.3.

Após a execução do leilão de repasse, quando for realizado, o participante b_j ainda precisa verificar se algumas outras condições são satisfeitas para criar uma proposta para o leiloeiro b_i . Nesta verificação, o participante b_j pode desistir de criar uma proposta quando: (a) o leiloeiro b_i tem um nível de estoque de produto $l_{b_i,per}^{prod}$ ou grupo $l_{b_i,per}^{gr}$ maior do que o seu ou (b) há uma ocorrência de *loop* de transporte.

Prioritariamente, para satisfazer a primeira condição, o participante precisa descobrir em quais faixas de estoque estão situadas a sua curva de estoque do produto $prod$ e do grupo $gr \ni prod$ (i.e. $SC_{b,prod}$ e $SC_{b,gr}$). As faixas de estoque para o produto $l_{b_j,per}^{prod}$ e grupo $l_{b_j,per}^{gr}$ do participante b_j são definidas de acordo com o estoque do produto $e_{b,prod,d}$ e grupo $e_{b,gr,d}$, respectivamente, no último dia d_{per}^f do período corrente per . Após a definição do níveis de estoque, o participante realiza uma comparação com os níveis de estoque do leiloeiro conforme a equação (49).

$$isPropose = \begin{cases} (l_{b_j,per}^{prod} \leq l_{b_i,per}^{prod}), & P^{op} \neq \emptyset \\ (l_{b_j,per}^{prod} < l_{b_i,per}^{prod}) \text{ ou } (l_{b_j,per}^{gr} < l_{b_i,per}^{gr}), & P^{op} = \emptyset, V^{op} \neq \emptyset \\ false, & P^{op} = \emptyset, V^{op} = \emptyset \end{cases} \quad (49)$$

De acordo com o vetor de violação V^{op} e níveis de estoque $l_{b_i,per}^{prod}$ e $l_{b_i,per}^{gr}$ informados pelo leiloeiro, o participante consegue perceber quando o leiloeiro se encontra em uma situação cômoda (i.e. $V^{op} = \emptyset$, ou seja, sem previsão de violação da capacidade máxima de armazenamento) ou de urgência (i.e. $V^{op} \neq \emptyset$, violação da capacidade máxima de armazenamento) em relação à capacidade de armazenamento no período corrente. Caso o leiloeiro se apresente em uma situação cômoda, o participante decidirá sobre o envio de uma proposta baseando-se unicamente em sua necessidade particular do produto $prod$ a fim de alcançar um nível de estoque adequado com respeito aos limites operacionais particulares. Neste caso, o participante opta por participar do leilão apenas quando se encontra em um nível de estoque $l_{b_j,per}^{prod}$ inferior ou igual ao leiloeiro. Com isso, o participante contribui para equilibrar o seu estoque com o estoque do leiloeiro e ainda se manter na faixa de estoque operacional.

Porém, caso o leiloeiro se apresente em uma situação de urgência, o participante decidirá pela participação no leilão levando também em consideração a situação do leiloeiro. Neste caso, o participante poderá agir normalmente na concepção do lance caso ainda presente demanda para o produto (i.e. $P^{op} \neq \emptyset$) ou então poderá agir com a intenção de cooperar com o leiloeiro por meio da aquisição do volume em excesso (i.e. dos vetores V^{op} ou V^{phy}), mesmo quando já apresenta um nível suficiente do produto ou mesmo quando já não tem mais espaço para armazenamento em sua capacidade particular estática. Neste último caso, o participante deve verificar a existência de capacidade ociosa de armazenamento

deixada pelos demais produtos do grupo e se houver, deve fazer uso desta capacidade na tentativa de evitar que o leiloeiro tenha sua capacidade violada.

Durante a definição dos níveis de estoque $l_{b_j,per}^{prod}$ e $l_{b_j,per}^{gr}$, o participante também verifica se a curva de estoque do produto viola os limites (operacional e físico) mínimos particulares $OL_{b,prod,per}^{min}$ ou $OL_{b,prod,per}^{min}$ durante o período corrente per , ou seja, ele define os conjuntos P^{op} e P^{phy} para o período corrente. Se alguma violação for prevista, o participante guarda os dias $d_{b,prod}^{P^{op}} \in P^{op}$ e $d_{b,prod}^{P^{phy}} \in P^{phy}$, se for o caso, referente ao primeiro dia de violação dos respectivos limites mínimos no período corrente, caso contrário, o participante guarda o dia ligeiramente posterior ao último dia do período. Mais precisamente, a escolha do dia de violação operacional e físico é representada nas equações (50) e (51). A definição de tal valor é importante, uma vez que será usado posteriormente para auxiliar na concepção de um fluxo factível.

$$d_{b,prod}^{P^{phy}} = \begin{cases} \min(P^{phy}), & d_{b,prod}^{P^{phy}} \in P^{phy}, P^{phy} \neq \emptyset \\ d_{per}^f + 1, & \text{senão} \end{cases} \quad (50)$$

$$d_{b,prod}^{P^{op}} = \begin{cases} \min(P^{op}), & d_{b,prod}^{P^{op}} \in P^{op}, P^{op} \neq \emptyset \\ d_{per}^f + 1, & \text{senão} \end{cases} \quad (51)$$

Também, ao receber um CFP, o participante deve agir para prevenir a ocorrência de *loops* de movimentações. Um *loop* ocorre quando uma base b_i atua como leiloeira escoando um volume de um determinado produto $prod$ em um período per para uma base b_j e depois a mesma base b_i atua como participante de um leilão de b_j adquirindo outro volume do mesmo produto $prod$ no mesmo período per . Um *loop* também pode ocorrer entre mais de duas bases, como apresenta a Figura 38. Para evitar a ocorrência de *loops*, cada CFP traz uma lista de nomes das bases pelas quais o volume do produto trafegou no período corrente (i.e. $B_{per}^{rec} \subseteq B$), inclusive o nome da base leiloeira. Assim, caso um participante b_j já tenha escoado o produto para alguma base $b_i \in B_{per}^{rec}$ no período corrente per , ele se recusará a participar do leilão realizado por b_i . No exemplo da Figura 38, o agente b_i ao receber um CFP de b_k , se recusa a participar do leilão de b_k , uma vez que o seu próprio nome e do agente b_j (para quem escoou o produto) constam na lista. No entanto, nada impede que b_i escoe o mesmo produto para b_j e consecutivamente b_k . A racionalidade envolvida nesta prática é transformar relações bidirecionais entre duas bases em relações direcionais para um mesmo produto e período.

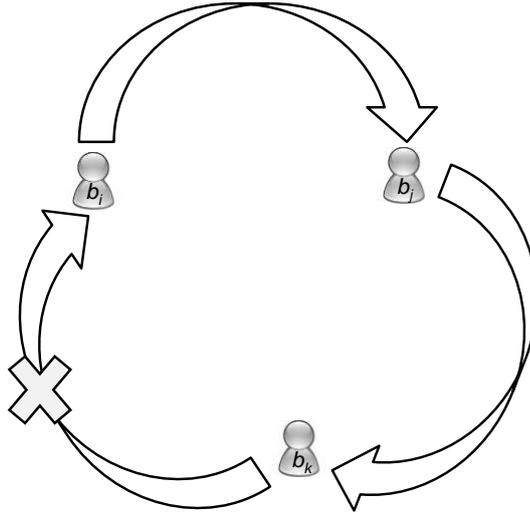


Figura 38 – Loop de Movimentação de Produtos

Ademais, um participante b_j ainda pode se recusar a participar de leilões em outras situações. Estas situações apenas serão conhecidas durante a concepção do fluxo de movimentação f a ser proposto ao leiloeiro b_i no lance $\rho_{b_i, b_j, prod}$. Mais precisamente, um participante b_j também se recusa a participar de um leilão quando: (a) o volume oferecido nos vetores de anúncio E^{op} e E^{phy} , quando for o caso, for menor do que o lote mínimo $lot_{r, gr}^{min}$ de cada rota $r \in R_{b_j, b_i}^{rec}$ de recebimento do produto do leiloeiro; (b) a data de entrega d^{arrive} mais recente possível do fluxo f não ocorre dentro do intervalo do período corrente per_i (i.e. $d^{arrive} \notin per_i$) e (c) não há capacidade mínima de transporte e armazenamento para poder conceber um fluxo, ou seja, a capacidade existente é menor do que o menor lote mínimo $lot_{r, gr}^{min}$ entre as rotas de recebimento R_{b_j, b_i}^{rec} no período corrente.

Nota-se que a maioria das situações para o envio de REFUSE refere-se ao recebimento de produtos no período corrente. É importante que o recebimento ocorra dentro do período corrente para evitar que o produto seja recebido em um período anterior e seja mantido em estoque por muito tempo. Ademais, como os planejamentos já foram finalizados nos períodos anteriores, uma inserção de um novo volume em qualquer curva de estoque de tais períodos pode gerar desequilíbrio de estoque. Também, o volume não pode ser recebido em um dia correspondente a um período posterior ao corrente, pois os leilões daquele período ainda não foram iniciados e por isso não seria uma negociação justa com os demais envolvidos. O participante somente pode aceitar a entrega de um fluxo em um período anterior ao corrente quando a sua curva estiver violando algum limite mínimo neste período (i.e. $P^{op} \neq \emptyset$ ou $P^{phy} \neq \emptyset$). Com este recebimento, o participante pode conseguir evitar ou postergar tal violação.

Por fim, quando um participante decide enviar um REFUSE por falta de capacidade de armazenamento, ele deve guardar o anúncio recebido para posteriormente poder atualizar o seu lance com este leiloeiro, uma vez que um espaço em tanque pode voltar a estar disponível por conta do escoamento de algum volume do próprio produto ou de outros que compartilham o mesmo tanque. Porém, a atualização apenas é processada pelo leiloeiro quando o leilão ainda está ativo. O participante reconhece um leilão ativo quando recebe um CFP e se mantém em estado de espera pelo REJECT-PROPOSAL ou ACCEPT-PROPOSAL correspondente.

4.2.4.2.2 Escolha da rota

Caso o participante b_j deseje continuar o processamento do cálculo do lance ao leiloeiro b_i , ele deve escolher uma rota $r \in R_{b_j, b_i}^{rec}$ para compor o fluxo de movimentação. O participante pode ter várias rotas de recebimento com o leiloeiro e cada qual com diferentes custos, lote mínimo e tempo de transporte. O participante deve priorizar as rotas de menor custo quando estas permitem entregar o volume sem causar um atraso no atendimento da demanda.

Para isso, o participante b_j já conhece a priori o custo k_r de cada rota r e mantém uma lista, com informações destas rotas, ordenada de forma crescente pelos custos. O participante também conhece a priori o lote mínimo $lot_{r, gr}^{min}$ de cada rota r . Estes valores são passados ao agente em sua inicialização, o que evita a necessidade de comunicação com cada agente rota para obter tais informações. Porém, para conhecer a capacidade de transporte $cap_{r, per}$ e o tempo de transporte $trans_{r, gr}^{time}$ de cada rota r , o participante precisa comunicar com os agentes rotas correspondentes. Conforme o diagrama de sequencia apresentado na Figura 34, o participante solicita tais informações para cada agente rota $r \in R_{b_j, b_i}^{rec}$ por meio de uma mensagem de REQUEST-CAPACITY e aguarda a mensagem de resposta com a performativa ROUTE-RESPONSE.

Para um agente rota calcular a sua capacidade ociosa $cap_{r, per}$, ele não precisa solicitar as capacidades de cada agente arco $a_i \in r$. Como já descrito na seção 4.2.2, os próprios agentes arcos notificam suas capacidades aos seus respectivos agentes rotas por meio de mensagens de UPDATE-ARC-CAPACITY. Desta forma, com as informações de capacidade ociosa $cap_{a_i, per}$ de cada arco $a_i \in r$ atualizada, o agente rota pode calcular a sua

capacidade ociosa de transporte $cap_{r,per}$ conforme a equação (52). Basicamente, a capacidade $cap_{r,per}$ consiste na menor capacidade $cap_{a_i,per}$ informada pelos arcos.

$$cap_{r,per} = \min_{i \in |r|} (cap_{a_i,per}) \quad (52)$$

Em relação ao tempo de movimentação, este valor é calculado pelos agentes rotas porque estes apresentam maior conhecimento sobre os arcos que os compõem. Mesmo assim, em nível tático, o cálculo de tempo de transporte não precisa considerar todas as particularidades dos arcos. Caso houvesse necessidade de maior exatidão no cálculo de transporte, considerando, por exemplo, a possibilidade de variação nos valores de vazão $\psi_{a,per}$ de um período per para outro (em caso de arcos do tipo duto), o agente rota precisaria conhecer os reais dias de entrada do volume em cada arco e assim saber o tempo de movimentação em cada um. No entanto, este processo é ineficiente por conta da situação onde vários dias de escoamento precisam ser avaliados a fim de definir aquele que mais satisfaz as necessidades do participante para a composição do fluxo. Além do mais, normalmente as vazões não variam de um período para o outro e as movimentações geralmente ocorrem dentro de um mesmo período, o que faria este processamento ser desnecessário na maioria das vezes.

Desta forma, o modelo considera que o tempo de movimentação $trans_{r,gr}^{time}$ de uma rota r sempre será calculado por meio das informações de vazão $\psi_{a,per}$ (no caso de dutos) ou tempo médio de movimentação $trans_{a,gr}^{time}$ (no caso dos outros tipos de arcos) de cada arco $a \in r$ no período corrente, não importando se a movimentação ocorre entre períodos e as vazões ou tempo de movimentação são diferentes entre tais períodos. Desta forma, o participante considera que este valor não varia de acordo com a escolha dos dias de escoamento. Esta prática é válida neste modelo, pois independente da forma de cálculo, o tempo de movimentação sempre será aproximado, uma vez que os atrasos decorrentes das operações de escalonamento em nível operacional não são considerados em dutos e nem mesmo os reais dias de movimentação pelos outros modais. As particularidades do cálculo do tempo de movimentação serão apresentadas na subseção 4.2.4.2.6.

4.2.4.2.3 Definição do volume desejado

Outro passo importante realizado pelo participante b_j na concepção de um fluxo de movimentação f consiste na definição do volume v a ser solicitado ao leiloeiro b_i no lance

$\rho_{b_i, b_j, prod}$. O participante deve ser cauteloso na definição deste volume, pois a solicitação de um volume demasiadamente alto pode inibir o atendimento da demanda de qualquer outro participante $b_k \in B_{b_i}^{sent}$ e um volume demasiadamente baixo pode levar o participante b_j a participar redundantemente de vários leilões até formar o volume realmente desejado. Este comportamento cauteloso é necessário principalmente porque o participante não apresenta conhecimento sobre a situação de estoque dos demais participantes do leilão. Assim, o participante deve definir um volume moderado e que seja suficiente para que ocorra uma distribuição equilibrada de estoque entre os envolvidos.

Geralmente, um participante solicita apenas parte do volume realmente desejado a fim de dar oportunidade para que os demais participantes também possam adquirir uma parcela do produto. Mesmo que um participante b_j movimente apenas parte do volume desejado, ele terá novas oportunidades em leilões subsequentes para concorrer ao volume complementar, caso o leiloeiro ainda possua volume suficiente para ser ofertado. No entanto, a obtenção de uma parcela do produto já reduz a urgência no recebimento do produto. Por isso, em leilões seguintes, um participante b_j que já adquiriu um montante poderá apresentar uma urgência de atendimento menor do que alguns outros participantes e assim permitir que outro participante b_k vença o leilão e chegue a movimentar outra parcela do produto. Também pode ocorrer de um mesmo participante b_j vencer vários leilões seguidos por continuar apresentando uma grande urgência de atendimento. Assim, um participante se comporta solicitando um volume de forma incremental em relação aos leilões até que o leiloeiro escoar todo o volume do produto ou até que a sua curva de estoque e a do leiloeiro se situem em níveis de estoque que não permitam mais o envio de lances, ou seja, quando estas estão em equilíbrio.

Para realmente definir o volume parcial a ser solicitado, um participante b_j faz uso das faixas de estoque particulares do produto na intenção de limitar tal volume. Primeiramente, o participante b_j compara a sua faixa de estoque $l_{b_j, per}^{prod}$ com a do leiloeiro b_i , $l_{b_i, per}^{prod}$, a fim de definir um intervalo de faixas permissíveis para variação de sua curva de estoque no leilão.

Quando a faixa de estoque do leiloeiro não expressa uma situação de urgência de escoamento (i.e. $V^{op} = \emptyset$, não há previsão de violação de capacidade) no período, a curva de estoque do participante $SC_{b, prod}$ pode terminar o leilão em qualquer das faixas inferior ou igual a do leiloeiro. Porém, caso o leiloeiro esteja em situação de urgência (i.e. $V^{op} \neq \emptyset$, com

previsão de violação de capacidade), a curva de estoque do participante $SC_{b,prod}$ deve preferencialmente terminar o leilão somente em faixas inferiores a do leiloeiro a fim de evitar a violação de seus limites máximos de forma desnecessária. Por definição, a faixa corrente em que a curva de estoque do participante se situa é chamada de faixa mínima e a faixa mais alta do conjunto de faixas permissíveis é chamada de faixa máxima.

Em um leilão, cada participante b_j tenta definir um volume não muito alto e que também seja suficiente para manter a curva de estoque do produto em um nível de estoque adequado. Mais precisamente, o volume desejado (i.e. $v_{prod}^{desired}$) por um participante b_j geralmente corresponde ao volume mínimo para finalizar o período corrente per dentro da faixa operacional $[OL_{b,prod,per}^{max}, OL_{b,prod,per}^{min}]$, conforme a equação (53). No entanto, este volume ainda não consiste no volume final v do fluxo f , ainda há possibilidade dele ser ajustado no decorrer do processo de preparação do lance $\rho_{b_i,b_j,prod}$, principalmente por conta das restrições da capacidade de transporte e de armazenamento.

$$v_{prod}^{desired} = OL_{b,prod,per}^{min} - e_{b,prod,d_{per}^f} \quad (53)$$

Desta forma, é conveniente definir um intervalo de valores para ajuste deste volume. Neste intervalo, o valor mínimo que o volume ajustado pode assumir consiste exatamente no lote mínimo $lot_{r,gr}^{min}$ da rota r a ser usada na concepção do fluxo. Este volume mínimo também pode ser chamado de volume mínimo do fluxo vf_{prod}^{min} . O vf_{prod}^{min} pode ser menor ou ainda maior do que o volume inicialmente desejado $v_{prod}^{desired}$. Caso seja menor, não há problemas, mas quando for maior, faz-se necessário aumentar o volume desejado para respeitar a restrição de lote mínimo da rota. Esta prática está representada na equação (54), que resulta na concepção do volume ajustado v_{prod}^{adj} .

$$v_{prod}^{adj} = \begin{cases} lot_{r,gr}^{min}, & v_{prod}^{desired} < vf_{prod}^{min} \\ v_{prod}^{desired}, & \text{senão} \end{cases} \quad (54)$$

Por sua vez, o volume máximo consiste na diferença entre o limite superior $l_{b_i}^{sup}$ da faixa máxima e o valor de estoque $e_{b_j,prod,d_{per}^f}$ no último dia d_{per}^f do período per . Este volume é chamado de volume máximo v_{prod}^{max} e seu cálculo é representado na equação (55). No entanto, para evitar que o v_{prod}^{max} seja muito alto e fique estagnado em estoque por muitos dias, este volume ainda é restringido, de acordo com a equação (56), para corresponder exatamente

a um número configurável de X dias de consumo do participante ou ao lote mínimo da rota selecionada. O volume correspondente a tais dias de consumo é chamado de volume máximo do fluxo v_{prod}^{max} . Por fim, a equação (57) representa a restrição do volume ajustado v_{prod}^{adj} em relação ao intervalo permissível para variação do volume.

$$v_{prod}^{max} = \begin{cases} l_{bi}^{sup} - e_{b_j,prod,d}^{f_{per}}, & l_{bi}^{sup} - e_{b_j,prod,d}^{f_{per}} \geq lot_{r,gr}^{min} \\ lot_{r,gr}^{min}, & \text{senão} \end{cases} \quad (55)$$

$$v_{f_{prod}}^{max} = \begin{cases} X * bal_{b,prod,d}, & v_{prod}^{max} \geq X * bal_{b,prod,d}, \forall X \in \mathbb{N} \\ v_{prod}^{max}, & \text{senão} \end{cases} \quad (56)$$

$$v_{prod}^{adj} = \begin{cases} v_{prod}^{adj}, & v_{prod}^{adj} \leq v_{f_{prod}}^{max} \\ v_{f_{prod}}^{max}, & \text{senão} \end{cases} \quad (57)$$

Para melhor elucidar a definição do volume do lance, um exemplo prático é ilustrado na Figura 39. A figura apresenta a disposição das curvas de estoque do leiloeiro e participante. A curva de estoque do leiloeiro se situa na faixa 3 e a do participante na faixa 1. Esta configuração permite que o participante movimente um montante para manter a sua curva de estoque nas faixas 1 ou 2, preferencialmente na faixa correspondente à operacional. À esquerda na figura, a cota representa o volume excedente $v_{prod}^{exc} \in V^{op}$ do leiloeiro. À direita, as duas cotas representam respectivamente o volume desejado $v_{prod}^{desired}$ e o volume máximo v_{prod}^{max} . Para simplificar a demonstração, considera-se que tais volumes satisfazem as restrições de volume mínimo e máximo do fluxo.

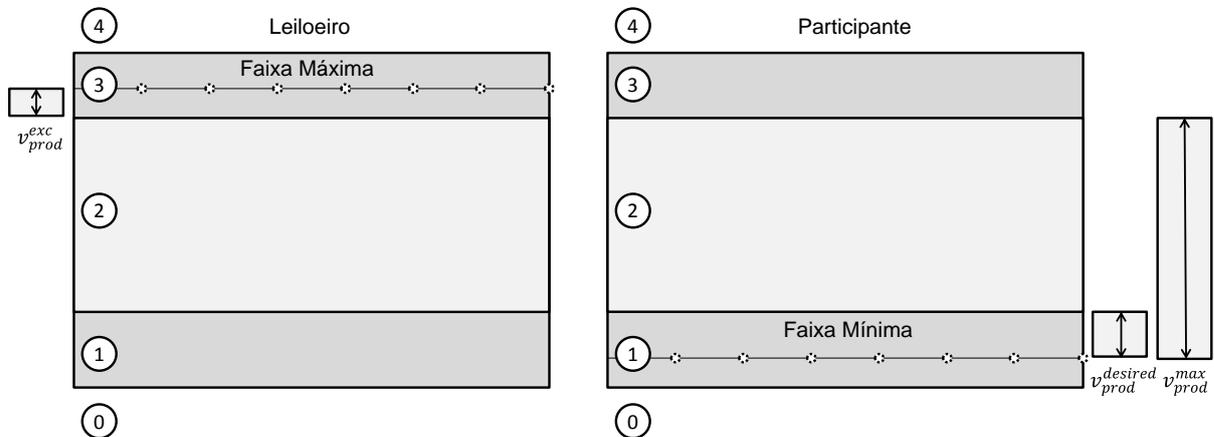


Figura 39 – Definição do Volume Desejado e Volume Máximo

Na figura, mesmo que o leiloeiro esteja violando o limite operacional máximo, o participante age naturalmente na aquisição do produto, uma vez que apresenta interesse e espaço para armazenamento. Porém, quando o participante não apresenta interesse ou espaço para armazenamento em sua capacidade particular do produto, este deve tentar alocar o espaço ocioso dos outros produtos do grupo, se houver. Neste caso, como o leiloeiro informa o volume em excesso v_{prod}^{exc} , o volume ajustado e consecutivamente o espaço a ser solicitado para armazenamento do produto é igual justamente a este volume excedente ou ao lote mínimo da rota, caso o volume excedente seja insuficiente para atender tal restrição. O volume excedente é calculado conforme a equação (58), considerando a possibilidade de violação dos limites operacional e físico máximo. No entanto, o volume ajustado (volume em excesso) pode não caber totalmente na capacidade ociosa do grupo $gr \ni prod$ ou então ser maior do que o volume máximo do fluxo v_{prod}^{fmax} , devendo assim ser restringido conforme a equação (59).

$$v_{prod}^{exc} = \begin{cases} \max(V^{phy}), & V^{phy} \neq \emptyset \\ \max(V^{op}), & V^{op} \neq \emptyset \\ 0, & \text{senão} \end{cases} \quad (58)$$

$$v_{prod}^{adj} = \min(v_{prod}^{adj}, v_{prod}^{exc}, I_{b,per,d}^{op|phy}, v_{prod}^{fmax}), v_{prod}^{adj} > v_{prod}^{min}, v_{prod}^{exc} \neq 0 \quad (59)$$

Neste tipo de leilão, como o participante não apresenta urgência ou interesse particular para movimentação, se houver outros participantes com maior interesse no volume ofertado pelo leiloeiro, algum destes certamente vencerá o leilão, evitando que o participante em questão adquira mais volume do que o necessário. Ademais, quando o participante em questão estiver representando um ponto de consumo, este não deve adquirir produtos na intenção de evitar a violação de estoque do leiloeiro. Apenas refinarias ou terminais devem colaborar neste caso, uma vez que estes geralmente têm rotas para escoar o volume a outras bases.

4.2.4.2.4 Análise dos vetores de anúncio para definição das datas do fluxo

Para definir as datas do fluxo em concepção, o participante inicia a avaliação dos vetores de anúncio. A tarefa de definir os reais dias de escoamento d^{depart} e entrega d^{arrive} é bastante difícil devido às inúmeras combinações possíveis e também por causa das restrições de volume e de factibilidade de estoque a serem respeitadas. Por exemplo, a escolha do dia de

escoamento d^{depart} pode influenciar no tamanho do volume v do fluxo f (dependendo do volume ofertado em tal dia nos vetores de anúncio E^{op} e E^{phy}) e na data de entrega d^{arrive} (pela adição do tempo de transporte $trans_{r,gr}^{time}$), podendo levar a um atraso no atendimento da demanda (i.e. $d^{arrive} > d_{b,prod}^{pop}$) ou mesmo à falta de capacidade para armazenamento na base.

Desta forma, o participante deve analisar os vetores de anúncio E^{op} e E^{phy} a fim de buscar a melhor combinação entre o dia de escoamento, dia de entrega e volume do fluxo. No processo de avaliação, o participante geralmente faz uso apenas do vetor operacional E^{op} . O vetor físico E^{phy} somente é utilizado pelo participante quando sua curva de estoque $SC_{b,prod}$ está situada em uma faixa igual ou abaixo de 1, ou seja, quando $P^{op} \neq \emptyset$ ou $P^{phy} \neq \emptyset$. Mesmo assim, o vetor físico somente será usado quando o vetor operacional não for suficiente para satisfazer a restrição de lote mínimo da rota ou então para evitar atrasos no atendimento da demanda.

Para avaliação do vetor operacional E^{op} , o participante b_j define um intervalo de dias em que o volume do produto $prod$ pode ser escoado a fim de satisfazer a restrição de lote mínimo e evitar entregas com atraso. Este intervalo é chamado de janela de tempo geral de escoamento, sendo representado por $J_{per} \subseteq H$. O início da janela J_{per} corresponde ao dia mínimo $d_{prod}^{initial} \in H$ em que há disponibilidade para o escoamento de um volume igual ou maior ao lote mínimo $lot_{r,gr}^{min}$ da rota r selecionada, tanto que possibilite a chegada do produto dentro do período corrente per_i considerando o tempo de transporte $trans_{r,gr}^{time}$ pela rota r , i.e. $\min(d_{prod}^{initial} + trans_{r,gr}^{time}) \in per_i$. Por sua vez, o dia final da janela $d_{prod}^{end} \in H$ corresponde ao dia máximo em que um volume pode ser escoado para ainda ser entregue no período corrente per_i , ou seja, até o último dia $d_{per_i}^f$ do período corrente per_i . Conforme a equação (60), o dia d_{prod}^{end} é calculado subtraindo o número de dias de movimentação $trans_{r,gr}^{time}$ do último dia $d_{per_i}^f$ do período corrente.

$$d_{prod}^{end} = d_{per_i}^f - trans_{r,gr}^{time}, \quad prod \in gr, d_{per_i}^f \in H, d_{prod}^{end} \in J_{per} \quad (60)$$

Quando a janela calculada for vazia (i.e. $J_{per} = \emptyset$), significa que o volume oferecido pelo leiloeiro b_j no vetor de anúncio E^{op} é menor do que o mínimo da rota ou então que não é possível entregar o produto no período corrente per_i por meio da rota selecionada. Neste caso, o participante b_j deve tentar outra rota. Se as janelas calculadas para qualquer rota $r \in R_{b_j b_i}^{rec}$

forem vazias, então o participante deve passar a analisar o vetor físico E^{phy} , uma vez que este vetor apresenta um volume maior que pode satisfazer a restrição de lote mínimo de alguma rota. Para isso, se faz necessário formar um vetor resultante pela soma dos volumes ofertados em ambos os vetores E^{op} e E^{phy} , uma vez que são complementares. O vetor resultante será analisado e uma nova janela de tempo J_{per} deve ser calculada para este vetor. Caso a nova janela J_{per} também for vazia, então o participante enviará uma mensagem de REFUSE ao leiloeiro por não haver possibilidade de movimentação.

Caso contrário, independente do vetor selecionado, o participante deve continuar com a concepção do fluxo. Quando a curva de estoque $SC_{b_j,prod}$ do participante violar o limite mínimo operacional particular, o participante deve determinar um dia máximo $d_{prod}^{feasible}$ para que o volume seja escoado a fim de ser entregue sem atraso no período corrente, i.e. $\max(d_{prod}^{feasible} + trans_{r,gr}^{time}) < d_{b,prod}^{pop}$. Para isso, o participante faz uso da equação (61), onde o dia de violação $d_{b,prod}^{pop}$ é o dia de referência para o cálculo.

Mais precisamente, o dia $d_{prod}^{feasible}$ é usado como um marco para a divisão da janela de tempo J_{per} em duas subjanelas: a subjanela factível $J'_{per} \subseteq J_{per}$ e a infactível $J''_{per} \subseteq J_{per}$. A subjanela factível J'_{per} é formada por um intervalo de dias de escoamento que permitem a concepção de fluxos factíveis, ou seja, com entregas sem atraso. Por sua vez, a subjanela infactível J''_{per} é formada pelo subintervalo de dias restantes que apenas permitem a concepção de fluxos infactíveis (i.e. $J''_{per} = J_{per} - J'_{per}$). Quando a curva de estoque $SC_{b_j,prod}$ do participante não violar o limite mínimo $OL_{b_j,prod,d}^{min}$ no período corrente, toda a janela de escoamento é considerada como factível, i.e. $J'_{per} = J_{per}$.

$$d_{prod}^{feasible} = \begin{cases} d_{b,prod}^{pop} - trans_{r,gr}^{time}, & d_{b,prod}^{pop} - trans_{r,gr}^{time} \geq 0 \\ 0, & \text{senão} \end{cases}, d_{b,prod}^{pop} \in H \quad (61)$$

No entanto, quando o vetor operacional E^{op} estiver em análise e este apresentar uma janela de tempo factível vazia (i.e. $J'_{per} = \emptyset$), o participante imediatamente inicia a análise do vetor físico E^{phy} . Esta decisão ocorre porque o vetor físico E^{phy} geralmente apresenta disponibilidade de volume em dias mais prévios do que o vetor E^{op} . Assim, o participante pode fazer uso deste volume para tentar conceber um fluxo factível.

Para melhor elucidar a formação das janelas, a Figura 40 apresenta um exemplo formado por um leiloeiro b_i e um participante b_j que negociam a movimentação por meio de

uma rota r . A rota possui um tempo de movimentação de 2 dias (i.e. $trans_{r,gr}^{time} = 2$) e um lote mínimo de 10 u.v (i.e. $lot_{r,gr}^{min} = 10$). Na figura, a tabela superior representa o vetor de anúncio E^{op} do leiloeiro b_i e a tabela inferior representa a curva de estoque $SC_{b_i,prod}$ do participante b_j . Neste exemplo, a janela de escoamento J_{per} é formada pelo intervalo correspondente aos dias 2 ao 5, inclusive (i.e. $d_{prod}^{initial} = 2$ e $d_{prod}^{end} = 5$). Este intervalo já garante que o volume a ser escoado satisfaz a restrição de lote mínimo, mas ainda não garante que as entregas ocorrerão sem atrasos. Assim, considerando que a curva de estoque do participante viola o limite mínimo operacional particular no dia 6 (i.e. $d_{b,prod}^{pop} = 6$), a janela de escoamento é subdividida em factível e infactível exatamente no dia 4 (i.e. $d_{prod}^{feasible} = 4$), uma vez que o tempo de transporte é de 2 dias.

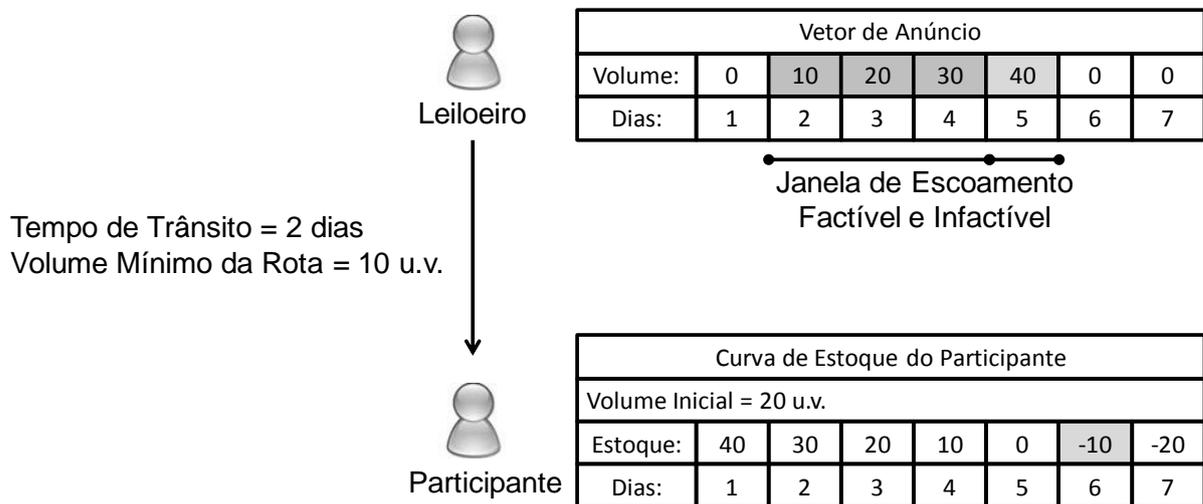


Figura 40 – Exemplo de Janela de Tempo de Escoamento

O participante analisa as subjanelas J'_{per} e J''_{per} , uma após a outra e, tais avaliações ocorrem em duas interações diferentes durante a análise das rotas. As rotas $R_{b_j b_i}^{rec}$ já estão ordenadas por menor custo de transporte k_r . Na primeira iteração, o participante b_j avalia cada rota $r \in R_{b_j b_i}^{rec}$ considerando apenas a janela factível J'_{per} . Este processo ocorre até encontrar uma rota que permita a entrega sem atraso do produto ao participante (i.e. $d^{arrive} < d_{b,prod}^{pop}$), considerando a capacidade de transporte e de armazenamento. Caso todas as rotas tenham sido avaliadas e nenhuma contribua para a formação de um fluxo factível, elas são avaliadas novamente, mas agora considerando apenas a subjanela infactível J''_{per} .

O participante é impossibilitado de formar um fluxo factível quando a janela factível é vazia (i.e. $J'_{per} = \emptyset$) ou quando não há capacidade de transporte ou capacidade de armazenamento mínima para o volume correspondente ao lote mínimo da rota em análise. Na

segunda iteração, o participante seleciona a rota que entrega o produto com menos dias de atraso (i.e. $\min_{v_r \in R_b^{rec}} (|d_{b,prod}^{Pop} - d^{arrive}|)$). Logicamente, caso mais de uma rota apresente o mesmo dia de entrega com atraso, o desempate ocorrerá por custo de transporte.

Na análise da subjanela factível, o participante pode selecionar qualquer dia de escoamento d^{depart} nesta janela para compor o fluxo (i.e. $d^{depart} \in J'_{per}$), mas ele seleciona o dia d^{depart} que possui o volume mais próximo do volume desejado v_{prod}^{adj} calculado anteriormente. Mesmo que este volume corresponda aos dias mais finais da subjanela J'_{per} devido à forma geralmente crescente da curva de estoque do leiloeiro, o volume não será demasiadamente grande, uma vez que ele já foi ajustado em sua definição. Assim, o participante deve buscar movimentar este volume ou um aproximado, pois a movimentação de um volume muito baixo poderia contribuir para a ineficiência da solução, uma vez que o leiloeiro precisaria realizar mais leilões para escoar o volume remanescente e o participante teria que participar de mais leilões para adquirir o volume desejado.

Ademais, o participante deve percorrer a subjanela J'_{per} a fim de também priorizar a escolha do dia mais prévio possível que apresente o volume desejado v_{prod}^{adj} . Esta prática é importante para que o leiloeiro apresente maior espaço de armazenamento ocioso em dias mais prévios a fim de armazenar sua produção ou mesmo outros produtos que consome. Porém, nem sempre é possível o escoamento do volume desejado no primeiro dia em que ele está disponível. Esta situação pode ocorrer por falta de espaço para armazenamento em tanque no dia de entrega calculado, uma vez que os outros produtos do grupo podem estar ocupando uma capacidade do tanque acima de seus limites particulares.

Nestes casos, o participante deve selecionar um dia mais posterior para o escoamento até que haja espaço para armazenamento pelo menos para satisfazer o lote mínimo da rota. Se não houver, ele deve proceder com a avaliação de outra rota. Por fim, se não for obtido sucesso com nenhuma rota, então o participante deve enviar um REFUSE ao leiloeiro. Quando o participante envia REFUSE por falta de espaço de armazenamento, ele guarda o CFP para poder atualizar o lance quando perceber a disponibilidade de um novo espaço ocioso em tanque. Este espaço pode ter sido liberado pelo escoamento do mesmo ou de outro produto do grupo.

4.2.4.2.5 Análise da capacidade de armazenamento

Para descobrir se há disponibilidade de espaço para armazenamento, o participante precisa analisar a estrutura de espaços ociosos operacional $I_{b,per,d}^{op}$ e físico $I_{b,per,d}^{phy}$ quando for o caso, para o grupo $gr \ni prod.$ O participante verifica o espaço para armazenamento apenas para os dias do período corrente.

O participante prioritariamente tenta alocar apenas a capacidade ociosa operacional $I_{b,per,d}^{op}$. Quando a capacidade $I_{b,per,d}^{op}$ é insuficiente para acomodar o volume em um dado dia de chegada d^{arrive} , o participante pode decidir retardar a chegada do volume escolhendo um dia de escoamento d^{depart} mais posterior. De acordo com a forma natural das curvas de estoque, quanto mais tarde o produto for entregue, mais capacidade estará disponível para armazenamento. Com este atraso, o participante pode conseguir evitar a necessidade de alocação da capacidade ociosa física $I_{b,per,d}^{phy}$.

Para ilustrar esta situação, a Figura 41 apresenta diferentes formas de curvas de estoque e destaca (em cinza) em cada representação de tanque os respectivos espaços ociosos para armazenamento. Os gráficos a,b e c representam um tanque com um único produto e o gráfico d representa um tanque com dois produtos. Pela análise de tais gráficos, percebe-se que quanto mais tarde é a entrega, geralmente há mais capacidade ociosa para armazenamento.

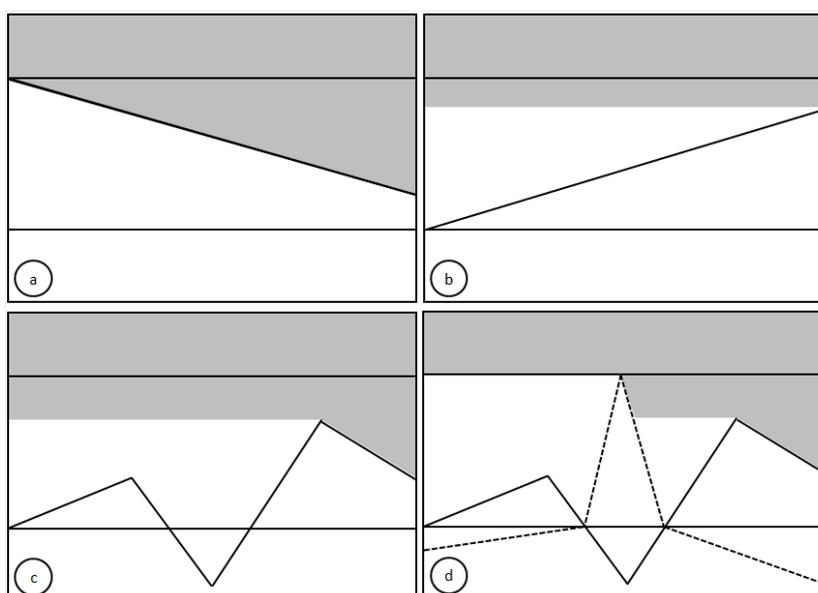


Figura 41 – Espaços Ociosos para Armazenamento em Tanque

No entanto, além da capacidade ociosa, a capacidade de armazenamento também deve contabilizar o volume em déficit da curva de estoque a partir de um dado dia de chegada

d^{arrive} . Quando a curva de estoque está abaixo do físico mínimo $PL_{b,prod,d}^{min}$ em um dado dia d , considera-se que a demanda ainda existe para este dia e precisa ser suprida. Nesta situação, a diferença entre o limite físico mínimo $PL_{b,prod,d}^{min}$ e o estoque $e_{b,prod,d} < PL_{b,prod,d}^{min}$ influencia na quantidade de volume possível de ser recebido pelo participante, pois considera-se que esta diferença é imediatamente consumida devido a pendência de estoque existente. Como esta diferença não ocupa a capacidade ociosa, ela é incrementada à capacidade de armazenamento operacional $cap_{b,per,d}^{op}$ e física $cap_{b,per,d}^{phy}$ conforme descrito nas equações (62) e (63).

Nestas equações, as capacidades operacional $cap_{b,per,d}^{op}$ e física $cap_{b,per,d}^{phy}$ são calculadas a partir do dia de chegada d^{arrive} até o último dia d_{per}^f do período corrente per . Neste intervalo, se faz necessário calcular a menor capacidade ociosa e o menor déficit para evitar violações indesejadas do respectivo limite máximo devido ao consequente incremento do volume na curva de estoque, caso o leiloeiro resolva atender ao pedido do participante.

Como dito, o participante preferencialmente opta pelo uso da capacidade operacional $cap_{b,per,d}^{op}$ para a definição do volume do fluxo em concepção. No entanto, caso o participante esteja violando o seu limite mínimo operacional (i.e. $P^{op} \neq \emptyset$) ou o leiloeiro esteja violando o seu limite máximo físico $V^{phy} \neq \emptyset$ e a capacidade operacional seja insuficiente para armazenar o volume v_{prod}^{adj} previamente calculado, então o participante passa a fazer uso da capacidade física $cap_{b,per,d}^{phy}$ para compor o lance. Esta decisão está representada na equação (64).

$$cap_{b,per,d}^{op} = \begin{cases} \min_{d \leq d_{per}^f} (I_{b,per,d}^{op}) + \min_{d \leq d_{per}^f} |PL_{b,prod,d}^{min} - e_{b,prod,d}|, P^{phy} \neq \emptyset \\ \min_{d \leq d_{per}^f} (I_{b,per,d}^{op}), \quad \text{senão} \end{cases}, d = d^{arrive} \quad (62)$$

$$cap_{b,per,d}^{phy} = \begin{cases} \min_{d \leq d_{per}^f} (I_{b,per,d}^{phy}) + \min_{d \leq d_{per}^f} |PL_{b,prod,d}^{min} - e_{b,prod,d}|, P^{phy} \neq \emptyset \\ \min_{d \leq d_{per}^f} (I_{b,per,d}^{phy}), \quad \text{senão} \end{cases}, d = d^{arrive} \quad (63)$$

$$cap_{b,per,d} = \begin{cases} cap_{b,per,d}^{phy}, cap_{b,per,d}^{op} < v_{prod}^{adj}, (V^{phy} \neq \emptyset \text{ ou } P^{op} \neq \emptyset) \\ cap_{b,per,d}^{op}, \quad \text{senão} \end{cases} \quad (64)$$

4.2.4.2.6 Cálculo do tempo de transporte

Tal como foi brevemente descrito anteriormente, o tempo de transporte de um dado volume v para a concepção de um fluxo f a ser transportado pela rota r é calculado pelo agente rota (representando a rota r) quando solicitado pela base participante b_j . Nesta solicitação, o participante informa o período corrente per referente ao leilão em que participa para que o agente rota faça uso apenas das informações de volume χ_a e vazão $\psi_{a,per}$ de cada arco $a \in r$ deste período para calcular o tempo de transporte $trans_{r,gr}^{time}$ pela respectiva rota. O agente rota não precisa comunicar com os agentes arcos que o compõem para obter tais informações, pois estas já foram recebidas do agente gerente na fase de inicialização dos agentes.

Como uma rota r pode ser composta por diferentes tipos de arcos, apenas o tempo de transporte pelos dutos exige um maior esforço de cálculo, pois o tempo de movimentação (médio) dos demais arcos já é conhecido a priori (i.e. informado no XML de Entrada). Quando a rota é composta por dutos, o participante deve também considerar o tempo de duração das operações de pulmão entre dois dutos adjacentes, sendo que este tempo agrega um certo atraso no transporte do produto.

Para melhor demonstrar como o tempo de movimentação é calculado no modelo, a Figura 42 mostra a transferência de uma batelada de 100 u.v., dia após dia, por uma rota formada por quatro dutos. Cada dia d é representado por uma linha da tabela e cada bloco numerado consiste em um volume do produto correspondente à menor vazão da rota, ou seja, ao volume de 10 u.v. por causa do arco a_2 . Também, o exemplo contempla três situações de disposição de dutos adjacentes em virtude de suas vazões, ou seja, vazões decrescentes entre os arcos a_1 e a_2 (i.e. $\psi_{a_i,per} > \psi_{a_{i+1},per}$), vazões crescentes (i.e. operação pulmão, onde $\psi_{a_i,per} < \psi_{a_{i+1},per}$) entre os arcos a_2 e a_3 e vazões iguais (i.e. operação de passagem, onde $\psi_{a_i,per} = \psi_{a_{i+1},per}$) entre os arcos a_3 e a_4 .

Ademais, o exemplo também permite demonstrar as movimentações paralelas que ocorrem entre os dutos a_2 e a_3 conectados por um tanque pulmão. Neste caso, o volume $\psi_{a_3,per}$ correspondente à vazão do duto corrente a_3 é bombeado do tanque do pulmão para dentro deste duto no mesmo intervalo de tempo em que o tanque pulmão recebe o volume

$\psi_{a_2,per}$ correspondente à vazão do duto anterior a_2 . O bombeamento ocorre somente após o pulmão possuir o volume referente à maior vazão entre os dois dutos, ou seja, a vazão $\psi_{a_3,per}$. Quando não há operação de pulmão, a passagem do volume de um duto para o outro ocorre no mesmo dia. No modelo, considera-se que os dutos sempre estarão cheios do mesmo ou de outros produtos a fim de manter uma movimentação constante de acordo com suas vazões e por isso o tempo de movimentação é independente do volume a ser movimentado. Também, considera-se que todos os produtos suportados por um duto qualquer apresentam a mesma vazão.

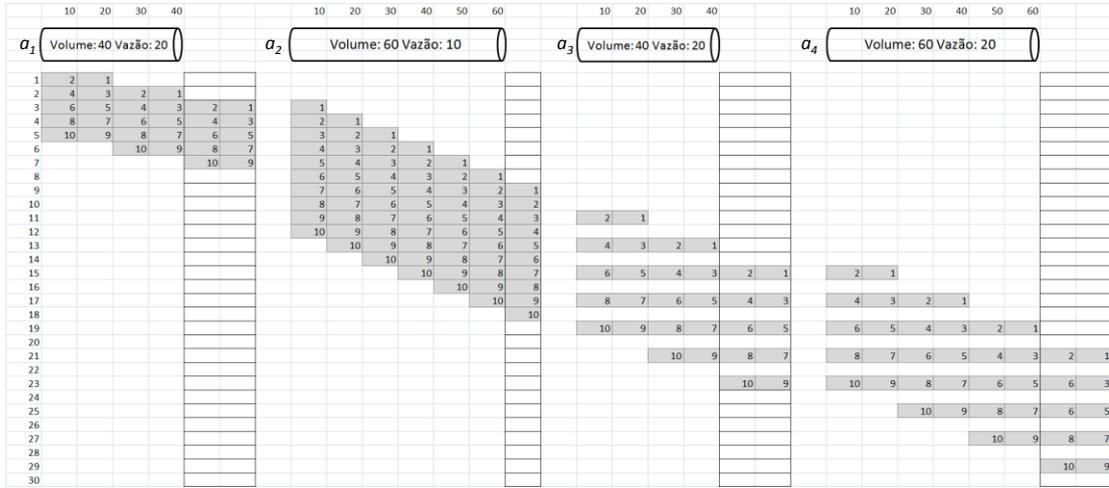


Figura 42 – Simulação de uma Movimentação em uma Rota Composta por Dutos

O tempo de movimentação é calculado incrementalmente em relação aos arcos, ou seja, um arco por vez. Quando o arco a_i em avaliação não é do tipo duto, não há necessidade de cálculo do seu tempo de transporte, uma vez que o tempo médio de transporte por tal modal já é informado no arquivo de entrada. Desta forma, o tempo de transporte $trans_{r,gr}^{time}$ pela rota r de um produto $prod \in gr$ é calculado de acordo com a equação (67). Para auxiliar neste cálculo, considera-se ψ_r como um conjunto de vazões de todos os arcos da rota, conforme a definição (65). Quando um arco não se refere a um duto, considera-se que tal arco apresenta vazão infinita (i.e. $\psi_{a_i,per} = \infty$).

$$\psi_r = \{\psi_{a_1,per}, \dots, \psi_{a_n,per}\}, \text{ onde } \psi_{a_i,per} = \infty \text{ se arco } \neq \text{duto} \quad (65)$$

Basicamente, o tempo de transporte de uma rota r consiste na soma dos tempos de movimentação $trans_{a_i,gr}^{time}$ de cada arco a que compõem a rota r e o tempo de descarga $unl_{r,gr}^{time}$ do primeiro volume da batelada (i.e. cabeça da batelada) no último arco da rota. O tempo de descarga $unl_{r,gr}^{time}$ é calculado conforme a equação (66). Este valor é calculado de

acordo com a existência de operação de pulmão nos arcos anteriores ao arco a_i em avaliação. Da mesma forma, o tempo de transporte por um arco a_i do tipo duto também é calculado considerando a possibilidade de operações de pulmão entre os seus arcos adjacentes conforme a equação (68). O tempo $trans_{a_i,gr}^{time}$ não considera o atraso decorrente da descarga do produto no último arco da rota.

$$unl_{r,gr}^{time} = \begin{cases} \frac{\psi_{a_{|r|},per}}{\min(\psi_r)}, & \forall k \geq 1 \exists (\psi_{a_{i-k},per} < \psi_{a_i,per}) \\ 1, & \text{senão} \end{cases} \quad (66)$$

$$trans_{r,gr}^{time} = \sum_{i=1}^n trans_{a_i,gr}^{time} + unl_{r,gr}^{time} \quad (67)$$

$$trans_{a_i,gr}^{time} = \begin{cases} trans_{a_i,gr}^{time}, & \text{arco} \neq \text{duto} \\ \frac{\chi_{a_i}}{\min_{1 \leq i}(\psi_r)}, & \psi_{a_{i-1},per} \geq \psi_{a_i,per} \text{ ou } i = 1 \\ \frac{\chi_{a_i} + x}{\min_{1 \leq i}(\psi_r)} + 1, & \psi_{a_{i-1},per} < \psi_{a_i,per} \\ \text{onde } (\chi_{a_i} + x) \bmod \min_{1 \leq i}(\psi_r) = 0 \end{cases} \quad (68)$$

Mais precisamente, no cálculo do tempo de transporte do primeiro arco a_1 ou de um arco que não é imediatamente precedido por uma operação de pulmão (i.e. $\psi_{a_i,per} \leq \psi_{a_{i-1},per}$), o tempo é calculado por meio da menor vazão entre os arcos já avaliados e o arco corrente a_i , uma vez que tal vazão é responsável pelas paradas da batelada em dutos. Mas quando um arco é precedido por uma operação de pulmão (i.e. $\psi_{a_i,per} > \psi_{a_{i-1},per}$), o tempo de tal operação é calculado com uma pequena variação.

O tempo da operação pulmão é calculado de uma única vez para um volume χ_{a_i} correspondente ao preenchimento do arco corrente a_i . Como o bombeamento do tanque de pulmão para o duto a_i ocorre somente após o acúmulo do volume correspondente a vazão $\psi_{a_i,per}$ do duto e a menor unidade de tempo considerada é dia, então se faz necessário somar 1 dia ao tempo de movimentação do arco. Em um caso particular, quando o volume χ_{a_i} do arco em avaliação a_i não é múltiplo da vazão $\psi_{a_{i-1},per}$ do arco anterior a_{i-1} , se faz necessário definir um valor mínimo de x que somado ao volume χ_{a_i} do duto corrente corresponda a um

múltiplo da menor vazão da rota. Esta prática permite arredondar o tempo das operações pulmão para dias.

A equação (68) não contempla o tempo despendido para reversão de dutos, pois o modelo considera que os dutos já se encontram revertidos para a realização de uma movimentação. Na verdade, há certa dificuldade em definir as operações de reversão com precisão em nível de planejamento porque a granularidade de tempo dos arcos é muito mais alta do que em nível operacional. Por conta disto, principalmente quando a granularidade de tempo dos arcos refere-se a um período, se torna difícil determinar com exatidão o sentido de um fluxo em duto em um dado momento no horizonte de planejamento. Mesmo que uma pequena adaptação na equação (68) permita definir o dia de entrada da cabeça da batelada em cada arco e assim propiciar a verificação do sentido do fluxo do duto em tal dia, ainda não há como garantir que leilões posteriores formem fluxos de movimentação em dias anteriores e venham mudar o sentido de fluxo em um duto considerado por um fluxo movimentado anteriormente. Esta dificuldade em contabilizar o tempo de reversão ocorre por que os fluxos são concebidos em leilões sem a preocupação em manter uma sequencialidade ou escalonamento. Desta forma, o modelo corrente apenas faz uso das informações de vazão e custos de sentido reverso de acordo com o sentido da rota, não calculando o tempo despendido para reverter um sentido de fluxo em um duto.

4.2.4.2.7 Cálculo do Valor do Lance

Após a concepção do fluxo de movimentação f a ser proposto no lance $\rho_{b_i, b_j, prod} = (f, \delta, \eta, k)$, o participante b_j precisa definir os atributos do lance que expressam a sua prioridade de atendimento pela base leiloeira b_i . Basicamente, um lance é composto por três diferentes atributos: κ_r , $\delta_{b, prod}$ e $\eta_{b, prod}$. O atributo κ_r consiste no próprio custo da rota r selecionada para compor o fluxo. O atributo $\delta_{b_j, prod}$ consiste no grau de urgência de atendimento da curva de estoque do participante b_j em relação ao estoque oferecido pelo leiloeiro corrente b_i e o atributo $\eta_{b_j, prod}$ consiste no grau de urgência do participante em relação à disponibilidade de estoque do produto nas bases leiloeiras $B_{b_j}^{rec} \subseteq B$ e capacidades ociosas nas rotas $R_{b_j}^{rec} \subseteq R$.

Mais precisamente, o atributo $\delta_{b, prod}$ reflete a proximidade do dia de entrega d^{arrive} do fluxo f aos dias previstos para a curva de estoque $SC_{b, prod}$ violar o mínimo operacional e físico, quando houver violação. Tais dias de violação são representados por $d_{b, prod}^{pop}$ e $d_{b, prod}^{pphy}$,

os quais foram definidos nas equações (50) e (51), respectivamente. Desta forma, conforme a equação (69), o valor do grau de urgência de estoque $\delta_{b,prod}$ é deduzido da soma dos valores de grau de urgência operacional $\delta_{b,prod}^{op}$ e físico $\delta_{b,prod}^{phy}$ que tratam simetricamente fluxos factíveis e infactíveis. Quando não houver violações de estoque no período corrente, o valor de $\delta_{b,prod}$ é zero.

$$\delta_{b,prod} = \delta_{b,prod}^{op} + \delta_{b,prod}^{phy}, \quad \text{onde}$$

$$\delta_{b,prod}^{op} = \begin{cases} 1 - \frac{|d_{b,prod}^{arrive} - d_{b,prod}^{p^{op}}|}{\sum_{i=1}^{|H|} |per_i|}, & d_{b,prod}^{p^{op}} \neq \emptyset \\ 0, & \text{senão} \end{cases} \quad (69)$$

$$\delta_{b,prod}^{phy} = \begin{cases} 1 - \frac{|d_{b,prod}^{arrive} - d_{b,prod}^{p^{phy}}|}{\sum_{i=1}^{|H|} |per_i|}, & d_{b,prod}^{p^{phy}} \neq \emptyset \\ 0, & \text{senão} \end{cases}$$

Para melhor elucidar o cálculo do $\delta_{b,prod}$, a Figura 43 mostra a direção do crescimento do grau de urgência operacional e físico em relação ao dia em que a curva de estoque do participante viola os respectivos limites mínimos. Há uma simetria no cálculo do grau de urgência para fluxos factíveis e infactíveis. No entanto, o participante sempre busca definir fluxos factíveis (i.e. sem atraso). Um fluxo infactível (i.e. com atraso) apenas é proposto quando não há a possibilidade de conceber um fluxo factível.

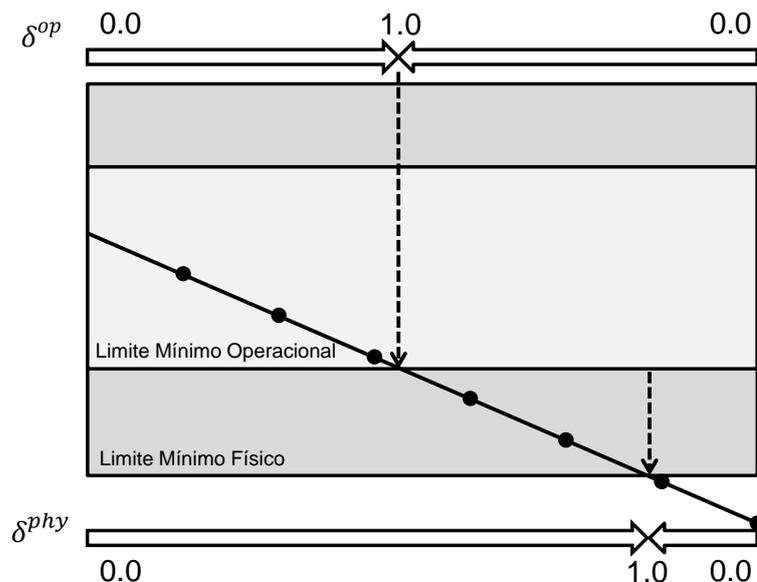


Figura 43 – Grau de Urgência de Estoque em Relação ao Dia de Violação da Capacidade Operacional

Porém, em algumas situações, o uso isolado do grau de urgência de estoque $\delta_{b,prod}$ pode não contribuir para a formação de um conjunto satisfatório de fluxos de movimentação,

uma vez que o $\delta_{b,prod}$ é calculado em relação a apenas um leiloeiro, desconsiderando as possibilidades de aquisição do produto com outros leiloeiros $B_{b_j}^{rec}$ e as capacidades totais de transporte disponível em cada rota $r \in R_{b_j}^{rec}$. Portanto, se faz necessário também calcular o grau de urgência das rotas $\eta_{b,prod}$. O $\eta_{b,prod}$ é calculado conforme a equação (70). Nesta definição, o ϑ_{prod}^{total} representa o volume factível mais alto que pode ser recebido pelo participante b_j no período corrente de cada leiloeiro b_i considerando a capacidade disponível das rotas de recebimento. O atributo $v_{prod}^{desired}$ representa o volume calculado pelo participante para que a curva de estoque $SC_{b,prod}$ finalize o período corrente exatamente no limite operacional mínimo $OL_{b,prod,per}^{min}$. O volume $v_{prod}^{desired}$ é acrescido por uma percentagem K (i.e. o default é 40%, ou seja, $K=1.4$) para formar uma margem de volume que afeta o cálculo do $\eta_{b,prod}$. Desta forma, considera-se que $\eta_{b,prod}$ é zero quando ϑ_{prod}^{total} é maior do que $v_{prod}^{desired} * K$.

$$\eta_{b,prod} = \begin{cases} 1 - \frac{\vartheta_{prod}^{total}}{v_{prod}^{desired} * K}, & \vartheta_{prod}^{total} \leq v_{prod}^{desired} \\ 0, & v_{prod}^{desired} = 0 \text{ or } \vartheta_{prod}^{total} > v_{prod}^{desired} * K \end{cases}, \quad \text{onde } \vartheta_{prod}^{total} = \sum_b^{B^{rec}} \vartheta_{prod}(b) \quad (70)$$

Portanto, o $\eta_{b,prod}$ permite que o participante expresse o seu grau de urgência em relação ao volume que consegue receber de seus leiloeiros em virtude das capacidades disponíveis nas rotas. Este é um atributo importante para priorizar participantes com poucas opções de recebimento do volume e principalmente quando os segmentos das rotas são compartilhados.

Após o participante b_j definir o fluxo f e os três atributos do lance, o participante está pronto para enviar o seu lance. Porém, caso a base participante b_j tenha realizado um leilão de repasse e recebido um lance em tal leilão, o participante b_j deve decidir sobre qual lance enviar ao leiloeiro b_i , ou seja, o lance de repasse ou o lance normal recém-calculado. A decisão do participante ocorre pela comparação dos dois lances em termos de grau de urgência de estoque $\delta_{b,prod}$. Certamente, um lance com maior $\delta_{b,prod}$ representa o participante com maior prioridade em receber o produto. Em caso de empate, o participante b_j escolhe o lance normal, uma vez que este volume pode ser distribuído para as bases $B_{b_j}^{send}$ em leilões futuros iniciados por b_j .

4.2.4.3 Subfase de repasse do anúncio

Um leilão de repasse é iniciado quando uma base participante b_j em um leilão de uma base b_i tem ao menos uma rota $r \in R_{b_i}^{send}$ para transferir um produto $prod_j$ para as bases $B_{b_i}^{send} - \{b_j, B_{b_j}^{send}\}$, $B_b^{send} \subseteq B$, ou seja, a base b_j somente repassa o anúncio para os participantes que não receberam o anúncio original de b_i no leilão corrente. O diagrama de sequência na Figura 44 ilustra a interação entre três bases (i.e. b_i , b_j e b_k) na execução de um leilão de repasse.

Conforme a interação expressa na figura, a base b_j ao receber o CFP de b_i , passa a executar o papel de leiloeiro (i.e. uma nova instância de um comportamento FSM) a fim de abrir um novo leilão. A base b_j modifica levemente o conteúdo do CFP recebido de b_i (i.e. altera os atributos tempo de transporte, lote mínimo, custo da rota e outros de controle), submete tal CFP para os seus participantes e espera pelos lances. Quando a base b_j (no papel de leiloeiro) recebe todos os lances, ela seleciona o melhor lance e volta a executar o papel de participante. Na sequência, a base participante b_j incrementa o lance de repasse com seus dados (e.g. custo da rota de b_j com o leiloeiro oficial b_i) para uma avaliação posterior sobre a viabilidade de envio deste lance ao leiloeiro oficial b_i em detrimento ao lance normal a ser calculado pela instância corrente do participante b_j no leilão de b_i . O lance de repasse somente será enviado ao leiloeiro oficial b_i se sua urgência for maior do que a do lance normal.

Caso a base participante b_j tenha enviado o lance de repasse ao b_i , ela espera normalmente pelas mensagens de aceite ou rejeição. Ao receber uma mensagem de rejeição de b_i , a base b_j encaminha imediatamente esta mensagem ao seu participante b_k a fim de informá-lo sobre a impossibilidade de transferência do produto. O mesmo também pode ocorrer quando a base b_j recebe uma mensagem de aceite de b_i . Porém, neste caso, o participante b_j precisa verificar se a capacidade da rota de transferência de b_i para b_j ainda está disponível. Se não mais estiver, b_j encaminha a mensagem de rejeição ao b_k . Caso contrário, b_j encaminha a mensagem de aceite ao participante b_k a fim de saber se ele ainda está interessado no volume do produto, uma vez que este pode ter adquirido o produto com outro leiloeiro neste intervalo de tempo transcorrido entre a submissão do lance e o recebimento do aceite.

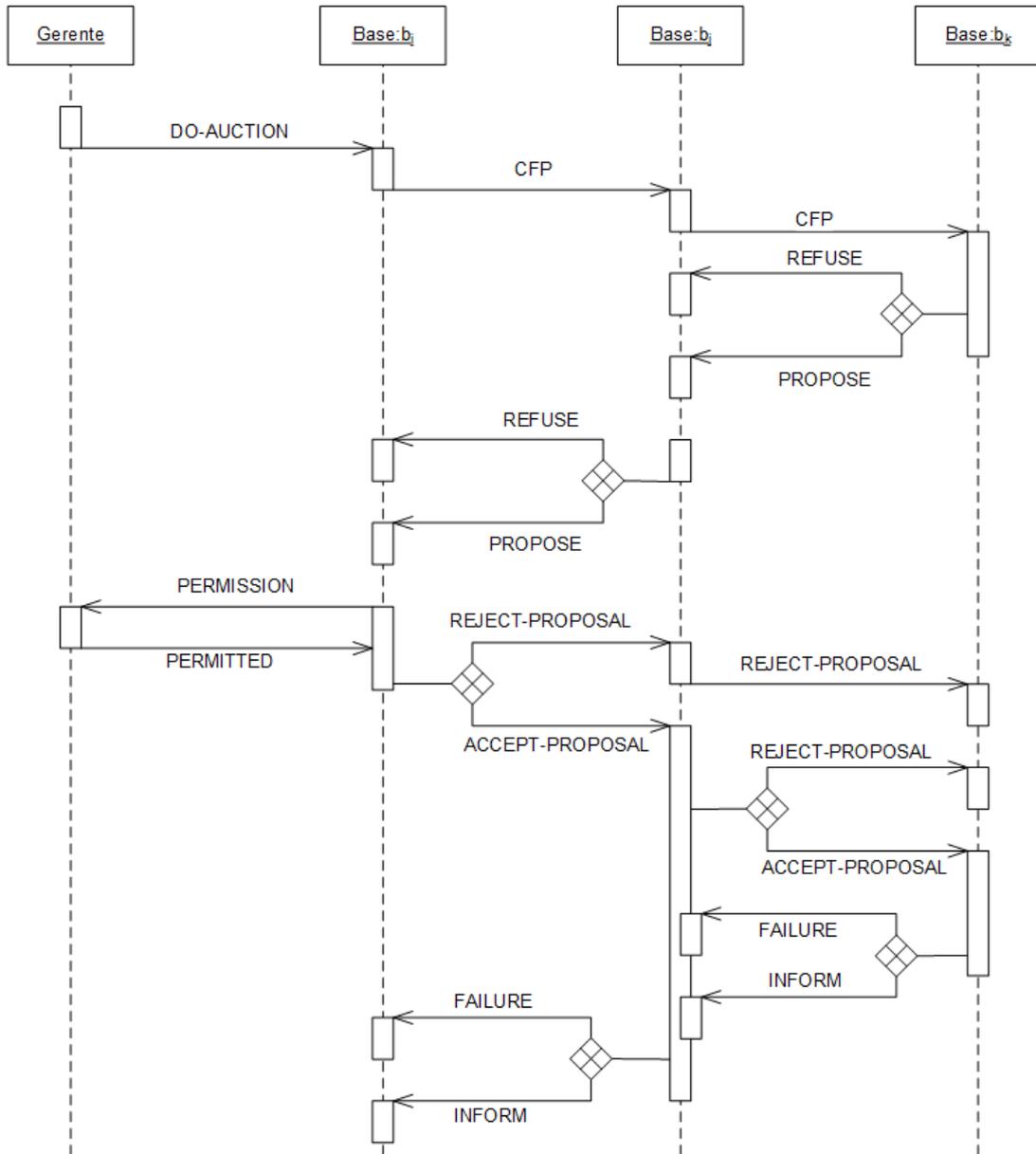


Figura 44 – Diagrama de Sequência de um Leilão de Repasse

Se b_k continuar interessado no volume do produto, b_j sela o acordo com o leiloeiro b_i . Caso contrário, b_j desiste do acordo com o leiloeiro. Logicamente, a cadeia de repasse de anúncios pode ser maior do que a apresentada no diagrama de sequência, uma vez que uma base pode transferir um produto para uma segunda base e assim por diante até alcançar um consumidor final. Neste caso, os leilões de repasse também são referenciados como leilões em cascata.

Um caso típico da necessidade de leilões de repasse ocorre quando uma base participante $b_j \in B_{b_i}^{send}$ representa um terminal no nível de planejamento intrarregião. Como os terminais sempre apresentam balanço de massa zero (i.e. $bal_{b,prod,per} = 0$) para cada produto $prod$ e por isso não apresentam demanda de produtos, estes não participam dos

leilões com o mesmo interesse de outra base participante $b_m \in B_{b_i}^{send}$ que apresenta certa demanda a ser atendida ($bal_{b,prod,per} < 0$). Além do mais, nem sempre uma base consumidora $b_k \notin B_{b_i}^{send}$ apresenta rota direta com uma base produtora b_i . Muitas vezes, uma base consumidora b_k está conectada a uma base produtora b_i apenas por meio de um terminal b_j . Neste caso, um terminal b_j tem o papel de adquirir o produto de uma base produtora b_i e repassar ao consumidor b_k .

Certamente, quando um terminal não atua representando um consumidor em um leilão, as suas chances de vitória são pequenas devido a sua falta de urgência de estoque. Por conta disso, um terminal apenas vencerá um leilão se não houver outro participante com maior urgência de atendimento. Neste caso, o terminal atua como uma extensão da capacidade de armazenamento de uma refinaria a fim de evitar que o estoque dela exceda os limites operacionais e físicos máximos.

Ademais, os leilões de repasse contribuem significativamente para evitar a necessidade de cancelamento de acordos, uma vez que um participante b_k pode receber simultaneamente todos os anúncios possíveis de um produto $prod_j$ no momento da tomada de decisão. Conceitualmente, esta prática transforma uma hierarquia de conexões indiretas entre bases em um nível de conexões diretas. Este cenário é ilustrado na Figura 45.

O cenário ilustrado é formado pelas bases b_1, b_2, b_3, b_4 e b_5 . Estas bases negociam a transferência do produto $prod_j$ por meio das rotas r_1, r_2, r_3 e r_4 com respectivos custos de transporte k_1, k_2, k_3, k_4 . No exemplo, a base b_4 apresenta demanda para o produto $prod_j$, mas somente tem rotas diretas com b_3 e b_5 . Por meio de leilões normais, b_4 poderia transferir o produto de b_5 com um custo de 9 unidades monetárias (mu), sendo que b_3 tem zero volume em estoque. Porém, por meio de leilões de repasse, b_4 poderia também receber ofertas diretamente das bases b_1 e b_2 , com as quais está conectado indiretamente. Nesta situação, b_4 poderia transferir o produto de b_1 com o custo de 6mu, que consiste na soma dos custos das rotas r_1, r_2 e r_3 . Portanto, por meio dos leilões de repasse, cada base b_i pode optar pelo acordo mais favorável em relação a todas as possíveis opções de recebimento naquele dado momento.

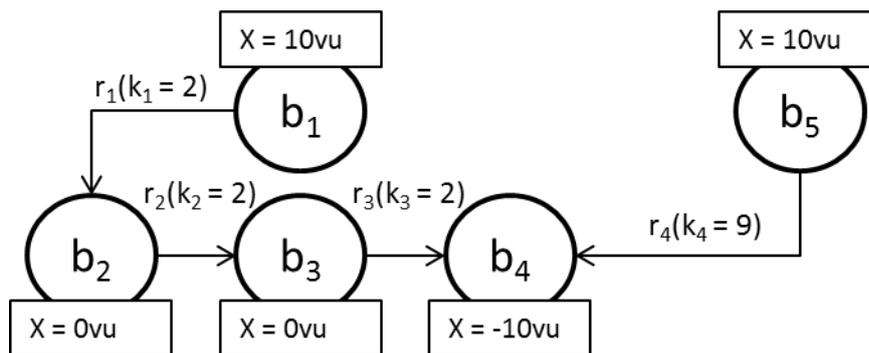


Figura 45 – Cenário de Exemplo de Leilões de Repasse

4.2.4.4 Subfase de definição dos lances vencedores

Quando um leiloeiro b_i recebe os lances dos participantes, ele precisa definir os lances vencedores. O leiloeiro pode definir até três lances vencedores, um em cada conjunto ou categoria de lances avaliados. Nesta decisão, o leiloeiro sempre considera que a satisfação da demanda das bases participantes é mais importante do que a redução dos custos.

Primeiramente, o leiloeiro separa os lances recebidos em dois conjuntos de acordo com a factibilidade dos fluxos propostos: um conjunto $Y \subseteq F$ com fluxos factíveis e em outro conjunto $\Psi \subseteq F$ com fluxos infactíveis. Esta subdivisão é importante para evitar somente a priorização de fluxos factíveis, principalmente quando estes apresentam um alto tempo de transporte devido à forma pela qual o grau de urgência $\delta_{b,prod}$ é calculado.

No conjunto Y de lances factíveis, o leiloeiro separa os fluxos em dois subconjuntos: subconjunto econômico $Y^e \subseteq Y$ e subconjunto de urgência $Y^u \subseteq Y$. Ambos os subconjuntos Y^e e Y^u são ordenados de forma decrescente em termos do grau de urgência $\eta_{b,prod}$. Em caso de empate (geralmente quando $\eta_{b,prod}$ é zero), o subconjunto econômico Y^e é ordenado de forma crescente por custo k_r e o subconjunto Y^u é ordenado de forma decrescente pelo valor de grau de urgência $\delta_{b,prod}$. Se ainda houver empate, o subconjunto Y^e é ordenado decrescentemente por $\delta_{b,prod}$ e o subconjunto Y^u é ordenado crescentemente por custo. Se ainda for necessário, outros fatores são usados para garantir o desempate (e.g. nível de estoque e dia de chegada). Como uma exceção a esta ordenação, quando o leiloeiro constatar que todos os participantes estão satisfeitos, sendo tais lances enviados com o intuito de equilibrar os níveis de estoques, o leiloeiro prioriza o participante com maior demanda no período posterior, se houver. Esta heurística é importante para atender as demandas dos participantes nos dias iniciais dos períodos seguintes.

No conjunto Ψ de lances infactíveis, o leiloeiro primeiro ordena os fluxos de forma decrescente por $\eta_{b,prod}$ e em caso de empate, ele ordena de forma crescente pelo dia de chegada d^{arrive} a fim de priorizar entregas com menor intervalo de atraso. Se ainda houver empate, a ordenação ocorre de forma decrescente por $\delta_{b,prod}$, de forma crescente pelo custo k_r e outros fatores, se necessário.

Após a ordenação dos conjuntos de lances, o leiloeiro seleciona até três lances vencedores, um de cada conjunto Y^e, Y^u e Ψ . O leiloeiro não envia de imediato a notificação de aceite aos participantes vencedores (mensagem ACCEPT-PROPOSAL). Antes, ele envia as informações dos lances vencedores ao agente gerente a fim de solicitar permissão para prosseguir com o fechamento do acordo (mensagem PERMISSION). Caso um mesmo lance seja vitorioso em mais de um conjunto, apenas uma instância deste lance é selecionada.

4.2.4.5 Subfase de sequenciamento dos fechamentos de acordos

O gerente recebe as solicitações de todos os leiloeiros e as analisa a fim de definir uma sequência de fechamento dos leilões. O gerente prioriza os participantes com maior grau de urgência (i.e. $\delta_{b,prod}$ e $\eta_{b,prod}$) para movimentação dos produtos e alocação dos arcos compartilhados. Se por acaso um participante está vencendo vários leilões que ainda estão em andamento, o gerente prioriza o fechamento dos leilões mais vantajosos para tal participante.

O gerente segue alguns passos para definir a ordem dos fechamentos dos acordos. Primeiramente, ele organiza os lances vencedores de cada participante b_j e produto $prod$ em um conjunto particular $T_{b_j,prod}$ (eq. (71)). Se um participante vence $n \in \mathbb{N}$ leilões para diferentes produtos $prod$, então um participante b_j é representado por n subconjuntos $T_{b_j,prod}$. Os subconjuntos de todos os produtos e participantes vencedores forma o conjunto T^{total} conforme a equação (72). Para ordenar o fechamento dos leilões, cada subconjunto $T_{b_j,prod_k}$ é representado pelo valor $\pi_{T_{b_j,prod}}$ que consiste na maior soma de $\delta_{b,prod}$ e $\eta_{b,prod}$ entre os lances $\rho_{b_j,b_i,prod} \in T_{b_j,prod}$ de cada $T_{b_j,prod}$ (eq. (73)). Este valor é usado para fins de ordenação do fechamento dos leilões entre diferentes participantes e mesmo em relação a um participante particular que venceu vários leilões simultâneos de diferentes produtos.

$$T_{b_i,prod} = \left\{ \rho_{b_j,b_1,prod}, \dots, \rho_{b_j,b_n,prod} \right\} \quad (71)$$

$$T^{total} = \bigcup_j^{|B|} \bigcup_k^{|PROD|} T_{b_j,prod_k} \quad (72)$$

$$\pi_{T_{b_i,prod}} = \max_{1 \leq j \leq n} \delta_{b,prod}(\rho_{b_i,b_j,prod}) + \eta_{b,prod}(\rho_{b_i,b_j,prod}), \forall \rho_{b_i,b_j,prod} \in T_{b_j,prod} \quad (73)$$

O uso do valor $\pi_{T_{b_j,prod}}$ permite que uma proposta de fluxo menos satisfatória para um participante contribua para a priorização de outra proposta mais satisfatória para o mesmo participante, se houver. Por exemplo, um lance correspondente a um fluxo ineficaz pode apresentar um $\delta_{b,prod}$ alto e este valor pode beneficiar outros lances enviados pelo participante correspondentes a fluxos factíveis a fim de evitar que estes não sejam concretizados (por falta capacidade nas rotas), e como consequência, o participante precise movimentar um fluxo menos vantajoso (i.e. um fluxo ineficaz).

O gerente separa cada conjunto $T_{b_j,prod}$ em dois subconjuntos: o subconjunto factível $T_{b_j,prod}^Y \subseteq T_{b_j,prod}$ e o subconjunto ineficaz $T_{b_j,prod}^\Psi \subseteq T_{b_j,prod}$. O subconjunto $T_{b_j,prod}^Y$ é ordenado por custo k_r e o subconjunto $T_{b_j,prod}^\Psi$ é ordenado de forma decrescente por $\delta_{b,prod}$, uma vez que um participante sempre apresenta um mesmo $\eta_{b,prod}$ para um mesmo produto $prod$. Finalmente, o gerente ordena o subconjunto $T_{b_j,prod}$ de forma decrescente de acordo com o valor $\pi_{T_{b_j,prod}}$.

Esta ordenação prioriza participantes com menores oportunidades de recebimento do volume desejado de um produto e aqueles com datas de entrega d^{arrive} mais próximas do dia de violação do mínimo $d_{b,prod}^{Pop}$ para um produto. Esta ordenação também prioriza produtos com maiores urgências de recebimento e de alocação das capacidades de transporte e armazenamento, ambos os recursos compartilhados entre os produtos de um mesmo grupo gr . Assim, o gerente seleciona o conjunto $T_{b_j,prod}$ com maior urgência e procede com a seleção do lance $\rho_{b_i,b_j,prod}$ com custo mais baixo no subconjunto factível $T_{b_j,prod}^Y \subseteq T_{b_j,prod}$. Se este subconjunto estiver vazio, o gerente seleciona o lance $\rho_{b_i,b_j,prod}$ com o maior valor de $\delta_{b,prod}$ no subconjunto ineficaz $T_{b_j,prod}^\Psi \subseteq T_{b_j,prod}$. Finalmente, o gerente autoriza o leiloeiro b_i (mensagem de PERMITTED) para fechar o acordo com o participante b_j referente ao lance selecionado $\rho_{b_i,b_j,prod}$. Então, o gerente espera a notificação de tal leiloeiro sobre a conclusão do corrente leilão. Certamente, o gerente envia uma única autorização por vez.

4.2.4.6 Subfase de fechamento de acordos

Quando o leiloeiro b_i recebe a mensagem de autorização do gerente, ele envia o ACCEPT-PROPOSAL para a base participante vencedora b_j . As principais fases do tratamento desta mensagem de aceite estão apresentadas na Figura 46 em forma de diagrama de estados. Conforme a figura, o participante vencedor b_j primeiramente verifica se ainda precisa do volume v do fluxo f referente ao lance $\rho_{b_i, b_j, prod}$ vitorioso, pois pode ter obtido o produto com outro leiloeiro escalonado mais previamente. Depois, o participante verifica a existência de um *loop* de transporte. Na sequência, o participante b_j verifica se a rota r selecionada ainda apresenta capacidade disponível para movimentação.

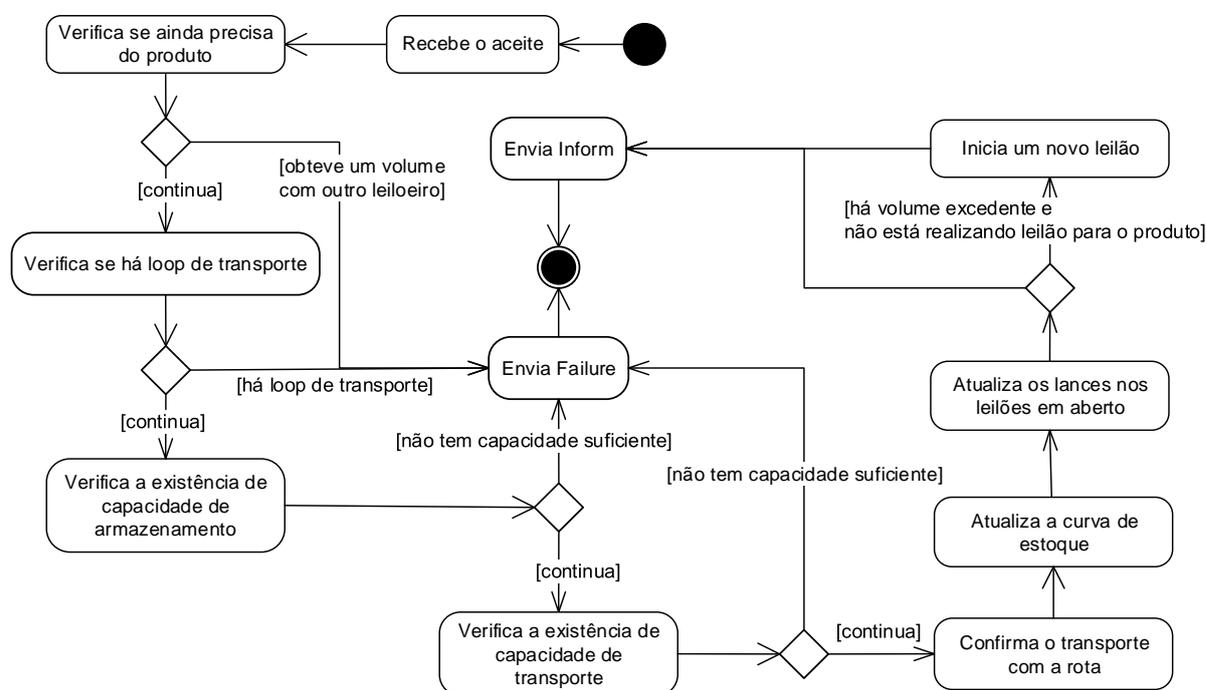


Figura 46 – Tratamento de uma Mensagem de Aceite

Em outra análise importante para viabilizar o acordo, o participante b_j verifica se ainda há espaço ocioso em tanque para armazenamento da quantia solicitada. Na verificação de espaço para armazenamento, o participante faz uso da capacidade ociosa do grupo para aumentar os limites máximos dinâmicos referentes ao produto e com isso poder acomodar a curva de estoque sem violações de capacidade. Geralmente, os limites (operacionais e físicos) dinâmicos particulares são iguais, pois consistem exatamente na curva de estoque do produto. Porém, nem sempre o participante está habilitado a aumentar o limite físico máximo dinâmico acima do limite operacional máximo dinâmico. Esta situação somente é permitida quando a curva de estoque do leiloeiro está violando o seu limite físico máximo dinâmico e não há mais

espaço disponível para armazenamento na faixa operacional do participante a fim de contribuir com o escoamento do leiloeiro.

Por meio de tais verificações, o participante pode desistir da atribuição do fluxo notificando o leiloeiro com uma mensagem de FAILURE ou então pode decidir prosseguir com as etapas necessárias para o envio de um INFORM.

Para enviar um INFORM, o participante b_j deve prioritariamente solicitar ao agente rota (que representa a rota r selecionada para o transporte) que confirme definitivamente a alocação da capacidade de transporte com os arcos $a \in r$. Também, o participante deve atualizar a sua curva de estoque $SC_{b_j,prod}$ adicionando o volume v a partir do dia de entrega d^{arrive} conforme especificado no fluxo f objeto de acordo no leilão corrente.

Todavia, a atualização da curva de estoque e mesmo a alocação definitiva da capacidade da rota pode influenciar nos valores de urgência do participante (i.e. $\delta_{b,prod}$ e $\eta_{b,prod}$), uma vez que o dia de violação do limite mínimo operacional ($d_{b,prod}^{Pop}$) pode ter sido postergado, caso haja violação, e a capacidade ociosa de transporte pelas rotas $r \in R_{b_j}^{rec}$ pode ter sido significativamente reduzida. Por isso, após realizar tais alterações, o participante b_j recalcula e envia novos lances para os leiloeiros (mensagem de UPDATE-BID) que ainda estão ativos (i.e. a espera da autorização do gerente). Por sua vez, estes leiloeiros (que receberam as atualizações de lances) procedem com a reavaliação de seus lances vencedores e recadastro com o gerente para solicitação da permissão para o fechamento de acordos já na próxima rodada de escalonamento.

Também, quando um participante b_j atualiza a sua curva de estoque $SC_{b_j,prod}$ para o produto $prod$, ele verifica se há disponibilidade de um excedente mínimo de volume (i.e. o menor $lot_{r,gr}^{min}$ das rotas $r \in R_{b_j}^{send}$ para transferir o produto) no último dia d_{per}^f do período corrente per para iniciar um leilão. Esta decisão é importante, pois pode haver bases $B_{b_j}^{send}$ que podem estar precisando do produto e não estão tendo oportunidade de adquirir com outras bases por diferentes motivos (e.g. inexistência de rotas ou falta de capacidade de transporte disponível ou ainda falta de produto nas bases conectadas). O participante deve notificar o gerente sobre o início deste novo leilão (mensagem de REGISTER). Assim, o participante b_j pode assumir o papel de leiloeiro e realizar normalmente um leilão, envolvendo a recepção dos lances e posterior solicitação ao gerente para o envio do ACCEPT-PROPOSAL. Este tipo de leilão não pode ser confundido com o leilão de repasse descrito na seção 4.2.4.3, uma vez que o volume oferecido no leilão já é considerado no estoque da base leiloeira b_j . Finalmente,

após a realização destas etapas, o participante b_j confirma o acordo (mensagem de INFORM) com o leiloeiro corrente b_i .

Ao receber um INFORM, o leiloeiro b_i também procede com a atualização de sua curva de estoque $SC_{b_i,prod}$ por meio da remoção do volume v a partir do dia de escoamento d^{depart} . Nesta atualização, certamente a curva de estoque irá abaixar, resultando no aumento da capacidade de armazenamento ociosa física $I_{b,per,d}^{phy}$ e/ou operacional $I_{b,per,d}^{op}$ do grupo $gr \ni prod$ a partir do dia de escoamento d^{depart} .

Com o aumento da capacidade ociosa, as instâncias dos participantes (i.e. os comportamentos FSM que representam os demais produtos no agrupamento gr) que enviaram REFUSE por falta de espaço para armazenamento nos leilões anteriores ocorridos no período corrente, podem então recalcular e atualizar os seus lances com os seus respectivos leiloeiros (mensagem de UPDATE-BID). Se um leilão a ser atualizado com o novo lance ainda estiver em aberto à espera da autorização do gerente, o participante simplesmente envia o lance ao leiloeiro. Se um leilão já estiver terminado no período corrente, o participante solicita que o respectivo leiloeiro realize novamente um leilão, uma vez que o leiloeiro pode ter se registrado em um período posterior por não ter recebido nenhum PROPOSE no leilão realizado no período corrente. Desta forma, o participante ao ser notificado da liberação de espaço, pode concorrer normalmente ao volume desejado no período corrente.

Após a liberação de espaço e atualização da curva de estoque, o leiloeiro inicia um novo leilão (mensagem de DO-AUCTION) e segue o mesmo procedimento de escolha dos lances e posterior solicitação ao gerente para fechamento do acordo. Assim, os lances vitoriosos podem concorrer igualmente com os demais para escalonamento já na próxima rodada.

Também, o leiloeiro deve informar ao gerente sobre o sucesso ou fracasso do acordo autorizado. Porém, esta notificação somente ocorre durante a realização do novo leilão. Mais precisamente, esta notificação ocorre por meio da requisição de escalonamento para os novos lances vencedores ou então ao se cadastrar para a realização de um novo leilão em um período $per \subset H$ posterior. Quando o gerente recebe a notificação do leiloeiro sobre o sucesso do acordo, ele remove os lances cadastrados anteriormente pelo mesmo leiloeiro e cadastra os novos lances informados na corrente solicitação, quando houver.

No caso do recebimento de um FAILURE, o leiloeiro seleciona outro lance como vencedor do leilão e solicita uma nova permissão para o gerente (mensagem de PERMISSION). Se não houver propostas substitutas a serem selecionadas, o leiloeiro solicita

ao gerente a remoção dos lances previamente cadastrados, se candidatando para a realização de um novo leilão. Este novo leilão é realizado porque o leiloeiro entende que ainda há participantes interessados no produto.

4.2.5 Fase de Finalização do Sistema

Quando um leiloeiro recebe apenas mensagens de REFUSE, ele considera que os participantes estão satisfeitos para o tipo de produto e que não há mais possibilidade de movimentação para eles para o período corrente per_i . Quando isso ocorre, o leiloeiro decide se candidatar a um novo período per_{i+1} para realizar leilões e se registra com o gerente. No entanto, pode ocorrer de um agente base não apresentar estoque suficiente para se candidatar a leiloeiro em qualquer outro período, e por isso ele não mais se cadastra para realização de leilões. Mesmo assim, a base ainda pode realizar leilões quando for convocada por participantes que perceberam uma nova ociosidade de espaço para armazenamento.

Por fim, quando o gerente não tiver mais solicitações pendentes para o envio de ACCEPT-PROPOSAL e não houver mais leiloeiros candidatos para fazer leilão para qualquer produto em qualquer período $per \subset H$, ele inicia o processo de finalização do sistema.

Primeiramente, conforme o diagrama de sequência apresentado na Figura 47, o agente gerente deve notificar todos os agentes bases sobre sua pretensão em finalizar o sistema. Esta notificação ocorre por meio de uma mensagem END_SYSTEM. Assim, cada base responde ao gerente enviando somente os fluxos de escoamento. Os fluxos de recebimento não são enviados para evitar redundâncias. Ao receber os fluxos, o gerente persiste-os no XML de saída e depois notifica todos os agentes para que estes finalizem suas execuções por meio de uma mensagem FINALIZE-AGENT. Antes de ser finalizado, cada agente responde ao gerente (com uma mensagem FINALIZED) para informar que recebeu a notificação e está de acordo com a finalização. Ao receber a mensagem de confirmação de todos os agentes, o gerente se autofinaliza.

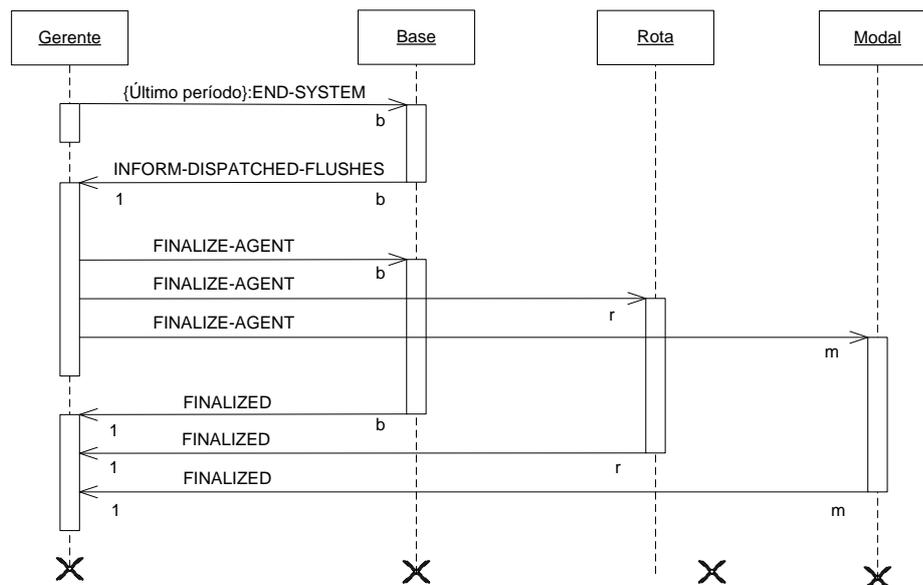


Figura 47 – Finalização do Sistema

4.2.6 Operações Eventuais

O modelo apresentado satisfaz plenamente as particularidades dos cenários comuns, ou seja, dos cenários que apenas exigem a execução de operações comuns de transferência de produtos. Porém, o modelo apresentado ainda não satisfaz as particularidades das operações eventuais (i.e. degradação, transbordo e sobreestadia).

Certamente, a prática mais comum para dar suporte às operações eventuais seria uma proposta de extensão ao protocolo de leilões. Entretanto, esta prática traria a desvantagem de aumentar a complexidade do protocolo e até mesmo refletir em um aumento no tempo de execução do sistema por conta das prováveis novas interações. Ademais, devido à simultaneidade dos leilões, é mais apropriado que as decisões sobre o planejamento das operações eventuais ocorram juntamente com as decisões sobre o planejamento das operações comuns para que as bases possam decidir sobre o tipo de operação mais conveniente em um dado momento, principalmente porque o protocolo não permite cancelamentos de acordos.

Desta forma, a prática de modelagem utilizada consiste na alteração do modelo do problema para prover a satisfação natural das operações eventuais pelo mesmo protocolo e modelo da solução aplicado no planejamento das operações comuns. Entretanto, tornam-se necessários alguns ajustes pontuais no comportamento dos agentes, mesmo que tais ajustes não alterem a essência e estrutura do protocolo de leilões. Neste sentido, as subseções seguintes apresentam as particularidades e práticas adotadas para que o modelo multiagente também suporte planejamentos com operações eventuais. Neste sentido, a subseção 4.2.6.1

apresenta a modelagem das operações de degradação e a subseção 4.2.6.2 apresenta a modelagem das operações de transbordo e sobreestadia.

4.2.6.1 Operações de degradação

Em situações eventuais de escassez de um dado produto, uma alternativa que surge para garantir o atendimento da demanda de uma base é a degradação da qualidade dos produtos. As operações de degradação também podem ser empregadas para a redução dos custos totais de transporte quando uma base não apresenta outra alternativa de recebimento de um produto senão por meio de importações ou então por meio de transferências de uma base com um custo de transporte mais elevado.

No modelo multiagente, as operações de degradação são definidas por meio de leilões com diferenças pontuais na forma de planejamento das operações comuns de transferência de produtos. Como os leilões ocorrem de forma simultânea para vários produtos $prod \in PROD$ e uma operação de degradação envolve dois produtos (i.e. $prod_i$ e $prod_j$), uma base não pode iniciar uma operação de degradação a qualquer momento, pois um produto $prod_i$ origem da degradação pode estar sendo oferecido em um leilão ativo. Para contornar este problema, uma base b interessada em degradar um produto $prod_i$ deve enviar um lance (exercendo o papel de participante) em seu próprio leilão do produto. Assim, a base pode concorrer nas mesmas condições com as outras bases que também desejam adquirir o produto $prod_i$.

A iniciativa de propor uma operação de degradação advém dos papéis de participantes e a decisão sobre a viabilidade de tais operações é definida pelos papéis de leiloeiros com o auxílio posterior do sequenciamento do fechamento dos leilões realizado pelo agente gerente. Portanto, com a possibilidade de realizar operações de degradação de produtos, as bases participantes podem apresentar três formas distintas de obter um volume do produto desejado. Estas são:

- Degradação sem movimentação: o participante b_j já possui em estoque o produto $prod_i$ compatível para degradação com o produto desejado $prod_j$. Assim, ele precisa apenas degradar $prod_i$ para formar o produto desejado $prod_j$.
- Movimentação com degradação: o participante b_j obtém o produto $prod_i$ com outra base com a única intenção de degradá-lo para formar o produto desejado $prod_j$.

- Movimentação sem degradação: esta é a forma normal discutida nas seções anteriores, na qual o participante b_j obtém o produto desejado $prod_j$ diretamente de outra base sem precisar degradá-lo.

Todos estes casos são resolvidos de igual maneira por meio de leilões, sendo que apenas os dois primeiros serão discutidos nesta seção por demandarem degradação. O primeiro caso exige uma extensão ao modelo do problema para se tornar praticável. Em um leilão, os papéis de leiloeiro e participante são definidos pela existência de rotas para transferência de produtos. Desta forma, o modelo do problema foi estendido por meio da criação de rotas fictícias circulares para cada base (i.e. quando a base é origem e também o destino da rota).

Esta extensão permite ao leiloeiro b_i oferecer um volume do produto $prod_i$ ao papel de participante da própria base b_i . Assim, tal participante pode propor ao leiloeiro a possibilidade de degradar o produto $prod_i$ em estoque ao mesmo tempo em que concorre pela aquisição do produto com outras bases leiloeiras $B_{b_i}^{rec} - \{b_i\}$. Ademais, a proposta de rotas fictícias circulares foi concebida para não prejudicar a ocorrência das outras operações de transferência. Para isso, considera-se que tais rotas apresentam capacidade infinita, tempo e custo de transporte nulo e não possuem restrição de lote mínimo (i.e. $lot_{r,gr}^{min} = 0$). Por sua vez, o segundo caso de degradação é resolvido normalmente por meio da movimentação do produto original $prod_i$ por meio de uma rota real r com a intenção de degradar para $prod_j$ na base de destino b_j .

A extensão ao modelo do problema pode ser melhor compreendida por meio do cenário ilustrado na Figura 48. Neste cenário fictício, o gerente coordena as negociações entre três bases (i.e. b_1 , b_2 e b_3) por meio de seus papéis de leiloeiro (A) e participante (P). No exemplo, b_1 deseja 10 unidades volumétricas (u.v.) do produto $prod_z$. Porém, a base b_1 apenas possui o produto $prod_x$ em estoque. Por meio da rota fictícia interna (representa pelo arco encurvado dentro do círculo representativo da base b_1), o papel de leiloeiro de b_1 também passa a poder enviar um CFP do produto $prod_x$ para si mesmo. Deste modo, o papel de participante da base b_1 pode propor uma degradação de $prod_x$ para $prod_z$, uma vez que tal operação é aceitável conforme a tabela disposta no ângulo superior direito da figura. Ainda, o participante b_1 também pode propor um lance para aquisição do produto $prod_y$ de b_3 a fim de degradar para $prod_z$. Além disso, o participante b_1 também pode adquirir o produto $prod_z$ original da base b_2 , sem despender custos para degradação. Caso tal participante b_1 vença um ou mais destes leilões, seus lances são enviados para o escalonamento no gerente. O gerente

priorizará o leilão mais vantajoso para este participante. Neste exemplo, se o custo de transporte não for muito elevado, presumidamente seria mais vantajoso para b_1 adquirir o produto de b_2 a fim de evitar a ocorrência de degradação.

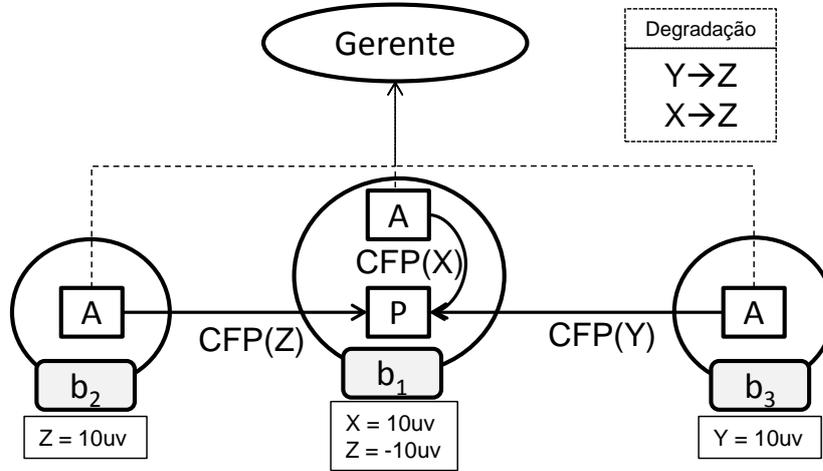


Figura 48 – Exemplo de Operação de Degradação

No entanto, o suporte às operações de degradação exige certos ajustes nos comportamentos dos agentes bases, principalmente no que se refere ao cálculo do lance. Uma base leiloeira b_i envia normalmente o anúncio do produto $prod_i$ aos participantes $B_{b_i}^{sent}$ e inclusive para ela mesma. Por sua vez, ao receber um anúncio, um participante b_j ou mesmo b_i somente propõe um lance para degradação quando este não apresenta demanda pendente para o produto $prod_i$ e tal produto seja degradável para atender a demanda de algum outro produto $prod_j$ em déficit no período corrente. Nesta situação, o participante analisa os produtos em déficit e seleciona aquele com menor custo de degradação para ser degradado do produto original $prod_i$. Feito isto, o participante calcula o conteúdo do lance com foco exclusivo no produto destino da degradação (i.e. $prod_j$) e envia ao leiloeiro. O leiloeiro avalia os lances como se todos fossem para o produto original $prod_i$. Porém, caso o lance de degradação seja o vencedor, o leiloeiro informa ao gerente que o lance vencedor é do produto destino da degradação $prod_j$ a fim de que este seja escalonado juntamente com os demais possíveis lances vencidos pelo participante referente a tal produto desejado.

O cálculo do lance ocorre similarmente à forma de cálculo de um lance típico de transferência. Por exemplo, no caso de um leilão de degradação interna, os dias de saída e chegada, (i.e. d^{depart} , d^{arrive}), do fluxo f proposto no lance ρ correspondem justamente ao dia d^{deg} da ocorrência da degradação, uma vez que o produto já está armazenado na base. Assim, o cálculo do grau de urgência de estoque $\delta_{b,prod}$, apresentado na equação (69), considera d^{arrive} como d^{deg} . Também, o custo k (também componente do lance) é calculado conforme a

equação (74). Nesta equação, quando $prod_i$ já consta em estoque, o custo do lance consiste exclusivamente no custo de degradação (porque k_r é zero), caso contrário, o custo de transporte k_r é utilizado como uma penalização ao lance proposto perante as demais alternativas, quando houver. Esta penalização ocorre porque geralmente é mais vantajoso obter o produto desejado do que transferir outro produto apenas para o fim de degradação.

$$k_r = k_r + k^{deg} \quad (74)$$

Como os custos de degradação entre os produtos compatíveis são discretizados em quatro classes (i.e. nulo, baixo, médio e alto) para cada par de produtos, faz-se necessário representar estes valores em termos numéricos para avaliar a viabilidade das operações de degradação em relação às transferências comuns. Para definir os respectivos valores numéricos para os valores discretos de degradação para um produto, o participante faz uso dos custos de suas rotas de recebimento $R_{b_j,prod_j}^{rec}$ para a aquisição do produto destino da degradação (i.e. $prod_j$). A equação (77) representa a definição do custo de degradação numérico. Como preparação à equação, K (equação (75)) representa o conjunto de custos de movimentação de todas as rotas $R_{b_j,prod_j}^{rec}$ e fc (equação (76)) refere-se ao intervalo composto pelo custo de movimentação mais baixo e o mais alto para a aquisição do produto alvo de degradação $prod_j$ com os leiloeiros ativos. Quando o participante estiver participando de apenas um único leilão para o produto, o limite máximo do intervalo corresponde ao próprio custo e o limite inferior corresponde à zero (i.e. $\max(K) = \min(K)$ então $\min(K) = 0$).

$$K = \{k_{r_1}, \dots, k_{r_n}\} \quad (75)$$

$$fc = \max(K) - \min(K) \quad (76)$$

Na sequência, conforme a equação (77), o participante divide o intervalo expresso por fc em quatro subfaixas de valores para representar cada valor discreto de degradação e assim define o valor de custo numérico k^{deg} como sendo o valor mediano da subfaixa correspondente a cada custo discreto. Como exceção, o valor discreto nulo corresponde ao custo zero.

$$k^{deg} = \begin{cases} 0, & \text{se custo} = \text{nulo} \\ \frac{fc * \frac{1}{3}}{2} + \min(K), & \text{se custo} = \text{baixo} \\ \frac{fc * \frac{2}{3} + fc * \frac{1}{3}}{2} + \min(K), & \text{se custo} = \text{m\u00e9dio} \\ \frac{fc + (fc * \frac{2}{3})}{2} + \min(K), & \text{se custo} = \text{alto} \end{cases} \quad (77)$$

Portanto, a decis\u00e3o sobre o planejamento de uma transfer\u00eancia comum ou um opera\u00e7\u00e3o de degrada\u00e7\u00e3o ocorre de acordo com o sequenciamento realizado pelo gerente. O participante apenas precisa conceber e enviar seus lances aos leiloeiros e caso ven\u00e7a mais de um leil\u00e3o, os acordos ser\u00e3o fechados sequencialmente a fim de priorizar o melhor acordo para o participante.

4.2.6.2 Opera\u00e7\u00f5es de transbordo e sobreestadia

As opera\u00e7\u00f5es de transbordo e sobreestadia tamb\u00e9m exigem uma extens\u00e3o ao modelo do problema para apresentar conformidade com o protocolo de leil\u00f5es proposto. Basicamente, esta extens\u00e3o consiste na defini\u00e7\u00e3o de bases fict\u00edcias $B^{fic} \subset B$ e rotas fict\u00edcias $R^{fic} \subset R$.

Estas extens\u00f5es s\u00e3o ilustradas no cen\u00e1rio apresentado na Figura 49. Neste cen\u00e1rio, as bases s\u00e3o representadas pelos c\u00edrculos e as rotas pelas arestas direcionais. Todas as rotas s\u00e3o mar\u00edtimas. Por quest\u00e3o de simplicidade, considera-se que este cen\u00e1rio suporta apenas um tipo de produto. O cen\u00e1rio \u00e0 esquerda representa uma situa\u00e7\u00e3o onde as rotas de partida das bases b_1 e b_2 possuem restri\u00e7\u00e3o de lote m\u00ednimo $lot_{r,gr}^{min}$ (i.e. $25m^3$ e $30m^3$) maior do que a capacidade f\u00edsica da base de destino b_3 (i.e. $20m^3$). Neste caso, como b_3 n\u00e3o apresenta capacidade para armazenamento de um volume m\u00ednimo, somente uma opera\u00e7\u00e3o de transbordo ou sobreestadia permitiria uma movimentac\u00e3o de b_1 ou b_2 para distribuir um dado volume para as bases b_4 , b_5 ou b_6 , ou ent\u00e3o, para descarregar parcelas di\u00e1rias deste volume em b_3 . A extens\u00e3o que permite tais opera\u00e7\u00f5es est\u00e1 ilustrada no cen\u00e1rio \u00e0 direita da Figura 49, onde b_3^{fic} representa uma base fict\u00edcia no dom\u00ednio de b_3 e as arestas pontilhadas representam as rotas fict\u00edcias $R_{b_3^{fic}}^{fic} \subseteq R^{fic}$ de entrada e sa\u00edda de tal base. Na verdade, a base fict\u00edcia b_3^{fic} pode ser considerada como um ou v\u00e1rios navios atracados no dom\u00ednio de sua base real b_3 .

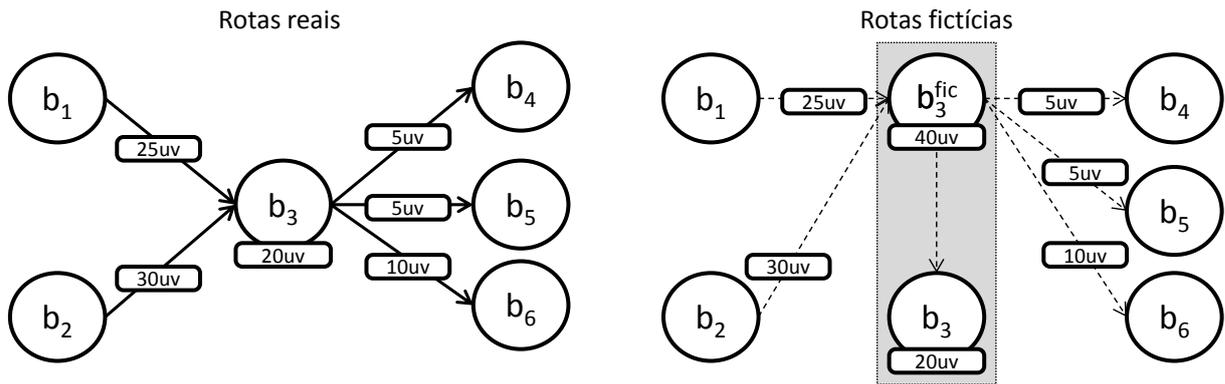


Figura 49 – Cenário Fictício de Transbordo e Sobreestadia

A capacidade máxima física $PL_{b^{fic},gr,per}^{max}$ de qualquer base fictícia b^{fic} é dada pela equação (78) de acordo com o maior lote mínimo $lot_{r,gr}^{min}$ entre as rotas marítimas de chegada $R_{b^{fic}}^{fic,arrive} \subseteq R_{b^{fic}}^{fic}$ e as rotas marítimas de saída $R_{b^{fic}}^{fic,depart} \subseteq R_{b^{fic}}^{fic}$. Este valor é reservado para cada produto $prod \in gr$ suportado para permitir operações de transbordo simultâneas entre diferentes produtos, uma vez que a restrição de lote mínimo deve ser respeitada por produto. A capacidade de armazenamento física é restringida por um fator do lote mínimo a fim de evitar o recebimento diário excessivo de produtos e consequentemente evitar a necessidade ou reduzir o número de dias das operações de sobreestadia. Ademais, o cálculo envolve o valor de lote mínimo $lot_{r,gr}^{min}$ das rotas de partida $R_{b^{fic}}^{fic,depart}$ para evitar que a capacidade alocada na base b^{fic} por um dado volume remanescente (i.e. menor do que o lote mínimo $lot_{r,gr}^{min}$ de uma rota de escoamento $r \in R_{b^{fic}}^{fic,depart}$) impeça a chegada de um novo fluxo (em b^{fic}) por causa de uma possível falta de capacidade de armazenamento.

$$PL_{b^{fic},gr,per}^{max} = \sum_{prod \in gr} \max_{r \in R_{b^{fic}}^{fic,arrive}} (lot_{r,gr}^{min}) + \max_{r \in R_{b^{fic}}^{fic,depart}} (lot_{r,gr}^{min}), \quad \text{onde} \quad (78)$$

$$R_{b^{fic}}^{fic,arrive} \subseteq R_{b^{fic}}^{fic} \text{ e } R_{b^{fic}}^{fic,depart} \subseteq R_{b^{fic}}^{fic}$$

Por sua vez, os limites operacionais máximo e mínimo ($OL_{b^{fic},prod,per}^{max}, OL_{b^{fic},prod,per}^{min}$) de uma base fictícia b^{fic} são definidos como zero com a intenção de forçar o envio, durante os leilões, de todo o volume armazenado. Esta configuração permite ao papel de leiloeiro de uma base fictícia b^{fic} expressar naturalmente a sua urgência de envio durante os leilões, uma vez que o seu estoque estará violando o limite operacional máximo $OL_{b^{fic},prod,per}^{max}$ no período

corrente *per*. Assim, a intenção é fazer com que os participantes $B_{b_i}^{sent}$ cooperem com o leiloeiro b_i^{fic} a fim tirá-lo desta situação até ambos ficarem em equilíbrio de estoque.

Em relação às rotas fictícias, estas foram propostas para permitir transferências de produtos entre uma base fictícia b_i^{fic} e sua base real b_i e também a outras bases reais $B_{b_i}^{sent} \subseteq B_{b_i}^{sent}$ ou $B_{b_i}^{rec} \subseteq B_{b_i}^{rec}$ alcançáveis por meio de rotas marítimas. Esta prática permite à base fictícia b_i^{fic} redistribuir o volume diretamente às demais bases sem necessidade obrigatória de descarregamento do volume na base real. Mesmo assim, a base real b_i pode continuar recebendo o produto diretamente por suas rotas reais $R_{b_i}^{rec} \subseteq R$. Ademais, b_i também passa a poder receber o volume por intermédio da base fictícia b_i^{fic} a fim de atender a sua demanda ou para distribuir a outras bases por meio de rotas compostas por outros tipos de modais (e.g. dutos).

Como a base fictícia b_i^{fic} está inserida no domínio da base real b_i , a rota fictícia entre elas apresenta atributos especiais. Esta rota possui capacidade de transporte infinita, tal como as demais rotas marítimas, mas também possui custo zero, tempo de transporte instantâneo e não apresenta restrição de lote mínimo a fim de incentivar qualquer movimentação entre tais bases (i.e. $lot_{r,gr}^{min} = 0$).

No modelo, as operações de transbordo e sobreestadia ocorrem por meio de leilões de repasse. O mecanismo de leilões de repasse foi apresentado na seção 4.2.4.3. Em uma operação de transbordo, uma base fictícia b_i^{fic} recebe o anúncio de uma base de origem b_j e inicia um leilão especial a fim de redistribuir o anúncio. Este anúncio é incrementado com o volume disponível em seu estoque e é enviado para as bases $B_{b_i^{fic}}^{sent}$ com quem a base fictícia b_i^{fic} possui rotas marítimas diretas para envio do produto, inclusive à sua base real b_i . A negociação ocorre normalmente conforme descrito na seção 4.2.4.

Por sua vez, a ocorrência de uma operação de sobreestadia também é instigada pelas bases consumidoras participantes dos leilões (normais ou de repasse) realizados por bases fictícias. Nestes leilões, uma base fictícia b_i^{fic} normalmente prepara e envia o anúncio contendo os vetores de estoque operacional E^{op} e físico E^{phy} calculados conforme as equações (42) e (44). Cada participante b_j analisa estes vetores para definir o volume desejado e os dias de saída e chegada do fluxo a ser proposto. É por meio da escolha das datas do fluxo (i.e. d^{depart} , d^{arrive}) que um participante determina a necessidade de ocorrência de uma operação de sobreestadia. Entretanto, o papel de participante sempre prioriza a escolha de dias

mais prévios de escoamento d^{depart} e recebimento d^{arrive} a fim de ser justo no cálculo de seus graus de urgência e também para evitar ou reduzir o número de dias de sobreestadia de navios.

Esta situação é mais bem explicada por meio do exemplo ilustrado na Figura 50. O exemplo apresenta algumas informações de estoque de três bases envolvidas em dois leilões, um de repasse e um normal. Estes leilões ocorrem entre as bases b_1 , b_2^{fic} e b_2 , resultando na formação de uma operação de sobreestadia. A base b_1 é uma base produtora e a base b_2^{fic} é uma base fictícia que está sobre o domínio da base real b_2 . Primeiramente, a base b_1 inicia um leilão, onde b_2^{fic} e b_2 são os participantes. Por questão de simplicidade, considera-se que há apenas um vetor de estoque no anúncio e os demais atributos de um anúncio são omitidos.

A base b_2^{fic} recebe o anúncio de b_1 e prepara um novo anúncio a ser enviado para b_2 . Para isso, b_2^{fic} primeiramente define quanto pode ser adquirido diariamente de b_1 com respeito a sua capacidade de armazenamento, tempo de transporte e lote mínimo da rota r_1 . Na sequencia, b_2^{fic} altera o vetor de anúncio incluindo o volume que possui disponível para escoamento em sua curva de estoque. Conforme o exemplo, não há volume em estoque na base fictícia b_2^{fic} . Feito isso, b_2^{fic} abre um novo leilão a fim de oferecer o volume de b_1 para b_2 . Por sua vez, b_2 cria uma proposta de fluxo com o volume de 20u.v. para recebimento no dia 6 devido a limitação de capacidade de estoque em tal dia. O participante escolhe este dia por questão de priorização de recebimentos mais prévios. O fluxo proposto faz uso da rota r_2 , cujo tempo de transporte é de 2 dias. A fim de evitar uma operação de sobreestadia nesta negociação, a base b_2^{fic} solicita a entrega do volume de b_1 para o dia 4. Com este planejamento, a execução de uma operação de transbordo para o atendimento de b_2 ocorreria no mesmo dia da chegada do navio em b_2^{fic} . Em princípio, esta operação de transferência evita uma subsequente operação de sobreestadia.

Entretanto, a base b_2^{fic} não consegue enviar todo o volume recebido de b_1 (i.e. o lote mínimo é 40u.v.) devido a limitação de capacidade de b_2 para o dia de chegada 6. Por isso, b_2^{fic} abre um leilão normal para oferecer o volume remanescente. Neste leilão, a base b_2 propõe um novo fluxo para recebimento de 20u.v. no dia 7. Caso esta negociação se concretize, a base b_2^{fic} estaria realizando uma operação de sobreestadia, uma vez que o volume seria recebido de b_1 no dia 4 e parte deste seria enviado para b_2 no dia 5, considerando o tempo de transporte de 2 dias pela rota r_2 .

De acordo com o exemplo, pode-se notar que as operações de sobreestadia são definidas nos leilões normais subsequentes a um leilão de repasse. No entanto, uma operação de sobreestadia também pode ocorrer em leilões de repasse quando o estoque de um leiloeiro b_i está com previsão de violação de sua capacidade máxima. Neste caso, uma base fictícia pode propor uma entrega do produto em dias mais prévios do que o desejado a fim de evitar ou reduzir a violação da capacidade de b_i .

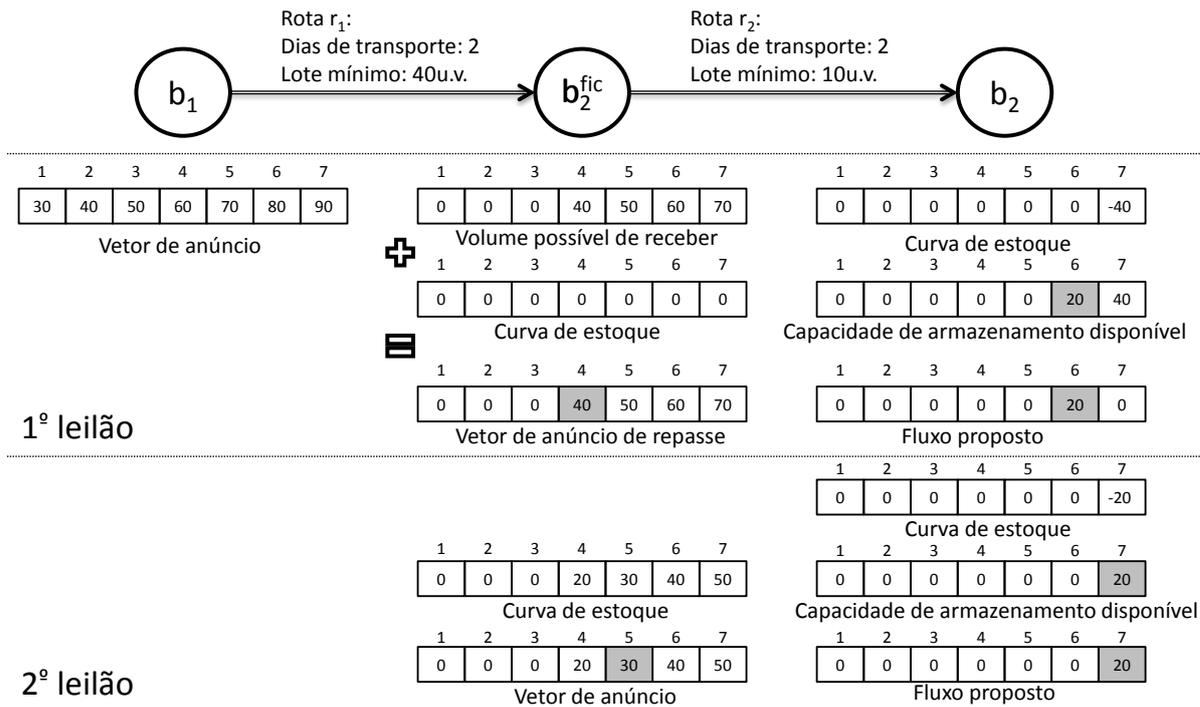


Figura 50 – Exemplo de um Leilão de Repasse e Normal em uma Operação de Sobreestadia

4.2.7 Distribuição do Sistema

Em cenários complexos constituídos por múltiplos grupos de produtos, o modelo pode fazer uso das vantagens da execução paralela (i.e. executando em processadores multi-núcleos) ou distribuída (i.e. executando em computadores locais ou distribuídos em sistemas operacionais homogêneos ou heterogêneos) para reduzir o tempo de processamento do sistema.

No modelo, a execução paralela/distribuída é incentivada pelo desacoplamento natural dos sistemas multiagente e também pela independência existente entre os recursos que envolvem os grupos de produtos. Como as capacidades de armazenamento das bases são dadas por grupo de produto e um produto apenas pode pertencer a um grupo de produto, então, é totalmente viável que negociações de produtos ocorram de forma paralela entre

grupos distintos. Mesmo as operações de degradação, que envolvem mais de um produto, ocorrem entre os produtos de um mesmo grupo.

Porém, as negociações que envolvem produtos de grupos distintos somente não são totalmente independentes por conta das rotas utilizadas nas transferências, uma vez que estas podem dar suporte a mais de um grupo de produto. Mesmo assim, o modelo do problema permite reduzir as comunicações entre as bases e rotas ao definir arcos com capacidade ilimitada. Quando uma rota apenas é composta por arcos ilimitados, não há necessidade de um participante comunicar com tal rota para solicitar sua capacidade de transporte.

Mais especificamente, considerando que um agente é um *thread* de execução, a solução utilizada para permitir que um agente base possa atuar paralelamente em negociações de diferentes grupos, consiste no desmembramento de cada agente base em vários agentes sub-bases. Desta forma, cada agente sub-base fica responsável pelas negociações dos produtos de somente um grupo de produto. Assim, além dos leilões ocorrerem simultaneamente, os leilões de diferentes grupos podem ocorrer paralelamente.

No entanto, a execução paralela/distribuída é opcional no sistema e precisa ser explicitamente habilitada pelo usuário. Quando habilitada, esta prática pode ser adotada em ambos os níveis de planejamento definidos no modelo, ou seja, no nível inter-região e intrarregião. Também, esta prática pode ser empregada para viabilizar o planejamento de todo o Brasil como um único nível, independente da quantidade de bases e grupos de produtos dos cenários. Neste último caso, devido a grande dimensão dos cenários brasileiros, além do desmembramento das bases de acordo com os grupos suportados, ainda pode ser conveniente organizar as sub-bases resultantes por região.

A Figura 51 ilustra o desmembramento das bases para cada nível, inclusive para o nível correspondente a todo o Brasil em cenários abstratos com dois grupos de produtos. Cada forma quadrangular na figura representa um container de agentes, ou seja, um conjunto de agentes (i.e. threads) que faz parte de um mesmo processo. Os containers identificados pela letra B representam os containers de sub-bases, que também podem envolver os demais tipos de agentes. Caso haja uma maior disponibilidade de nós de processamento, pode-se optar por distribuir os agentes rotas e arcos em containers separados das bases. Estes containers são representados pelos quadrados identificados com a letra R.

Ademais, as linhas contínuas e pontilhadas que conectam os containers representam as trocas de mensagens entre os agentes de diferentes containers. Nota-se a possibilidade de comunicação entre agentes de containers de grupos diferentes. Isto ocorre principalmente

quando um agente base de um grupo precisa se comunicar com um agente rota alocado em um container de outro grupo. Por sua vez, as linhas pontilhadas representam a comunicação de uma base com uma rota alocada em um container genérico, independente de grupo de produtos.

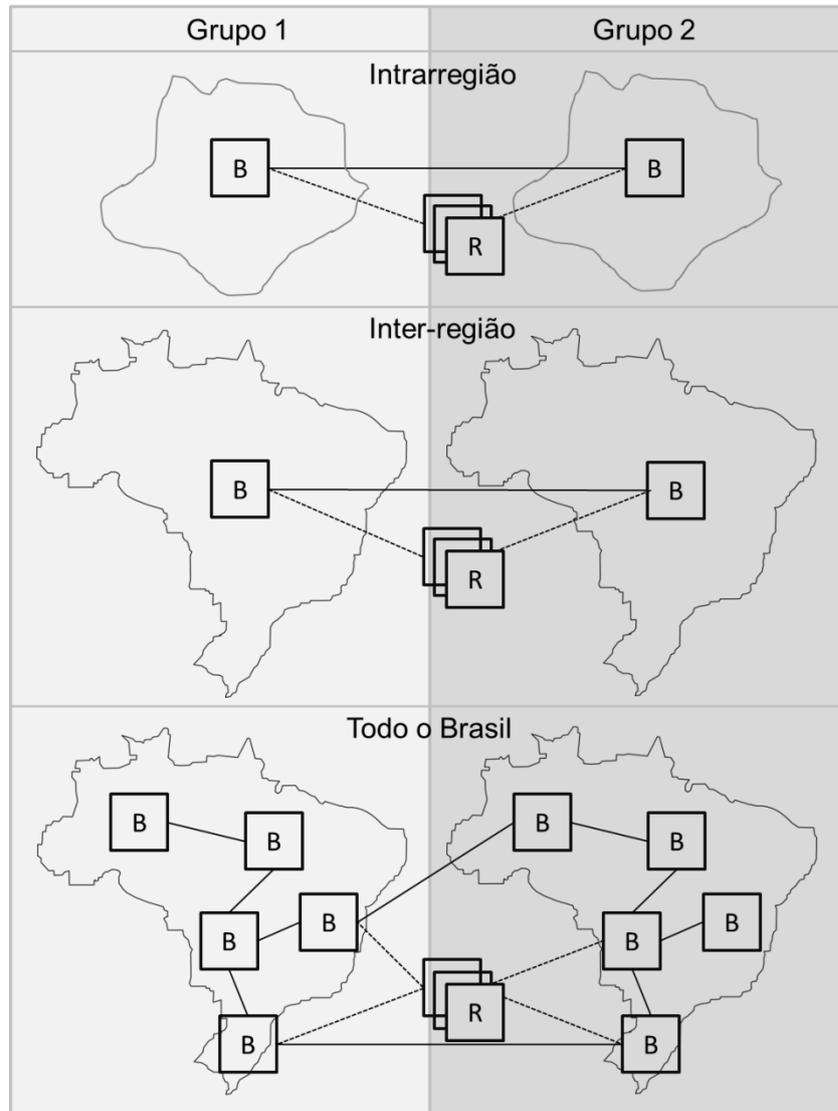


Figura 51 – Distribuição dos Agentes

Conforme a figura, como há dois grupos de produtos, o conjunto de bases é transformado em dois conjuntos de sub-bases. Por conta disto, a figura apresenta duas representações de cada região, uma para cada grupo de produto. Nos níveis intrarregião e inter-região, as sub-bases são simplesmente separadas em seus containers. No nível que envolve todo o Brasil, mesmo com o desmembramento em grupos, cada grupo pode ter ficado ainda com um grande número de sub-bases. Por isso, as sub-bases ainda são separadas por regiões, um container por região, a fim de se obter maior eficiência de execução. A organização das sub-bases por região não necessariamente contribui para o aumento das

comunicações externas aos containers, uma vez que as bases geralmente são conectadas (por meio de rotas) com bases da mesma região.

Ademais, como as bases dependem das rotas e arcos para realizar as transferências, faz-se necessário que estes últimos sejam distribuídos estrategicamente a fim de reduzir as comunicações entre containers. É preferível que cada agente rota e os seus arcos habitem o mesmo container. Porém, pode ocorrer de um mesmo arco fazer parte de mais de uma rota e tais rotas estarem em containers diferentes. Neste caso, o arco deve ser alocado ao container que apresenta mais rotas que o referencia. Em caso de empate, o arco deve ser atribuído ao container (que contém alguma rota que o referencia) com menor número de agentes.

Em relação às rotas, estas podem ser alocadas em containers particulares ou juntamente com as sub-bases. Esta decisão é configurável. No primeiro caso, nenhum grupo é favorecido e todas as sub-bases que precisam se comunicar com uma rota terão que enviar uma mensagem externa ao container em que habitam. No segundo caso, como cada rota apresenta duas extremidades, as rotas são preferencialmente distribuídas nos containers em que suas bases de destino estão alocadas. Esta escolha reduz as comunicações externas aos containers, pois são os papéis de participantes (i.e. destino de uma transferência) que se comunicam com as rotas. Como uma rota pode suportar mais de um grupo, a rota é alocada ao container que representa um grupo com menos agentes. No modelo, todas estas decisões sobre a criação e alocação dos agentes são realizadas pelo agente gerente na inicialização do sistema.

4.3 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este capítulo apresentou um modelo multiagente para o PPTDP baseado nas diretrizes de um novo protocolo de leilões. O protocolo permite a criação de um ambiente colaborativo entre os agentes por meio de leilões a fim de tratar das particularidades do PPTDP. Alguns exemplos destas particularidades são: dispersão geográfica das bases, organização hierárquica da rede, recursos complementares, recursos temporais, recursos compartilhados, múltiplos tipos de produtos, múltiplas unidades de produtos e transformação entre tipos de produtos. O tratamento destas particularidades incentiva a aplicação do protocolo em problemas que envolvam parte ou a totalidade de tais características e que não sejam resolvidos adequadamente por meio da aplicação de versões mais puras do protocolo CNet.

O protocolo incentiva a ocorrência de negociações simultâneas entre os envolvidos, sendo que estas negociações ocorrem em fases bem definidas a fim de melhor satisfazer tais

particularidades do problema. Basicamente, um leilão é caracterizado pelo envio de um anúncio e recebimento dos lances, sequenciamento realizado pelo Gerente e consequente fechamento de um acordo. Com esta estrutura, principalmente por conta do sequenciamento dos fechamentos dos acordos, o protocolo garante acesso exclusivo aos recursos do problema, evitando as inconveniências das ocorrências de *deadlocks*.

Além do mais, a forma como o protocolo é aplicado no modelo evita a ocorrência de negociações intermitentes. Mesmo que uma entidade realize vários leilões a fim de enviar diferentes quantidades e tipos de produtos, o atingimento do estado de satisfação dos papéis de leiloeiro e participante das entidades envolvidas em uma negociação, garante o término da negociação e conseqüentemente, ao considerar todo o conjunto das negociações simultâneas, também garante a finalização do sistema. Mais precisamente, um leiloeiro está satisfeito para um produto quando realiza um leilão e apenas recebe mensagens de REFUSE. Com isso, ele não mais fará leilões, ao menos que seja solicitado explicitamente por um de seus participantes. Por sua vez, um participante está satisfeito para um produto quando já se encontra em equilíbrio de estoque com os seus leiloeiros ou quando os leiloeiros não têm quantidade mínima do produto para envio. Estas situações levam os participantes a enviarem REFUSE a fim de contribuir para o fim da negociação e também para o atingimento do estado de satisfação total do sistema, ou seja, o estado onde todos os papéis de leiloeiro e participante se encontram satisfeitos.

De um modo geral, o protocolo proposto apresenta alguns benefícios que podem não estar presentes em outras abordagens. Primeiramente, ele viabiliza uma modelagem mais simples do problema, porém não necessariamente fácil, ao permitir a representação de cada entidade real do problema por meio de agentes. Ademais, a forma de interação por meio de negociações também contribui para simplificar o modelo e conseqüentemente, para permitir um melhor entendimento da solução final pelos usuários. Por exemplo, como o processo de construção da solução final é baseada em unidades de leilões, o usuário pode analisar passo-a-passo a construção de uma curva de estoque de uma dada base referente a um dado produto em um período ou em todo o horizonte de planejamento. Ademais, o usuário também pode analisar um leilão em particular e descobrir como o fluxo resultante foi formado conforme o contexto naquele momento. Também, por conta do dinamismo que acerca os problemas reais, a própria correspondência do modelo com a realidade favorece a adoção de novos requisitos e atendimento das necessidades do problema.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Este capítulo apresenta alguns experimentos realizados com a aplicação do modelo multiagente no PPTDP. O modelo foi aplicado em cenários fictícios e reais da malha brasileira de petróleo para um horizonte de planejamento de três períodos (i.e. cada período equivale a um mês). Os cenários fictícios possuem dimensões menores do que os cenários reais, porém, permitem demonstrar com maiores detalhes o funcionamento do modelo e a importância das principais heurísticas utilizadas. Por outro lado, os cenários reais buscam representar com maior fidelidade a malha brasileira de petróleo.

Devido à incompletude dos dados reais, algumas características dos cenários reais podem não corresponder exatamente à realidade (e.g. capacidade de armazenamento, balanço de massa). De qualquer forma, estes cenários permitem demonstrar o funcionamento do modelo em situações com maior diversidade e maior complexidade em termos topológicos. Para manter compatibilidade com o modo de planejamento executado manualmente pelos especialistas, estes cenários são organizados em níveis inter-região e intrarregião.

Os resultados de cada cenário são apresentados por meio de gráficos e tabelas que mostram alguns indicadores da solução. Basicamente, os gráficos apresentados foram extraídos da ferramenta de visualização de relatórios construída pela equipe da UTFPR, a qual também apresenta outras perspectivas de visualização dos resultados além das utilizadas nesta tese. Por sua vez, nas tabelas, os indicadores da solução são informados para cada período de planejamento e também de forma agregada, ou seja, para todo o horizonte de planejamento. Mais precisamente, os indicadores consistem nas seguintes informações: número de fluxos movimentados, número de leilões realizados, volume movimentado, custo total das operações de movimentação, tempo de execução, percentagem de atingimento da meta Brasil e principalmente, as percentagens de não atendimento da demanda e de violação da capacidade de armazenamento. Entre tais indicadores, apenas os dois últimos exigem um cálculo mais apurado por serem dependentes da relação entre as curvas de estoque e capacidades de armazenamento.

Conforme a equação (79), a percentagem de não atendimento da demanda, u_{gr} , de um dado grupo gr é calculada para cada dia $d \in H$ pela proporção entre o estoque final

$e_{b,prod,d}$ (i.e. estoque após a execução do otimizador) e inicial $e_{b,prod,d}^i$ (i.e. estoque antes da execução do modelo) de cada produto $prod \in gr^u$ em cada base $b \in B^u$, sendo que $gr^u \subseteq gr$ representa apenas os produtos com demanda a ser atendida (i.e. $e_{b,prod,d}^i < PL_{b,prod,per}^{min}$) e $B^u \subseteq B$ representa as bases que possuem tais demandas. Para cada produto, o valor médio representativo de toda a curva de estoque é calculado de acordo com a quantidade n de dias em que a curva de estoque inicial do produto (formada pela disposição do estoque antes da execução do planejador) violava o limite físico mínimo. Por fim, o valor médio global u_{gr} é obtido pela divisão da soma das médias de cada produto em déficit pelo próprio número de produtos em déficit em todas as bases ($|B^u| * |gr^u|$)¹².

$$u_{gr} = \left(\sum_b^{|B^u|} \sum_{prod}^{|gr^u|} \left(\sum_{per}^{|H|} \sum_d^{|per|} \frac{e_{b,prod,d}}{e_{b,prod,d}^i} \right) / n \right) / |B^u| * |gr^u|, e_{b,prod,d}^i < PL_{b,prod,per}^{min} \quad (79)$$

De forma semelhante, a percentagem de violação da capacidade de armazenamento de um dado grupo gr também é calculada por meio de uma média dos valores diários. Conforme a equação (80), a percentagem diária s_{gr} é calculada pela proporção entre o excedente de estoque do grupo de produto e o limite físico máximo (i.e. $e_{b,gr,d} - PL_{b,gr,per}^{max}$) em relação ao próprio limite físico máximo. Para definir um valor representativo da curva de estoque do grupo em uma determinada base, uma média é calculada de acordo com a quantidade m de dias em que a curva de estoque inicial do grupo (formada pelos estoques originais existentes antes da execução do planejador) violava o limite físico máximo. Como muitas bases não apresentam violação de estoque para um dado grupo, a média global apenas considera as bases $b \in B^s$, onde $B^s \subseteq B$ consiste no conjunto de bases que apresentam violação inicial da capacidade máxima de estoque para o grupo em análise.

$$s_{gr} = \left(\sum_b^{|B^s|} \left(\sum_{per}^{|H|} \sum_d^{|per|} \frac{e_{b,gr,d} - PL_{b,gr,per}^{max}}{PL_{b,gr,per}^{max}} \right) / m \right) / |B^s|, e_{b,prod,d} > PL_{b,gr,per}^{max} \quad (80)$$

De forma especial, estas duas percentagens apresentadas equacionalmente permitem avaliar a qualidade da solução em termos de satisfação da demanda e da capacidade das bases

¹² A lista das nomenclaturas dos conjuntos, índices e parâmetros utilizadas nesta tese estão apresentadas no APÊNDICE B.

que compõem o cenário. Estes são os principais indicadores a serem considerados na avaliação das soluções, podendo tal avaliação também ser auxiliada pela percentagem de atendimento da meta Brasil, quando houver. Com isso, salienta-se que o objetivo do modelo proposto é formar soluções factíveis em termos de estoque, com preferível, mas não necessária redução dos custos de transportes. Os experimentos foram executados em um computador com processador Intel core i7, com quatro núcleos de processamento, e 8 GB de memória.

Na realização dos experimentos, uma mesma instância do planejador multiagente foi utilizada para a execução de todos os cenários, ou seja, com a mesma configuração. Por conta da natureza determinística do modelo¹³, apenas uma execução foi realizada para cada cenário. A instância utilizada foi configurada para que os leiloeiros não ofereçam em seus anúncios o volume acima de seus limites físicos máximos. Ademais, a configuração também limita o volume máximo de um fluxo, ou seja, um fluxo de um produto *prod* se restringe a um volume máximo vf_{prod}^{max} correspondente a um dia de consumo do respectivo participante. Certamente, caso este fluxo não satisfaça o tamanho mínimo de lote para ser transportado, o participante pode solicitar o volume correspondente ao próprio lote mínimo da rota. Em algumas exceções, o participante pode solicitar uma quantidade maior do que o lote mínimo. Estas situações ocorrem em lances de ajuda ao leiloeiro, em lances de degradação interna ou de transbordo.

Obviamente, esta última configuração incentiva fechamentos de acordos envolvendo pequenas quantidades de produtos em cada leilão. Na verdade, este é o real benefício e intenção desta prática, pois tais quantidades permitem atender as demandas dos participantes com maior precisão. Ademais, esta configuração não necessariamente contribui para a formação de fluxos de transferência com pequenos volumes, uma vez que há a possibilidade de junção de fluxos que apresentam a mesma data de escoamento e rota. Assim, um único fluxo pode ser formado como resultado de diferentes acordos em diferentes leilões.

Neste capítulo, os experimentos são apresentados em duas seções. A seção 5.1 apresenta os experimentos envolvendo os cenários fictícios e a seção 5.2 apresenta os experimentos envolvendo os cenários reais. Por fim, a seção 5.3 apresenta a conclusão sobre o capítulo.

¹³ Considerando que o deadline dos leilões é formado por um tempo mais do que suficiente para o recebimento de todos os lances.

5.1 CENÁRIOS FICTÍCIOS

Esta seção apresenta três cenários fictícios a fim de elucidar as principais heurísticas que compõem o modelo multiagente apresentado. Por conta de seus tamanhos reduzidos, estes cenários são apresentados em forma de grafos, sendo que as bases são representadas pelos vértices e as rotas são representadas por arestas direcionais. Cada vértice representa um dado tipo de base, sendo identificado graficamente por um caractere particular. Em nível inter-região, um vértice pode representar uma região normal (letra R) ou uma região fictícia (letra F), em caso de operações de transbordo ou sobreestadia. Em nível intrarregião, um vértice pode representar uma base produtora (letra P), base consumidora (letra C), um terminal (letra T) ou então, uma base fictícia (letra F) para a realização das operações de transbordo ou sobreestadia. Ademais, cada aresta apresenta um valor numérico que corresponde ao custo de movimentação de uma unidade volumétrica pela rota representada.

Além da topologia destes cenários, as informações de estoque de cada produto e capacidade de armazenamento de cada base também são apresentadas em cada cenário. Estas informações são dadas para cada período de planejamento, permitindo um melhor entendimento dos resultados. Estas informações são apresentadas em forma de tabela a fim de facilitar a visualização das informações que são nativamente representadas em formato XML.

Portanto, os três cenários em análise são abordados nas seguintes subseções. A subseção 5.1.1 apresenta um cenário simples para elucidar as movimentações fundamentais de um único produto. A subseção 5.1.2 apresenta um cenário mais complexo que envolve múltiplos produtos, leilões de repasse com múltiplos saltos e operações de importação/exportação com o Exterior. Por fim, a subseção 5.1.3 apresenta um cenário com particularidades ímpares a fim de demonstrar o comportamento do modelo no tratamento das operações eventuais.

5.1.1 Cenário 1: Topologia de Único Nível Hierárquico Envolvendo a Transferência de Apenas um Único Produto em Operações Fundamentais

A topologia do corrente cenário é apresentada na Figura 52. Este cenário consiste no nível intrarregião de planejamento e suporta apenas um tipo de produto. O cenário é composto unicamente por 4 bases (i.e. b_1 , b_2 , b_3 e b_4) e 4 rotas, sendo 2 bases produtoras e 2 bases consumidoras. As bases produtoras estão conectadas diretamente às bases consumidoras. Neste caso, não há a necessidade de aplicação de leilões de repasse.

Pela análise do grafo, nota-se que há preferências em termos de custos para atendimento da demanda de cada base consumidora. Certamente, é mais preferível para a base b_3 adquirir o produto com a base b_1 do que com a base b_2 . Da mesma forma, a base b_4 apresenta maior preferência de aquisição do produto com a base b_2 do que com a base b_1 . No entanto, todas as rotas são compostas por dutos, os quais geralmente apresentam vazão padrão de 4u.v. Como exceção, a rota entre b_1 e b_3 apresenta propositalmente a vazão de 2u.v para o segundo período. Esta restrição inviabiliza o atendimento total da demanda de b_3 pela base b_1 .

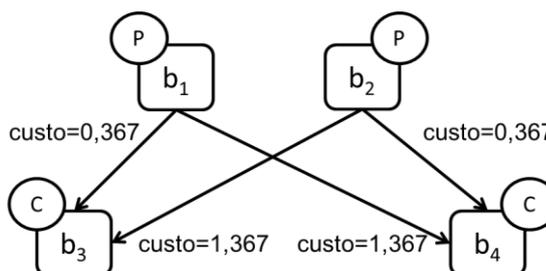


Figura 52 – Topologia do Cenário 1

As informações de estoque e capacidades de todas as bases do cenário são apresentadas na Tabela 2. Estas informações são dadas por período, sendo que o número de dias de cada período é apresentado dentro dos parêntesis no cabeçalho da coluna de cada período. Certamente, as curvas de estoque são formadas pela linearização do balanço de um dado produto por tais dias. Vale salientar que este cenário não tem a necessidade de atingimento da meta Brasil, pois se refere a um cenário intrarregião. A produção das bases é suficiente para atendimento das demandas, não necessitando de importações.

Tabela 2 – Informações de Estoque e Capacidade do Cenário 1

Base	Elemento	Atributo	1º Período (31)	2º Período (29)	3º Período (31)
b_1	Produto	Est. Inicial	3	---	---
		Balanço	128	80	80
	Grupo	Fís. Máx	100	90	100
		Op. Máx.	70	80	70
		Op. Min.	10	0	0
		Fís. Min.	0	0	0
b_2	Produto	Est. Inicial	3	---	---
		Balanço	128	60	25
	Grupo	Fís. Máx	100	90	100
		Op. Máx.	70	80	70
		Op. Min.	10	10	10
		Fís. Min.	0	0	0
b_3	Produto	Est. Inicial	15	---	---
		Balanço	-61	-80	-90
	Grupo	Fís. Máx	60	60	60
		Op. Máx.	30	30	30
		Op. Min.	5	5	5
		Fís. Min.	0	0	0

b₄	Produto	Est. Inicial	15	---	---
		Balço	-61	-80	-90
	Grupo	Fís. Máx	60	60	60
		Op. Máx.	30	30	30
		Op. Min.	5	5	5
		Fís. Min.	0	0	0
Estoque Total		170	150	75	

Este cenário apresenta algumas características que permitem evidenciar como as bases negociantes alcançam a satisfação e principalmente o equilíbrio dos estoques. Estas afirmações podem ser constatadas pela análise gráfica das curvas de estoques de cada base, conforme ilustrado na Figura 54 e Figura 54. Estas figuras apresentam respectivamente as curvas de estoque iniciais e as curvas de estoque finais de cada base. As curvas de estoque iniciais representam a situação do estoque antes da execução do otimizador e as curvas de estoque finais representam a situação do estoque após a execução do otimizador.

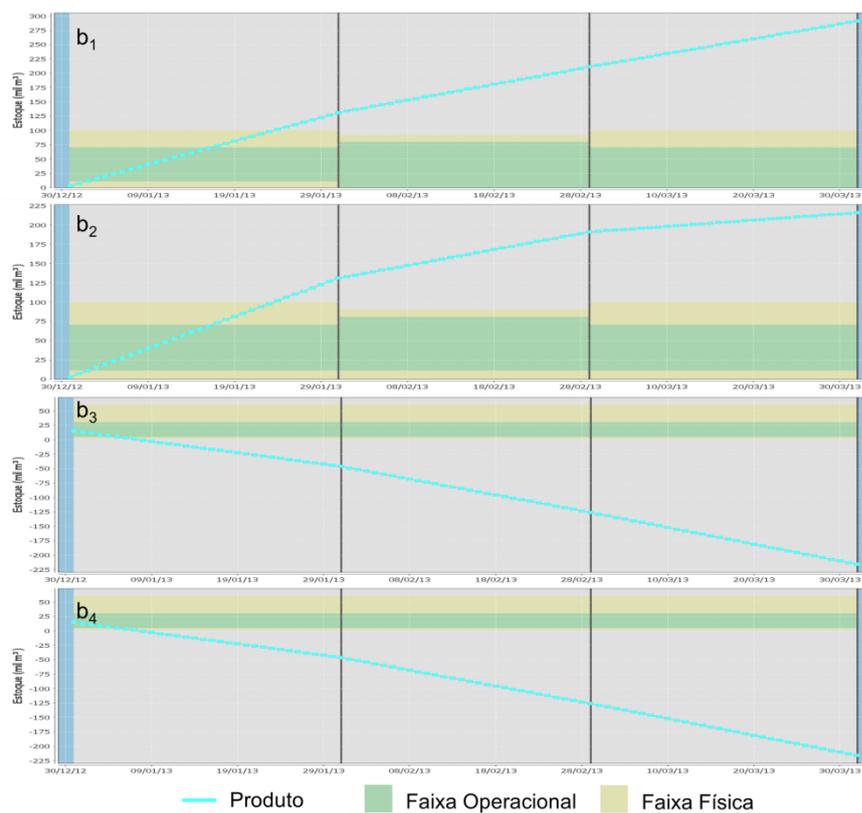


Figura 53 – Curvas de Estoque Iniciais do Cenário 1

Pela análise dos gráficos da Figura 54, pode-se constatar que todas as bases tiveram suas demandas atendidas e capacidades de armazenamento respeitadas. Também, pode-se notar que as bases consumidoras finalizaram o primeiro período com um estoque consideravelmente acima do limite mínimo operacional, movimentando um volume maior do que o mínimo necessário para se manter dentro da faixa operacional. No entanto, esta situação

ocorreu por conta da predição de violação da capacidade de estoque nas bases produtoras, fazendo com que as bases consumidoras atuassem colaborativamente a fim de evitar tais violações e também visando o equilíbrio de estoque entre as bases dentro da faixa operacional.

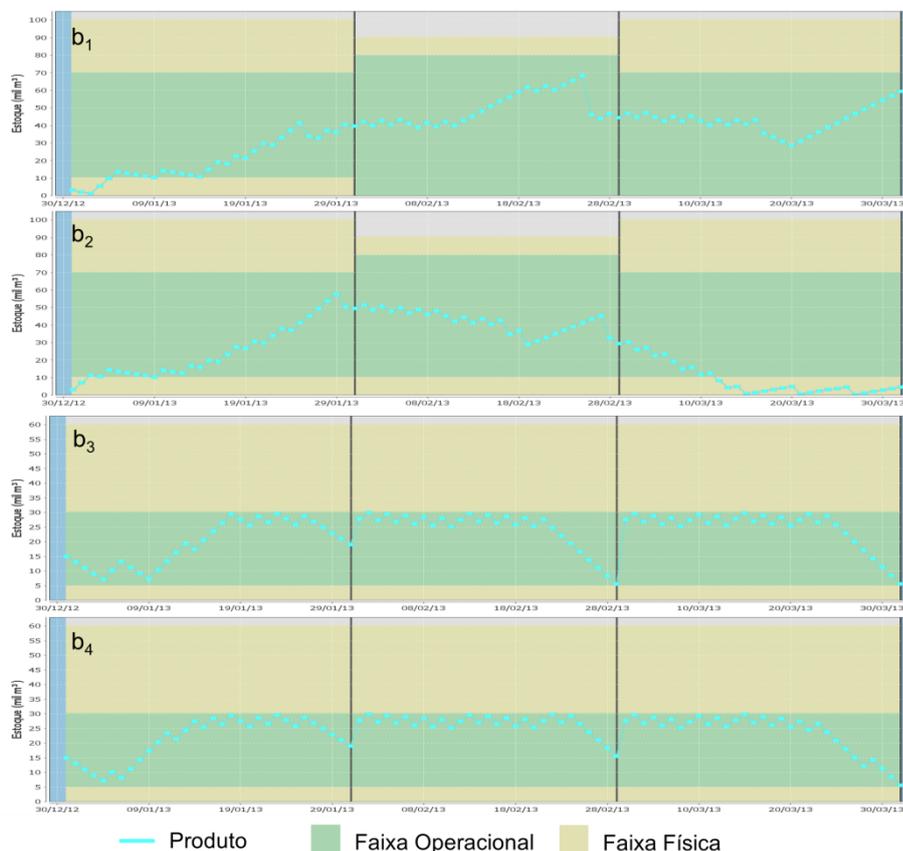


Figura 54 – Curvas de Estoque Finais do Cenário 1

Ainda, nota-se que em certos intervalos de dias, as bases produtoras se mantiveram abaixo de seus limites mínimos operacionais a fim de satisfazer a demanda operacional dos consumidores. Certamente, os consumidores apresentam maior preferência de se manter na faixa operacional do que os produtores, os quais geralmente apresentam curvas de estoques ascendentes. No terceiro período, nota-se que a base produtora b_2 viola o limite mínimo operacional, enquanto a base produtora b_1 apresenta uma excedência de volume dentro da faixa operacional. Esta situação ocorre por conta da preferência da base b_4 em adquirir o produto de b_2 em termos de custos de movimentação. Conforme a modelagem, o agente gerente prioriza as entregas mais vantajosas para cada participante, indiferente da situação de estoque do leiloeiro. Esta prática permite ilustrar a essência do modelo, a qual consiste na priorização do atendimento das demandas.

Mais precisamente, a Figura 55 apresenta o volume agregado por período transferido para atendimento das demandas das bases b_3 e b_4 . Cada barra horizontal representa o volume recebido de uma dada base produtora em um dado período. No primeiro período, nota-se que as bases consumidoras adquiriram o produto das bases produtoras menos custosas para cada qual. Porém, no segundo período, o mesmo não ocorre. Neste período, a base b_3 não consegue atender completamente a sua demanda transferindo o produto de b_1 , uma vez que a rota entre b_1 e b_3 é composta por um duto com capacidade extremamente limitada. Por causa desta restrição, a base b_3 transfere o volume faltante da base b_2 . De forma semelhante, a base b_4 também transfere parcelas de ambas as bases produtoras. Porém, a base b_4 somente transfere de b_1 a fim de evitar que tal base produtora viole sua capacidade de armazenamento. No terceiro período, a base b_4 também movimenta uma pequena parcela de b_1 , mas neste caso, tal movimentação ocorre com o objetivo de atender a sua própria demanda devido à insuficiência de estoque em b_2 .

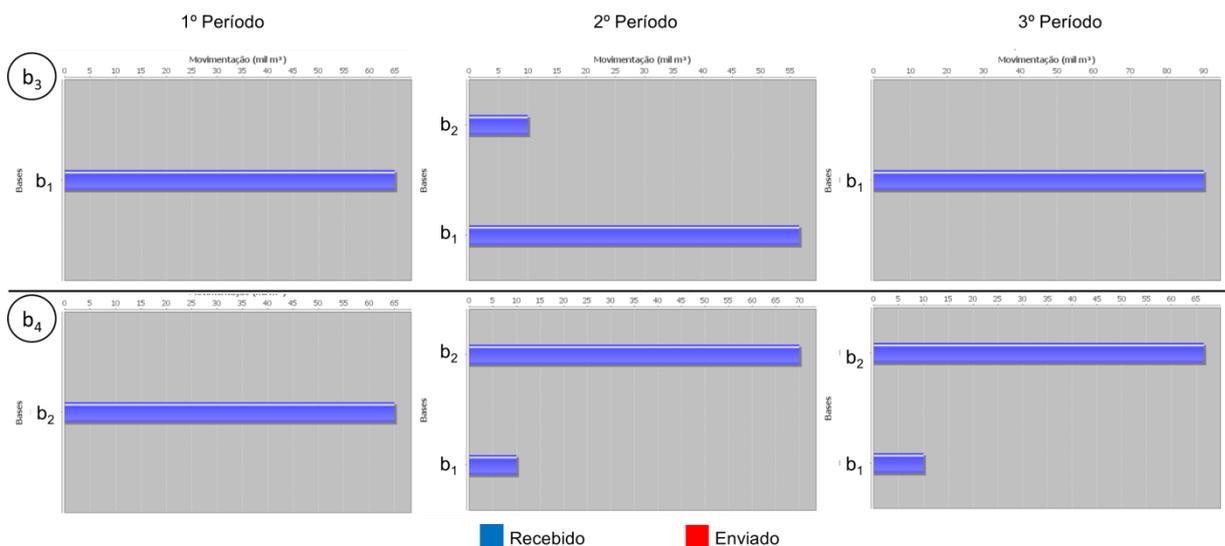


Figura 55 – Movimentações Agregadas por Período no Cenário 1

Finalmente, a Tabela 3 apresenta os indicadores gerais da solução. Pela análise da tabela, pode-se notar que a quantidade de leilões é superior a quantidade de fluxos movimentados. Esta é uma característica natural do modelo, pois nem todos os leilões realizados resultam em acordos. Este fato é comum quando um participante vence mais de um leilão simultâneo, optando pelo fechamento do acordo com apenas um deles em virtude do contexto daquele momento. Ademais, nota-se que muitos indicadores não são apresentados na tabela, o que se deve à simplicidade do cenário em análise. De qualquer forma, a análise deste cenário permitiu visualizar na prática as características mais fundamentais do modelo multiagente. As demais características são demonstradas nos cenários seguintes.

Tabela 3 – Indicadores dos Resultados do Cenário 1

	1º Período	2º Período	3º Período	Total
Quantidade de fluxos	26	26	28	80
Quantidade de leilões	35	40	40	115
Volume transferido (mil m³)	130	143,1	170	443,1
Demanda não atendida	---	---	---	0%
Violação da cap. de armazenamento	---	---	---	0%
Custo das transferências (mil R\$)	47,77	72,57	72,47	192,81
Tempo de execução				1s 334ms

5.1.2 Cenário 2: Topologia Multinível Envolvendo Transferências de Múltiplos Produtos por meio de Operações Fundamentais

A topologia do cenário 2 é apresentada na Figura 56. Este cenário possui uma complexidade maior do que o cenário 1. O cenário suporta três tipos de produtos pertencentes a um único grupo e representa o nível inter-região de planejamento. Por conta disto, todos os vértices representam regiões. O cenário também é composto pela região Exterior, permitindo operações de importação/exportação a fim de propiciar o atingimento da meta Brasil no final de cada período. Em suma, o cenário é composto por 8 regiões e 10 rotas.

Neste cenário, nem todas as bases estão conectadas diretamente umas com as outras. Por exemplo, a base b_1 está conectada indiretamente com a base b_6 por meio de três diferentes rotas (i.e. b_1b_3 , b_3b_4 , b_4b_6). Então, para aumentar a precisão das transferências entre as bases, se faz necessário aderir ao uso de leilões de repasse. Portanto, este experimento apresenta a influência das operações de importação/exportação e de leilões de repasse na formação de uma solução de planejamento.

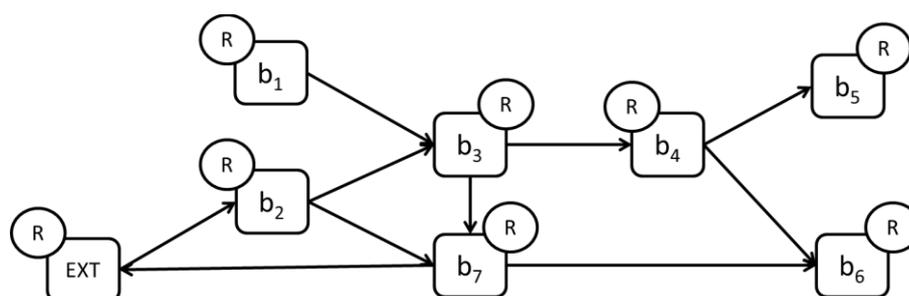


Figura 56 – Topologia de Cenário 2

As informações de estoque de cada produto e capacidades de armazenamento do grupo em cada base do cenário são apresentadas na Tabela 4. Pela análise da tabela, nota-se que apenas as bases b_1 , b_2 e b_7 apresentam balanço positivo dos produtos, com exceção da base b_7 que apresenta balanço zero para o produto 1. Por sua vez, a base b_3 apresenta balanço zero para todos os produtos. Finalmente, as bases b_4 , b_5 e b_6 são consumidoras dos três produtos. Considerando a existência da meta Brasil (apresentada na penúltima linha da tabela)

e do estoque total de cada produto no cenário, nota-se a necessidade de operações de importação/exportação a fim de atingir a meta para o grupo e ao mesmo tempo manter uma proporção de cada produto no Brasil de acordo com os somatórios dos valores de balanço de tais produtos (apresentado na tabela). De acordo com o modelo, o produto que apresenta maior demanda, deve representar uma parcela maior do estoque brasileiro.

Para viabilizar o atingimento da meta, a região Exterior foi criada com estoque e capacidade estritamente suficiente para o Brasil atingir tal objetivo. O estoque de cada produto no Exterior foi calculado de acordo com a proporção entre os somatórios de cada produto no Brasil (apresentado na tabela). Por conta disto, a soma dos valores de estoque/demanda de um dado grupo de produtos no Brasil com os valores de estoque/demanda do mesmo grupo no Exterior resulta exatamente na meta Brasil. Vale salientar que o Exterior não apresenta balanço, mas apenas estoque inicial positivo ou negativo em cada período. Esta prática é usada para que todo o estoque ou toda a demanda do Exterior esteja disponível já no início de cada período a fim de facilitar o atendimento da meta do Brasil.

Tabela 4 – Informações de Estoque e Capacidade do Cenário 2

Base	Elemento	Atributo	1º Período (31)	2º Período (30)	3º Período (31)
b₁	Produto 1	Est. Inicial	10	---	---
		Balanço	90	100	100
	Produto 2	Est. Inicial	50	---	---
		Balanço	50	70	70
	Produto 3	Est. Inicial	80	---	---
		Balanço	40	60	60
	Grupo	Fís. Máx.	250	250	250
		Op. Máx.	200	200	200
		Op. Mín.	20	20	20
		Fís. Mín.	0	0	0
b₂	Produto 1	Est. Inicial	10	---	---
		Balanço	140	140	140
	Produto 2	Est. Inicial	50	---	---
		Balanço	40	70	70
	Produto 3	Est. Inicial	50	---	---
		Balanço	40	70	70
	Grupo	Fís. Máx.	250	200	200
		Op. Máx.	200	180	200
		Op. Mín.	20	20	20
		Fís. Mín.	0	0	0
b₃	Produto 1	Est. Inicial	10	---	---
		Balanço	0	0	0
	Produto 2	Est. Inicial	7	---	---
		Balanço	0	0	0
	Produto 3	Est. Inicial	20	---	---
		Balanço	0	0	0
	Grupo	Fís. Máx.	100	100	100

		Op. Máx.	100	100	100
		Op. Min.	5	5	5
		Fís. Min.	0	0	0
b₄	Produto 1	Est. Inicial	20	---	---
		Balanço	-240	-200	-200
	Produto 2	Est. Inicial	10	---	---
		Balanço	-40	-30	-30
	Produto 3	Est. Inicial	10	---	---
		Balanço	-20	-20	-20
	Grupo	Fís. Máx.	180	180	120
		Op. Máx.	150	150	100
Op. Min.		15	15	10	
Fís. Min.		0	0	0	
b₅	Produto 1	Est. Inicial	15	---	---
		Balanço	-50	-40	-40
	Produto 2	Est. Inicial	10	---	---
		Balanço	-40	-30	-30
	Produto 3	Est. Inicial	10	---	---
		Balanço	-30	-30	-30
	Grupo	Fís. Máx.	100	100	100
		Op. Máx.	80	80	80
Op. Min.		5	5	5	
Fís. Min.		0	0	0	
b₆	Produto 1	Est. Inicial	20	---	---
		Balanço	-80	-80	-80
	Produto 2	Est. Inicial	30	---	---
		Balanço	-20	-30	-20
	Produto 3	Est. Inicial	10	---	---
		Balanço	-20	-20	-20
	Grupo	Fís. Máx.	100	100	100
		Op. Máx.	80	80	80
Op. Min.		0	0	0	
Fís. Min.		0	0	0	
b₇	Produto 1	Est. Inicial	10	---	---
		Balanço	0	0	0
	Produto 2	Est. Inicial	50	---	---
		Balanço	50	70	70
	Produto 3	Est. Inicial	80	---	---
		Balanço	40	60	60
	Grupo	Fís. Máx.	250	250	250
		Op. Máx.	200	200	200
Op. Min.		0	0	0	
Fís. Min.		0	0	0	
EXT	Produto 1	Est. Inicial	224	-24,288	175,288
		Balanço	0	0	0
	Produto 2	Est. Inicial	-88,245	-68,388	-175,348
		Balanço	0	0	0
	Produto 3	Est. Inicial	-110,754	-78,322	-185,939
		Balanço	0	0	0
	Grupo	Fís. Máx.	700	700	700
		Op. Máx.	0	0	0
Op. Min.		0	0	0	
Fís. Min.		0	0	0	
Meta Brasil			537	526	510

Estoque Brasil do Produto 1	-45	-80	-80
Estoque Brasil do Produto 2	247	120	130
Estoque Brasil do Produto 3	310	120	120
Estoque total do Brasil	512	697	696
Estoque total do Exterior	25	171	-186

As curvas de estoque iniciais das bases que formam o cenário corrente são apresentadas na Figura 57. Por sua vez, as curvas de estoque finais são apresentadas na Figura 58. Pela análise do estado final dos estoques (gráficos à direita da figura), pode-se notar que toda a demanda foi satisfeita e que não houve violações das capacidades de armazenamento.

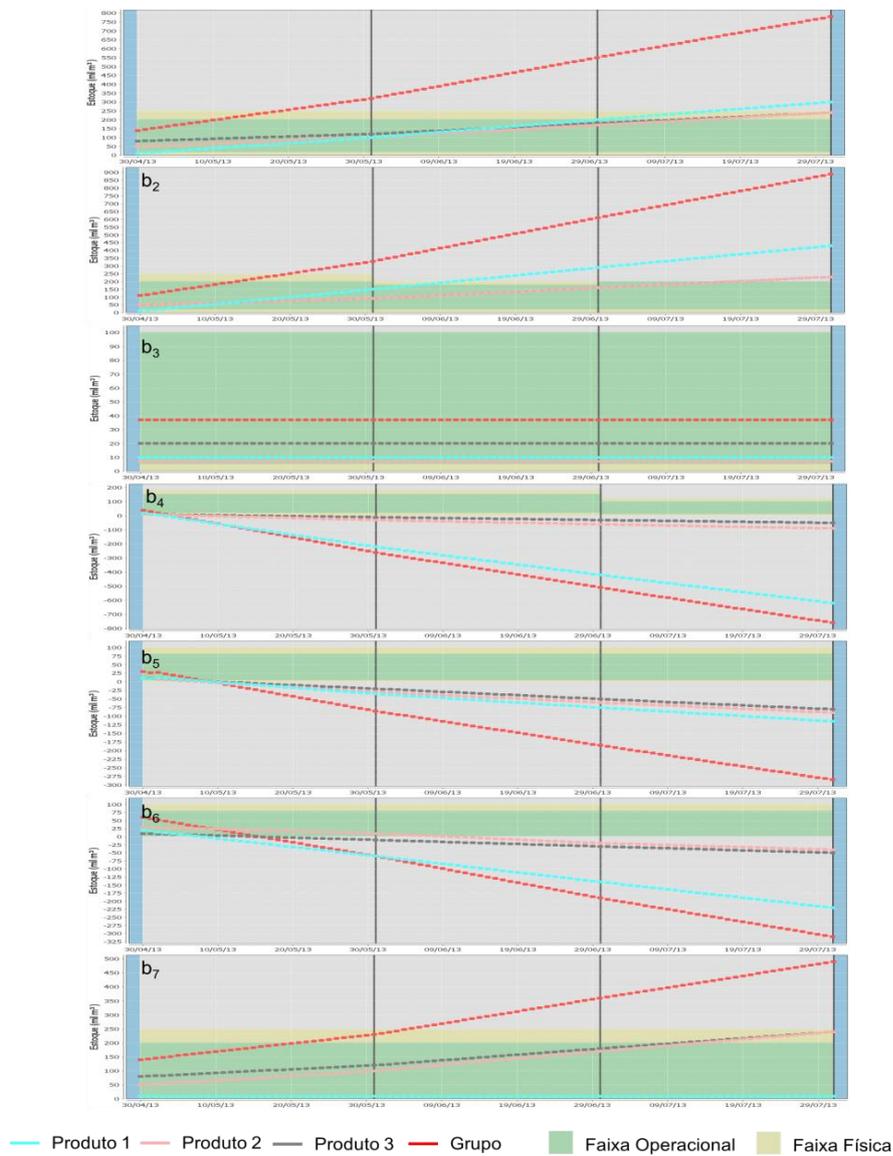


Figura 57 – Curvas de Estoque Iniciais do Cenário 2

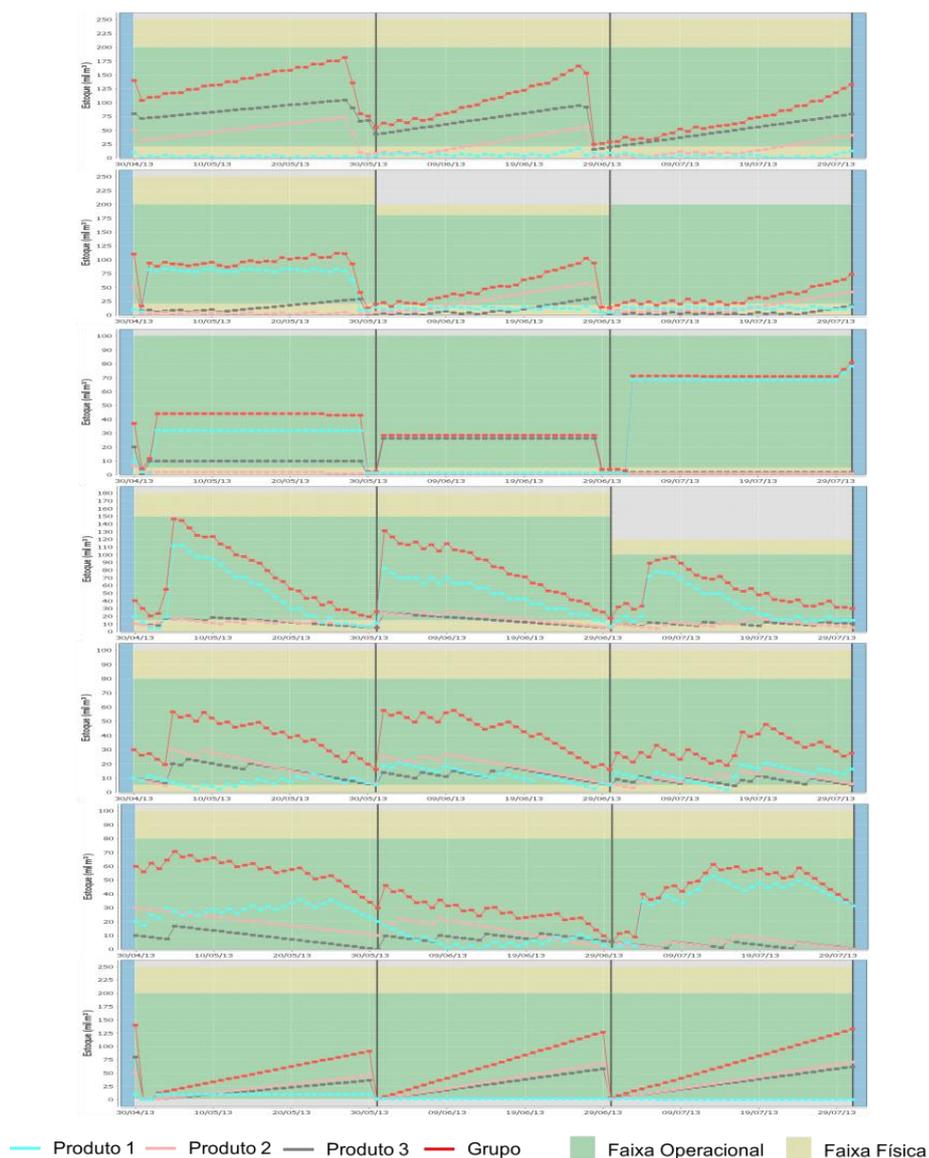


Figura 58 – Curvas de Estoque Finais do Cenário 2

Este resultado foi obtido por meio da configuração que habilita um número máximo de dois ciclos de repasse para um mesmo anúncio. Com isso, as bases produtoras b_1 e b_2 se tornaram aptas a ofertar os seus anúncios diretamente às bases consumidoras b_5 e b_6 , por meio dos leilões de repasse realizados pelas bases b_3 e b_4 .

Com outras configurações de ciclos de repasse, a solução não se apresentou tão satisfatória. Ao habilitar apenas um ciclo de leilão de repasse, o cenário apresentou média de 11,212% de não atendimento da demanda entre as bases e produtos em déficit. Mais precisamente, este valor representa o não atendimento da demanda da base b_5 , onde as curvas de estoque dos produtos 2 e 3 permaneceram respectivamente 63 dias e 12 dias em déficit. Esta situação ocorreu porque a base b_4 movimentou de b_1 e b_2 apenas na intenção de atender a sua própria demanda, oferecendo apenas o excedente, quando havia, aos consumidores

conectados (i.e. b_5 e b_6). Em termos de tempo de processamento, este experimento executou em 7s 467ms.

Uma solução menos satisfatória ocorreu quando a funcionalidade de leilões de repasse foi completamente desabilitada. Neste caso, a percentagem média de não atendimento da demanda chegou a 20,646%, envolvendo sete curvas de estoque referentes às bases b_4 , b_5 e b_6 . Ademais, também houve violação da capacidade física máxima em b_1 , chegando a uma percentagem média de 49,974% nesta base. Em termos de processamento, este experimento executou em 4s 782ms.

Por conta destes resultados, percebe-se a importância dos leilões de repasse para o melhoramento da qualidade das soluções. Certamente, os leilões de repasse contribuem para decisões mais acertadas ao envolver um número maior de interessados e suas respectivas prioridades no recebimento de um dado produto. Por outro lado, pode-se observar que esta precisão envolve, obviamente, um maior consumo de processamento.

Ademais, como este cenário suporta múltiplos produtos em um grupo, os gráficos apresentados na Figura 58 também apresentam a curva de estoque do grupo. Esta curva de estoque é representada graficamente pela cor vermelha. Portanto, ao analisar os gráficos de cada base, nota-se que todas as curvas de estoque do grupo se mantiveram dentro da faixa operacional do respectivo grupo.

Nota-se também, que a base b_3 finalizou o terceiro período com um estoque elevado do produto 1, sendo que ela não apresenta consumo deste produto, servindo apenas como um ponto de passagem para o atendimento dos reais consumidores. Porém, este nível elevado de estoque se deve às importações realizadas a fim do Brasil alcançar sua meta.

Deste modo, o Brasil praticamente conseguiu atingir a sua meta de estoque em todos os períodos, obtendo um percentual de satisfação de 99,93%. Este e outros indicativos da solução estão apresentados na Tabela 5. O Brasil somente não conseguiu satisfazer completamente a sua meta no terceiro período, pois o Exterior finalizou tal período com um pequeno excedente de 0,992 mil m^3 . Este volume não pôde ser importado por conta da restrição de lote mínimo da rota de importação, sendo este igual a 5 mil m^3 .

Em suma, o Brasil realizou operações de importação e exportação para atingir a sua meta. Ambos os tipos de operações foram necessárias por conta da incompatibilidade dos produtos para degradação e necessidade de satisfação da proporção de estoque de cada produto no Brasil. Mesmo que tais proporções possam parecer imprecisas ao serem calculadas

em termos dos valores de balanço, a mesma prática pode ser bastante satisfatória quando houver metas particulares para cada produto.

Tabela 5 – Indicadores dos Resultados do Cenário 2

	1º Período	2º Período	3º Período	Total
Quantidade de fluxos	142	140	169	451
Quantidade de leilões	208	164	261	633
Volume transferido internamente (mil m³)	1554	1316	1237,1	4107,2
Volume importado (mil m³)	224	0	174,3	398,3
Volume exportado (mil m³)	199	171	361,3	731,3
Atendimento da meta Brasil	100%	100%	99.8%	99.93%
Demanda não atendida	---	---	---	0%
Violação da cap. de armazenamento	---	---	---	0%
Custo das transferências (mil R\$)	269,92	203,75	243,70	717,38
Tempo de execução				14s 537ms

5.1.3 Cenário 3: Operações Eventuais Envolvendo Múltiplos Produtos

O cenário a ser analisado nesta seção foi concebido na intenção de demonstrar a importância da realização de operações eventuais (i.e. operações de degradação, transbordo e sobreestadia) na formação de uma solução factível. A topologia do referido cenário é apresentado na Figura 59. Em suma, o cenário consiste no nível intrarregião de planejamento, suporta três diferentes tipos de produtos (i.e. produtos 1, 2 e 3) e é composto por seis bases reais e uma fictícia, sendo esta responsável pela realização das operações de transbordo e sobreestadia. Na figura, as arestas pontilhadas representam as rotas fictícias e as arestas contínuas representam as rotas normais. Cada par de rotas normal e fictícia possui o mesmo valor de lote mínimo, sendo este valor representado na figura entre os respectivos pares de arestas.

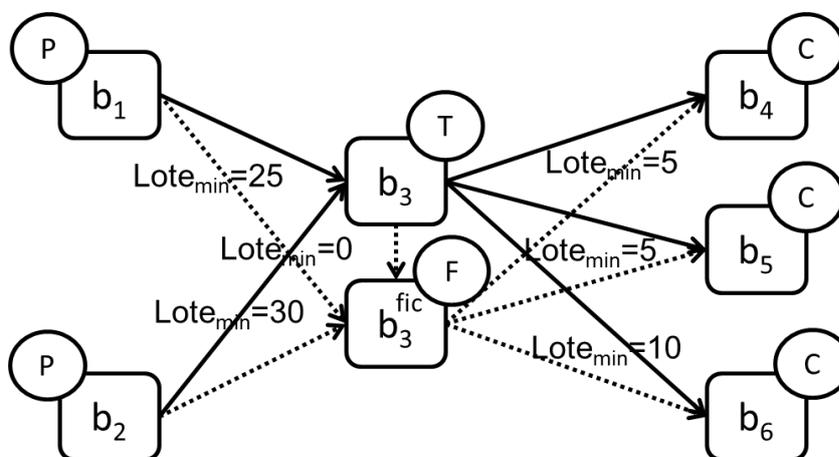


Figura 59 – Topologia do Cenário 3

O cenário apresenta algumas particularidades em relação à disposição dos estoques e capacidades que precisam ser evidenciadas a fim de auxiliar na análise dos resultados. As informações sobre o estoque e capacidade das bases deste cenário são apresentadas na Tabela 6. Pela análise da tabela, vale salientar que:

- As bases b_1 e b_2 são produtoras dos produtos 2 e 3. Ambas as bases precisam escoar seus produtos por causa da previsão de violação da capacidade física de armazenamento.
- A base b_3 apresenta capacidade de armazenamento menor do que os lotes mínimos das rotas de recebimento de produto. Mais precisamente, a capacidade de armazenamento de 20 mil m^3 é menor do que os lotes mínimos de 25 mil m^3 e 30 mil m^3 das rotas entre as bases b_1 e b_3 , respectivamente.
- Nenhuma base do cenário é produtora do produto 1.
- As únicas operações de degradação permitidas consistem na transformação do produto 2 ou produto 3 no produto 1.
- As bases b_1 , b_4 e b_5 apresentam demanda do produto 1.
- As bases b_4 e b_5 apresentam demanda de todos os três produtos.
- A base b_3 apenas tem demanda do produto 2.
- A base b_6 apenas tem demanda do produto 3. Ademais, a capacidade de armazenamento diária de b_6 consiste exatamente no tamanho do lote mínimo da única rota de recebimento.

Tabela 6 – Informações de Estoque e Capacidade do Cenário 3

Base	Elemento	Atributo	1º Período (31)	2º Período (29)	3º Período (31)
b_1	Produto 1	Est. Inicial	10	---	---
		Balanço	-20	-20	-20
	Produto 2	Est. Inicial	50	---	---
		Balanço	50	70	70
	Produto 3	Est. Inicial	80	---	---
		Balanço	40	60	60
	Grupo	Fís. Máx.	250	250	250
		Op. Máx.	200	200	200
		Op. Min.	0	0	0
		Fís. Min.	0	0	0
b_2	Produto 1	Est. Inicial	0	---	---
		Balanço	0	0	0
	Produto 2	Est. Inicial	50	---	---
		Balanço	40	70	70
	Produto 3	Est. Inicial	50	---	---
		Balanço	40	70	70
	Grupo	Fís. Máx.	200	200	200
		Op. Máx.	150	150	150

		Op. Min.	0	0	0
		Fís. Min.	0	0	0
b₃	Produto 1	Est. Inicial	0	---	---
		Balanço	0	0	0
	Produto 2	Est. Inicial	7	---	---
		Balanço	-10	-10	-10
	Produto 3	Est. Inicial	0	---	---
		Balanço	0	0	0
	Grupo	Fís. Máx.	20	20	20
		Op. Máx.	20	20	20
		Op. Min.	0	0	0
Fís. Min.		0	0	0	
b₃^{fic}	Produto 1	Est. Inicial	0	---	---
		Balanço	0	0	0
	Produto 2	Est. Inicial	0	---	---
		Balanço	0	0	0
	Produto 3	Est. Inicial	0	---	---
		Balanço	0	0	0
	Grupo	Fís. Máx.	120	120	120
		Op. Máx.	0	0	0
		Op. Min.	0	0	0
Fís. Min.		0	0	0	
b₄	Produto 1	Est. Inicial	20	---	---
		Balanço	-50	-40	-40
	Produto 2	Est. Inicial	10	---	---
		Balanço	-40	-30	-30
	Produto 3	Est. Inicial	10	---	---
		Balanço	-20	-20	-20
	Grupo	Fís. Máx.	120	120	120
		Op. Máx.	100	100	100
		Op. Min.	20	20	20
Fís. Min.		0	0	0	
b₅	Produto 1	Est. Inicial	10	---	---
		Balanço	-50	-40	-40
	Produto 2	Est. Inicial	10	---	---
		Balanço	-40	-30	-30
	Produto 3	Est. Inicial	10	---	---
		Balanço	-30	-30	-30
	Grupo	Fís. Máx.	100	100	100
		Op. Máx.	80	80	80
		Op. Min.	10	10	10
Fís. Min.		0	0	0	
b₆	Produto 1	Est. Inicial	0	---	---
		Balanço	0	0	0
	Produto 2	Est. Inicial	0	---	---
		Balanço	0	0	0
	Produto 3	Est. Inicial	10	---	---
		Balanço	-20	-20	-20
	Grupo	Fís. Máx.	10	10	10
		Op. Máx.	10	10	10
		Op. Min.	0	0	0
Fís. Min.		0	0	0	
Estoque Total			217	247	277

Em relação aos resultados do experimento, as curvas de estoque iniciais e finais que permitem o acompanhamento gráfico das alterações de estoque das bases são apresentadas respectivamente na Figura 60 e Figura 61.

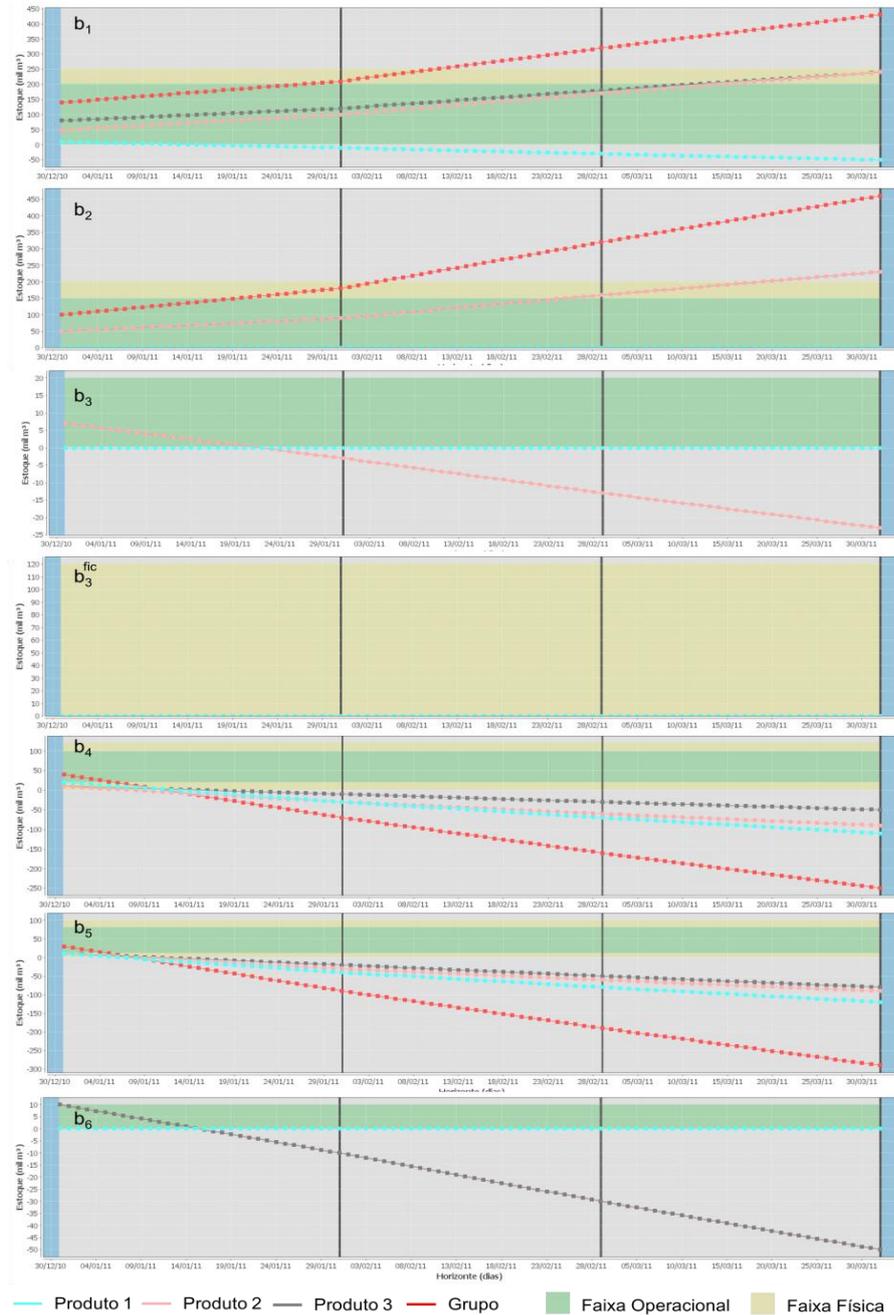


Figura 60 – Curvas de Estoque Iniciais do Cenário 3

Pela análise do estado final dos estoques na Figura 61, pode-se notar que as demandas de cada produto foram satisfeitas e que as curvas de estoque do grupo em cada base se mantiveram dentro das respectivas faixas operacionais. Além disso, pode-se notar que não houve violações de capacidade de armazenamento.

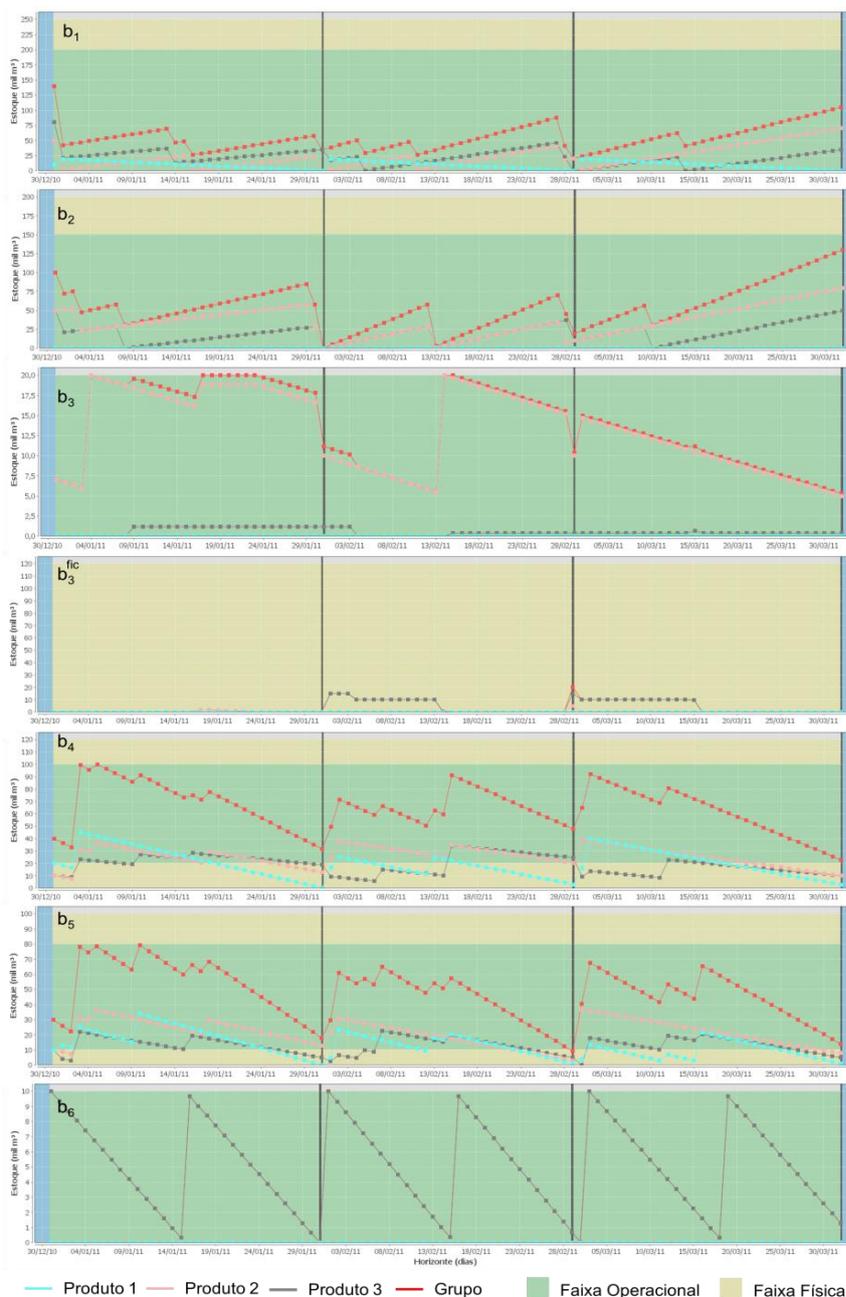


Figura 61 – Curvas de Estoque Finais do Cenário 3

Certamente, a solução factível apresentada exigiu a realização de um conjunto preciso de operações fundamentais e eventuais. Estas operações serão descritas de forma genérica a seguir na intenção de prover um melhor entendimento sobre as principais características do modelo.

Como exemplo da ocorrência de operações eventuais, as demandas do produto 1 das bases b_1 , b_4 e b_5 foram totalmente supridas por meio de sucessivas operações de degradação dos produtos 2 e 3. Também, pode-se notar pela análise dos gráficos que as bases b_1 , b_4 e b_5 degradaram somente o volume necessário para suprir as suas demandas do produto 1 em cada

período, evitando qualquer excesso de estoque deste produto. Em relação às operações de transbordo, estas foram realizadas pela base b_3^{fic} para transferir uma grande parcela da produção de b_1 e b_2 a fim de atender as demandas dos consumidores b_4 , b_5 e b_6 . Ainda, a própria demanda do produto 1 da base b_3 foi satisfeita por operações de transbordo realizadas pela base b_3^{fic} .

Também, a base b_3 teve grande contribuição na redução das operações de sobreestadia na base fictícia b_3^{fic} . Ela contribuiu com o armazenamento do estoque remanescente das operações de transbordo de b_3^{fic} , no que se refere ao produto 1 e até mesmo ao produto 3, mesmo que a base não apresente demanda para este último. Ademais, a base b_3 ainda colaborou por meio de recorrentes repasses do volume excedente recebido de b_3^{fic} para o atendimento das demandas das bases consumidoras. Nestas operações, o produto 3 pôde ser escoado em dias mais posteriores sem a inconveniência das operações de sobreestadia.

Entretanto, mesmo com a colaboração da base b_3 , as operações de sobreestadia na base b_3^{fic} não puderam ser evitadas por completo. As operações de sobreestadia ocorreram no segundo e terceiro período e envolveram apenas o produto 3. Estas operações ocorreram por causa da demanda da base b_6 por tal produto e principalmente por causa da capacidade de armazenamento reduzida desta base. Desta forma, o volume desejado precisou ficar armazenado na base fictícia (i.e. navio atracado) por intervalos de dias à espera da liberação de capacidade de armazenamento na base b_6 . Neste caso em particular, a base b_3 não conseguiu evitar a sobreestadia por não possuir capacidade de armazenamento suficiente, uma vez que tal capacidade estava alocada pelo produto 2 (também obtido com o intuito de evitar operações de sobreestadia na base b_3^{fic}).

Por fim, os valores dos indicadores da solução são apresentados na Tabela 7. Nesta tabela, em comparação às tabelas apresentadas em cenários anteriores, apresentam-se os indicadores das operações de degradação e transbordo. Pela análise de tais dados, nota-se que tais operações não foram realizadas de forma demasiada, quando comparadas com a quantidade total de fluxos movimentados. Percebe-se que tais operações eventuais somente são realizadas em situações necessárias a fim de evitar desperdícios. Portanto, este cenário apresentou a importância das operações eventuais para a viabilização de soluções factíveis, mais particularmente em um cenário em que elas são imprescindíveis.

Tabela 7 – Indicadores dos Resultados do Cenário 3

	1º Período	2º Período	3º Período	Total
Quantidade de fluxos	35	35	18	88
Quantidade de leilões	97	93	94	284
Volume transferido internamente (mil m³)	742,8	697,7	429,8	1870,3
Operações de Degradação	5	10	7	22
Quant. Degradada (mil t)	80	103,9	99,7	282,9
Operações de Transbordo	8	10	4	22
Demanda não atendida	---	---	---	0%
Violação da cap. de armazenamento	---	---	---	0%
Custo das transferências (mil R\$)	73,43	73,85	44,98	192,25
Tempo de execução				3s 718ms

5.2 CENÁRIOS REAIS

Esta seção apresenta cinco cenários reais a fim de elucidar o comportamento do modelo multiagente em situações reais. No entanto, os cenários em análise não possuem total compatibilidade com o ambiente real por conta da dificuldade na aquisição de alguns dados, havendo a necessidade de certas aproximações à realidade. Mesmo assim, tais cenários apresentam maior complexidade topológica do que os cenários fictícios, envolvendo um número maior de bases, rotas e até mesmo produtos (no caso da rede de claros).

Por conta de tal complexidade, as topologias dos cenários não serão apresentadas em forma de grafo. Elas serão apresentadas em forma de tabelas relacionais, as quais relacionam as bases de origem e destino de acordo com as rotas cadastradas. Ademais, as informações de estoque e capacidade de armazenamento de cada base não são detalhadamente apresentadas. Em contrapartida, são apresentadas apenas as informações agregadas de estoque para cada produto. Em cenários inter-região, ainda apresentam-se as informações de estoque para o atingimento da meta Brasil.

Em relação aos resultados, estes continuam sendo mostrados graficamente em termos de curvas de estoque iniciais e finais de cada produto. Porém, por conta da complexidade das topologias, as capacidades de armazenamento que envolvem as curvas de estoque não são apresentadas particularmente para cada base. Ao invés disso, as curvas de estoque de um dado tipo de produto de cada base do cenário são apresentadas de forma conjunta em um único gráfico, sem as informações sobre as faixas operacionais e físicas. Entretanto, como todas as bases apresentam o mesmo limite físico mínimo (i.e. igual à zero), a análise dos gráficos permitirá a verificação do grau de atendimento da demanda em cada cenário. Por fim, os resultados dos cenários também podem ser analisados por meio da tabela de indicadores.

Ao analisar a tabela, pode-se notar que a região PB não apresenta rota para recebimento e nem para envio. Na verdade, esta região não apresenta produção ou demanda para o grupo de GLP. Ademais, nota-se que algumas regiões podem apenas enviar produto (i.e. EX (Exterior)) e outras apenas receber (i.e. PR e PA), enquanto outras podem exercer ambas as operações. Também, nota-se que apenas três regiões apresentam suporte a importações dos produtos (i.e. BA, RJ e RS), as quais contribuem para o Brasil alcançar a meta do grupo.

As informações sobre o estoque e meta do Brasil são dadas na Tabela 9. A tabela apresenta o estoque agregado do Brasil para cada produto no final de cada período, cuja unidade de medida é mil t. Ainda, a tabela apresenta o estoque total do grupo no final de cada período, já considerando o atingimento da meta no período anterior, quando houver. Como o Brasil é importador de GLP, ele precisa importar o estoque total disponível no Exterior a fim de alcançar a sua meta. Neste cenário, algumas importações precisam ser respeitadas, as quais se referem aos transportes comprometidos. A tabela apresenta a quantidade agregada total de importação já definida a priori pelo usuário. Mais precisamente, estes fluxos comprometidos se referem à importação dos produtos propano e butano. Conforme o cenário, estes produtos são degradáveis para GLP.

Tabela 9 – Informações sobre o Estoque e Meta do Brasil no Cenário 4

	1º Período (31)	2º Período (29)	3º Período (31)
Meta Brasil (mil t)	202,20	212,40	198,60
Estoque Brasil de GLP (mil t)	147,130	-307,270	-195,287
Estoque Brasil de propano (mil t)	-103,646	-82,882	-83,999
Estoque Brasil de butano (mil t)	-23,786	-70,811	-64,899
Estoque total do grupo (mil t)	19,698	-258,763	-131,765
Estoque total do Exterior (mil t)	182,544	471,183	330,386
Transp. Compromet. de Importação (mil t)	21,156	12,417	0

Além dos fluxos comprometidos de importação, o cenário também possui alguns fluxos em trânsito e fluxos de transportes comprometidos internos ao Brasil. Tais quantidades são apresentadas na Tabela 10, juntamente com outros indicativos da solução. Conforme especificado no modelo, estes fluxos afetam a formação das curvas de estoque iniciais das regiões, inserindo algumas imperfeições a tais curvas decorrentes dos escoamentos ou recebimentos. Estes fluxos geralmente auxiliam no processo de busca de uma solução factível, mas quando usados de forma inadvertida podem dificultar a construção de tal solução. Por exemplo, os estoques em trânsito recebidos no início do primeiro período,

certamente auxiliam no atendimento da demanda que não poderia ocorrer de outra forma por conta do tempo de transporte das rotas. Por outro lado, se o estoque em trânsito consistir em um volume elevado, pode faltar capacidade na base receptora para armazenamento do produto. Também, os transportes comprometidos podem criar ou elevar a demanda de uma base de origem de escoamento a partir de um dado dia, precisando que este déficit seja satisfeito por outras bases que tenham estoque suficiente naquele intervalo de dias, quando houver. Também, os recebimentos comprometidos podem ocorrer com atraso em relação aos dias de violação dos limites mínimos, fazendo com que prováveis ineficiências anteriores a tal dia de recebimento precisem ser resolvidas pelo planejador.

Tabela 10 – Indicadores dos Resultados do Cenário 4

	1º Período	2º Período	3º Período	Total
Quantidade de fluxos	96	106	100	302
Quantidade de leilões	156	318	406	724
Volume transferido internamente (mil t)	368,6	555,6	527,7	1452,0
Volume importado (mil t)	192,5	464,2	330,4	987,1
Volume exportado (mil t)	0	0	0	0
Transp. comprometidos importações (mil t)	21,156	12,417	0	33,573
Transp. comprometidos internos (mil t)	95,048	5,003	0	100,051
Estoque em trânsito (mil t)	15,044	0	0	15,044
Atendimento da meta Brasil	100%	100%	100%	100%
Operações de Degradação	2	5	5	12
Quant. Degradada (mil t)	1,1	4,6	8,2	13,9
Demanda não atendida	---	---	---	0%
Violação da cap. de armazenamento	---	---	---	0%
Custo das transferências (mil R\$)	62,81	126,32	102,43	291,55
Tempo de execução				14s 631ms

As curvas de estoque iniciais (envolvendo os transportes comprometidos e estoques em trânsito) de todas as regiões do cenário são apresentadas na Figura 62 e as curvas de estoque finais são apresentadas na Figura 63. Mesmo que as curvas de estoque estejam organizadas por produto, não havendo a informação sobre as capacidades operacionais e físicas, pode-se notar pela análise da Figura 63 que todas as curvas de estoque tiveram suas demandas atendidas, ou seja, o estoque se manteve diariamente acima do zero. Também, conforme o indicativo de violação da capacidade de armazenamento pode-se afirmar que tal restrição também foi satisfeita em todas as regiões do cenário.

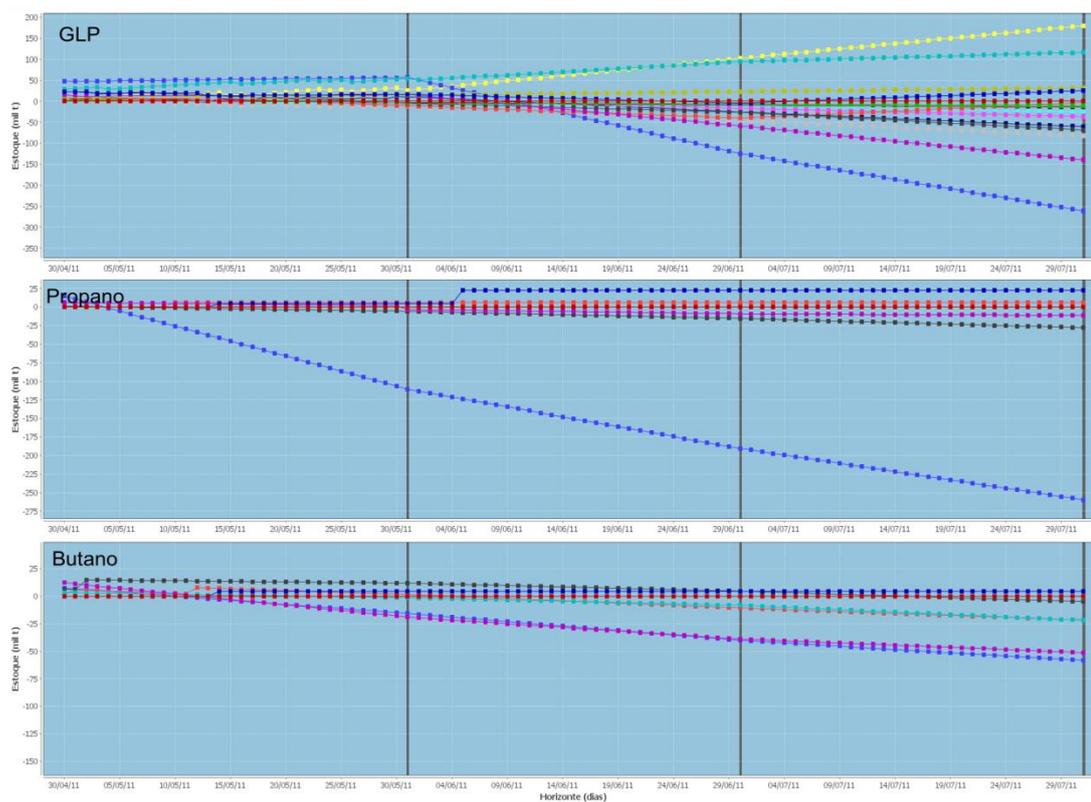


Figura 62 – Curvas de Estoque Iniciais de todas as Bases e Produtos referentes ao Cenário 4

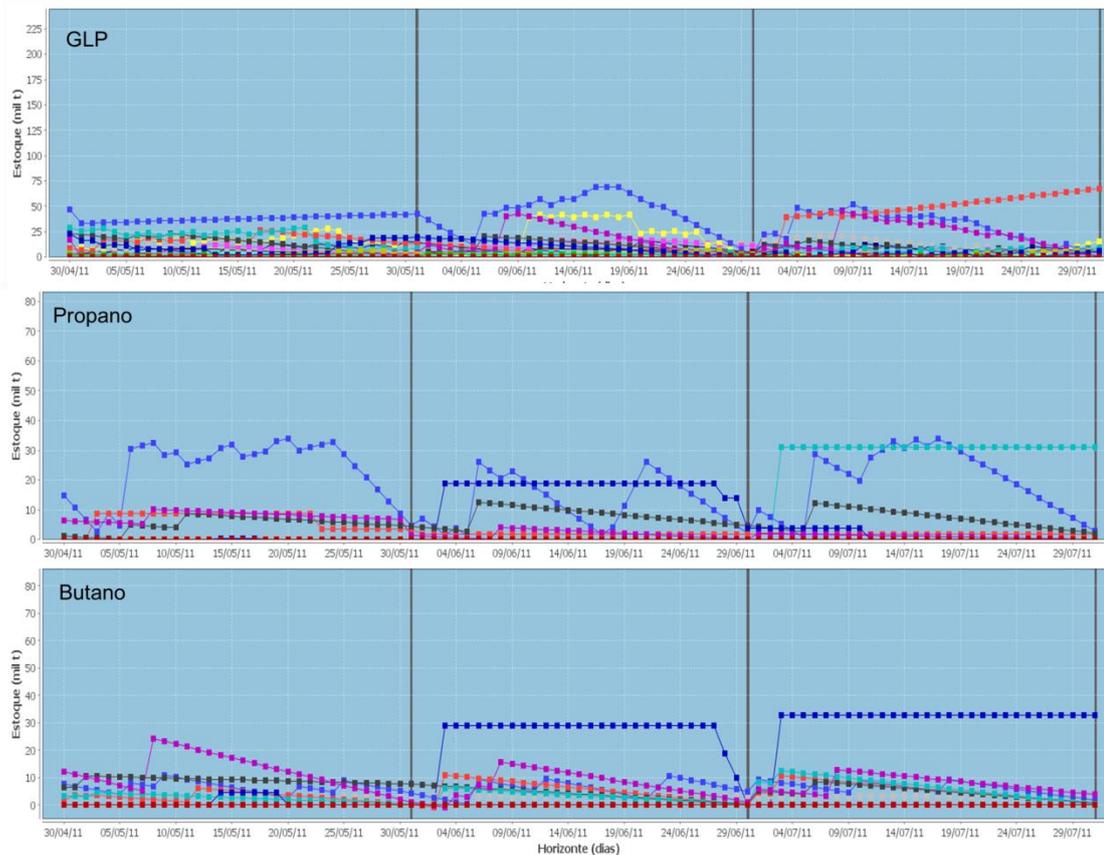


Figura 63 – Curvas de Estoque Finais de todas as Bases e Produtos referentes ao Cenário 4

Este experimento foi executado com a configuração padrão do planejador multiagente, ou seja, cada participante pode solicitar somente a quantidade de um dia de consumo em cada leilão. No entanto, para demonstrar a importância desta configuração em cenários mais estritos, tal como no cenário corrente, a configuração de quantidade máxima de consumo foi alterada para cinco dias.

Como resultado, nem todas as bases do cenário tiveram suas demandas completamente atendidas. Mais precisamente, sete bases apresentaram déficit de estoque em alguns intervalos de dias. Assim, o indicativo de não atendimento da demanda chegou à média de 0,553% com desvio padrão de 0,71. Esta situação ocorreu por causa da baixa disponibilidade de estoque de alguns destes produtos nas bases produtoras em um certo intervalo de dias e conseqüentemente por conta do escoamento de uma parcela maior deste estoque a apenas uma ou a um subconjunto das bases demandantes, faltando volume suficiente para atender a demanda dos demais consumidores antes de suas violações de estoque em relação aos limites mínimos. Por outro lado, esta configuração precisou de um número menor de leilões (i.e. 437 leilões) e conseqüentemente, de um tempo menor de processamento (i.e. 10s 157ms). Mesmo assim, a configuração que propicia soluções de melhor qualidade deve ter seu uso incentivado.

5.2.2 Cenário 5: Rede de GLP Inter-região com Variações da Meta Brasil

O cenário corrente também se refere ao nível inter-região da rede de GLP, mas seus dados são do mês de outubro de 2012, apresentando algumas variações em termos de limites operacionais e físicos. Mesmo assim, o cenário corrente possui a mesma topologia apresentada na Tabela 8.

O experimento sobre o cenário corrente busca analisar o comportamento do modelo multiagente em situações mais críticas de estoque. Estas situações podem ser obtidas por meio da redução ou elevação da meta Brasil. Desta forma, em um primeiro experimento, a meta Brasil foi configurada para corresponder exatamente à soma de todos os limites mínimos operacionais do grupo de GLP. Em um segundo experimento, a meta foi modificada para corresponder à soma dos limites máximos operacionais de todas as bases do cenário referente ao grupo de GLP. Com isso, consegue-se elevar as possibilidades de violação tanto dos limites mínimos quanto dos limites máximos. Ademais, as movimentações realizadas no cenário com a meta correspondente à soma dos limites mínimos operacionais serão utilizadas como entrada para dois cenários intrarregião a serem apresentados nas seções 5.2.3 e 5.2.4.

No primeiro experimento, o Brasil novamente atingiu sua meta no final dos períodos. Para isso, precisou importar grandes quantidades dos três produtos. Estas informações são apresentadas na Tabela 11, juntamente com o estoque agregado de cada produto no Brasil.

Tabela 11 – Informações sobre o Estoque e Meta do Brasil no Cenário 5 com Meta Mínima

	1º Período (31)	2º Período (30)	3º Período (31)
Meta Brasil (mil t)	313,732	312,732	313,732
Estoque Brasil de GLP (mil t)	-30,914	-105,802	-117,096
Estoque Brasil de propano (mil t)	-14,899	-30,753	-27,506
Estoque Brasil de butano (mil t)	-24,956	-32,422	-43,799
Estoque total do grupo (mil t)	-70,769	144,755	-124,329
Estoque total do Exterior (mil t)	384,501	167,975	189,401

Com a importação da quantidade necessária para atingimento da meta em cada período, as regiões importadoras atuaram como distribuidoras dos produtos para as regiões mais internas. A Figura 64 apresenta as curvas de estoque iniciais de cada região e a Figura 65 apresenta as curvas de estoque finais. Como se pode observar na Figura 65, todas as regiões tiveram suas demandas atendidas para os três produtos. Ainda, todas as curvas de estoque se mantiveram acima da faixa física mínima de estoque durante o horizonte de planejamento.

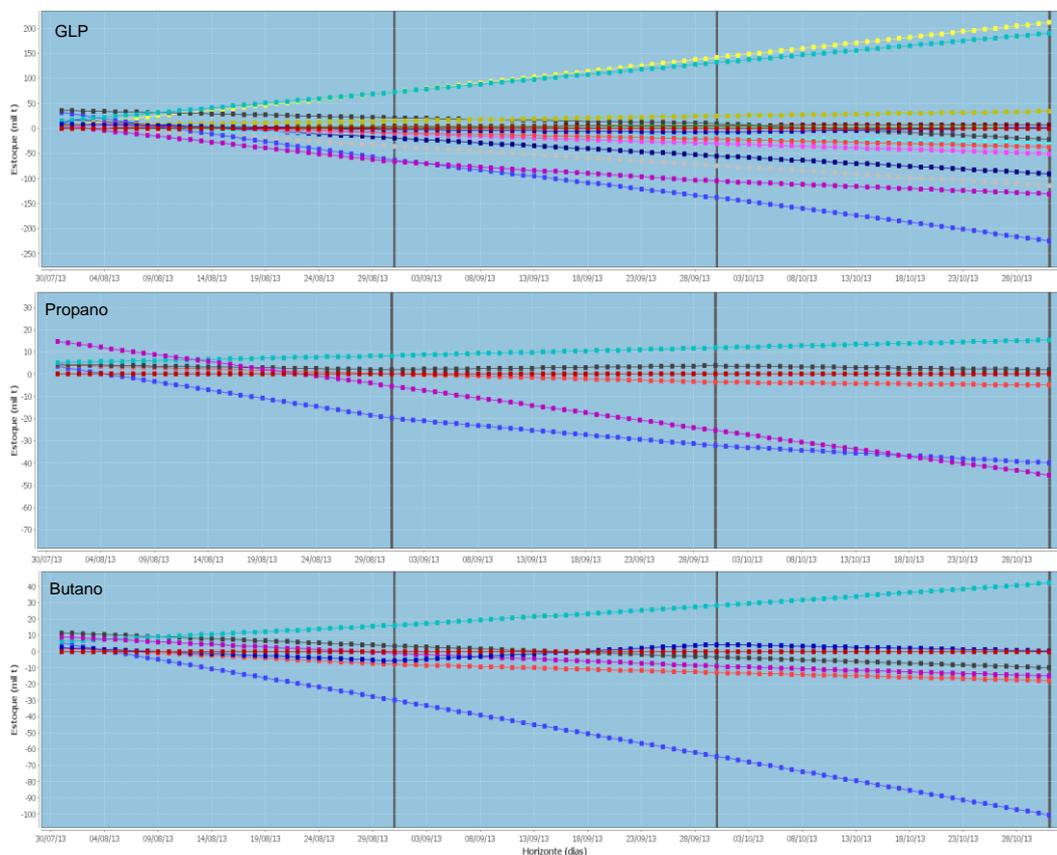


Figura 64 – Curvas de Estoque Iniciais das Bases e Produtos referentes ao Cenário 5 com Meta Mínima

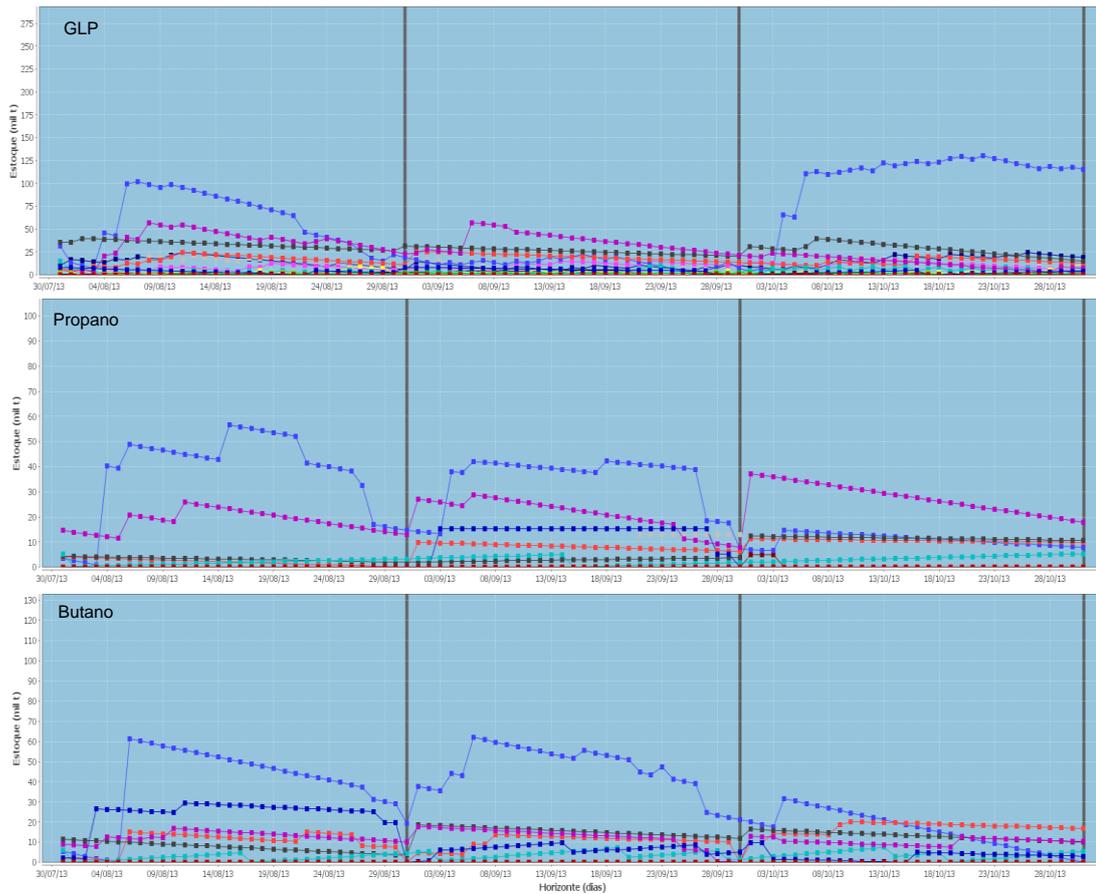


Figura 65 – Curvas de Estoque Finais das Bases e Produtos referentes ao Cenário 5 com Meta Mínima

Por sua vez, os indicadores da solução para este experimento são apresentados na Tabela 12.

Tabela 12 – Indicadores dos Resultados do Cenário 5 com Meta Mínima

	1º Período	2º Período	3º Período	Total
Quantidade de fluxos	72	69	75	216
Quantidade de leilões	272	237	277	786
Volume transferido internamente (mil t)	679,4	454,6	564,4	1698,4
Volume importado (mil t)	384,5	168,0	189,4	741,9
Volume exportado (mil t)	0	0	0	0
Estoque em trânsito (mil t)	18	0	0	18
Atendimento da meta Brasil	100%	100%	100%	100%
Operações de Degradação	1	2	6	9
Quant. Degradada (mil t)	0,1	7	34,5	41,7
Demanda não atendida	---	---	---	0%
Violação da cap. de armazenamento	---	---	---	0%
Custo das transferências (mil R\$)	723,14	384,54	423,90	1531,58
Tempo de execução				24s 176ms

No segundo experimento, as informações de estoque e capacidades das regiões são as mesmas do primeiro experimento, apenas a meta Brasil foi alterada. Os resultados estão

apresentados na Tabela 13. Pela análise da tabela, pode-se notar o aumento significativo das importações no primeiro período e pouca variação nos outros dois períodos em comparação com o primeiro experimento. Certamente, este fato se explica pela baixa variação da meta de um período para o outro. A partir do segundo período, o Brasil somente importa a quantidade suficiente para continuar mantendo o seu estoque na meta.

Tabela 13 – Informações sobre o Estoque e Meta do Brasil no Cenário 5 com Meta Máxima

	1° Período (31)	2° Período (30)	3° Período (31)
Meta Brasil (mil t)	1862,682	1861,712	1862,682
Estoque Brasil de GLP (mil t)	-30,914	-105,802	-117,096
Estoque Brasil de propano (mil t)	-14,899	-30,753	-27,506
Estoque Brasil de butano (mil t)	-24,956	-32,422	-43,799
Estoque total do grupo (mil t)	-70,769	-1693,705	-1673,311
Estoque total do Exterior (mil t)	1933,451	168,006	188,371

Como o segundo experimento tem a intenção de avaliar a satisfação da capacidade máxima operacional das regiões, a apresentação conjunta de todas as curvas de estoque se apresenta inadequada para este experimento. Por conta disto, as curvas de estoque finais são apresentadas de forma agregada por produto, ou seja, por meio uma única curva de estoque correspondente à soma de todas as curvas de estoque de um dado produto. Da mesma forma, as capacidades operacionais e físicas também são apresentadas de forma agregada, correspondendo à soma das capacidades de quase todas as regiões para o grupo GLP. A única exceção é a não contabilização da capacidade da região PB, uma vez que esta é uma região isolada em termos de rotas cadastradas (i.e. não apresenta rotas de envio ou recebimento). Esta representação é apresentada na Figura 66.

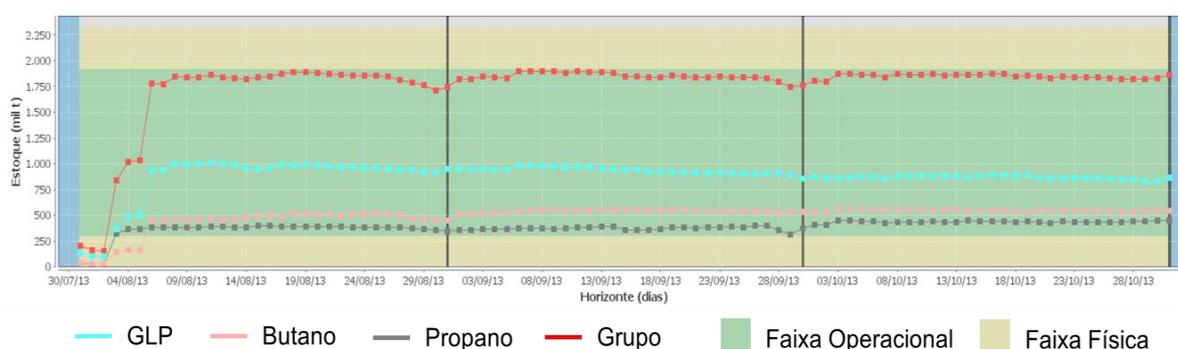


Figura 66 – Estoque Agregado do Cenário 5 com Meta Máxima

Por meio da análise da Figura 66, pode-se notar que as curvas de estoque respeitaram a capacidade máxima operacional agregada. O mesmo ocorreu em relação às capacidades particulares de cada região, tal como apresentado no indicativo de violação da capacidade de

armazenamento na Tabela 14. Ademais, vale salientar o aumento significativo do número de leilões realizados e consequentemente do tempo de execução do sistema. Tais dados mostram a relação direta entre o tempo de execução do sistema e a quantidade total de produtos a serem movimentados.

Tabela 14 – Indicadores dos Resultados do Cenário 5 com Meta Máxima

	1º Período	2º Período	3º Período	Total
Quantidade de fluxos	102	79	99	280
Quantidade de leilões	611	351	351	1313
Volume transferido internamente (mil t)	1553,5	585,2	590,8	2729,6
Volume importado (mil t)	1,933,5	168	189,4	2290,8
Volume exportado (mil t)	0	0	0	0
Estoque em trânsito (mil t)	18	0	0	18
Atendimento da meta Brasil	100%	100%	100%	100%
Operações de Degradação	1	0	2	3
Quant. Degradaada (mil t)	0,1	0	10	10,1
Demanda não atendida	---	---	---	0%
Violação da cap. de armazenamento	---	---	---	0%
Custo das transferências (mil R\$)	2955,44	382,72	451,64	3789,81
Tempo de execução				1m 6s 893ms

5.2.3 Cenário 6: Rede de GLP Intrarregião Referente à Região de Demanda

O cenário corrente corresponde ao nível intrarregião da região do Paraná. Esta região caracteriza-se por não apresentar produção suficiente de produtos do grupo de GLP, precisando receber tais produtos de outras regiões a fim de atender sua demanda. A topologia desta região é apresentada na Figura 67, sendo esta composta por 8 bases, 8 rotas internas e 7 rotas inter-regiões. Os 6 vértices ilustrados em cores escuras representam as regiões que podem atender direta ou indiretamente as demandas das bases do Paraná.

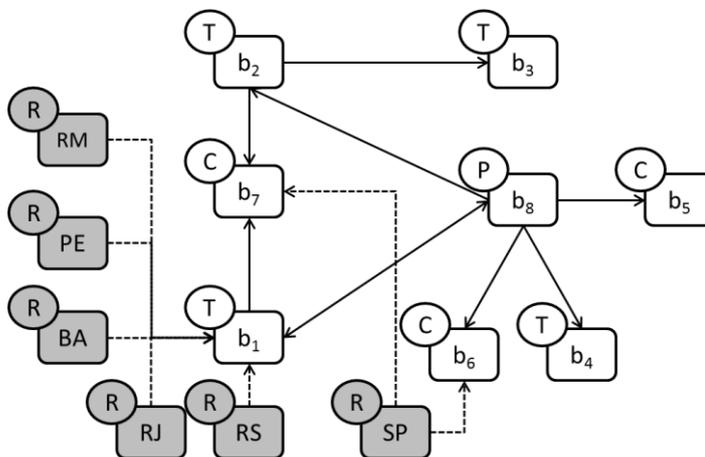


Figura 67 – Topologia do Cenário 6

O cenário corrente é parte do cenário 5 utilizado no primeiro experimento apresentado na subseção 5.2.2, ou seja, o cenário com meta Brasil correspondente à soma dos mínimos operacionais das regiões. De acordo com a execução do supracitado cenário inter-região, o planejamento resultante consiste em transferências de produtos das regiões BA, SP e RS para atendimento da demanda do Paraná. Certamente, no cenário corrente, tais transferências precisam ser distribuídas entre as bases paranaenses, uma vez que apenas as bases b_1 , b_6 e b_7 possuem conexões externas. Ademais, vale salientar que a produção da base b_8 também contribui para o atendimento das demandas das demais bases da região.

Neste sentido, as curvas iniciais de estoque de cada produto e base da região do Paraná são apresentadas na Figura 68. Com a execução do cenário corrente, as curvas finais de estoque podem ser observadas na Figura 69. Conforme a Figura 69, observa-se que as demandas de todas as bases foram atendidas por meio da distribuição dos produtos.

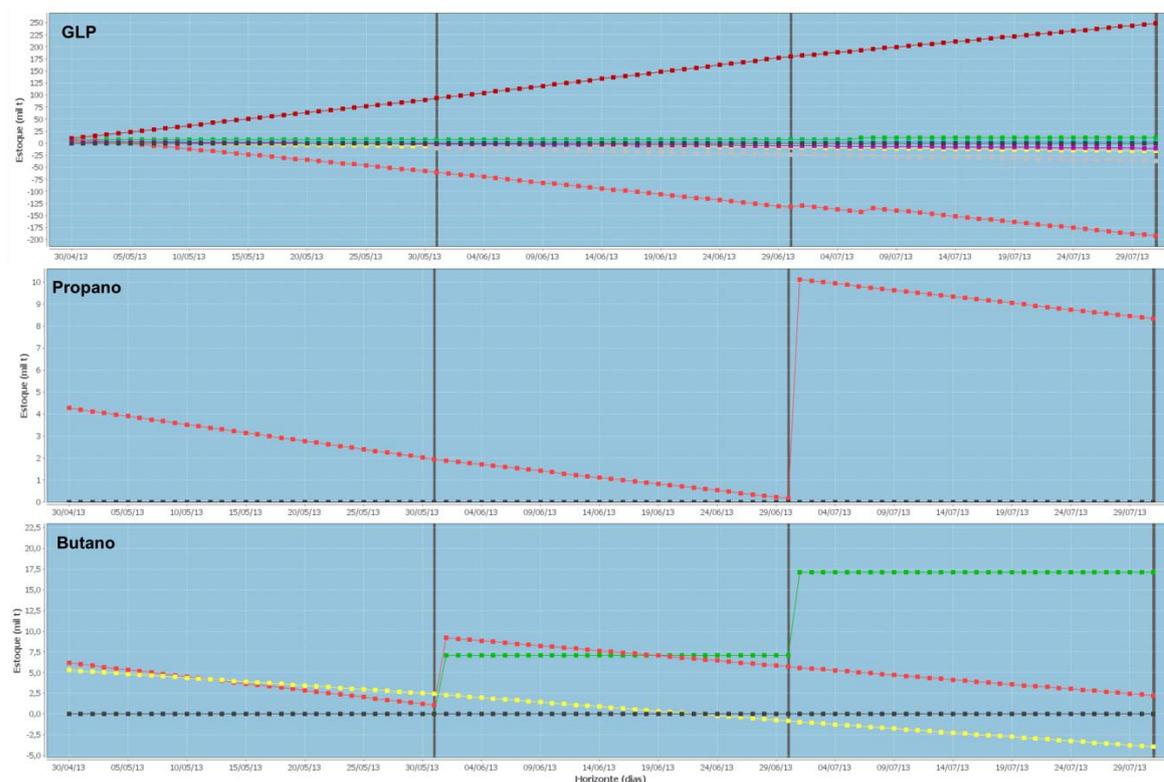


Figura 68 – Curvas de Estoque Iniciais de todas as Bases e Produtos referentes ao Cenário 6

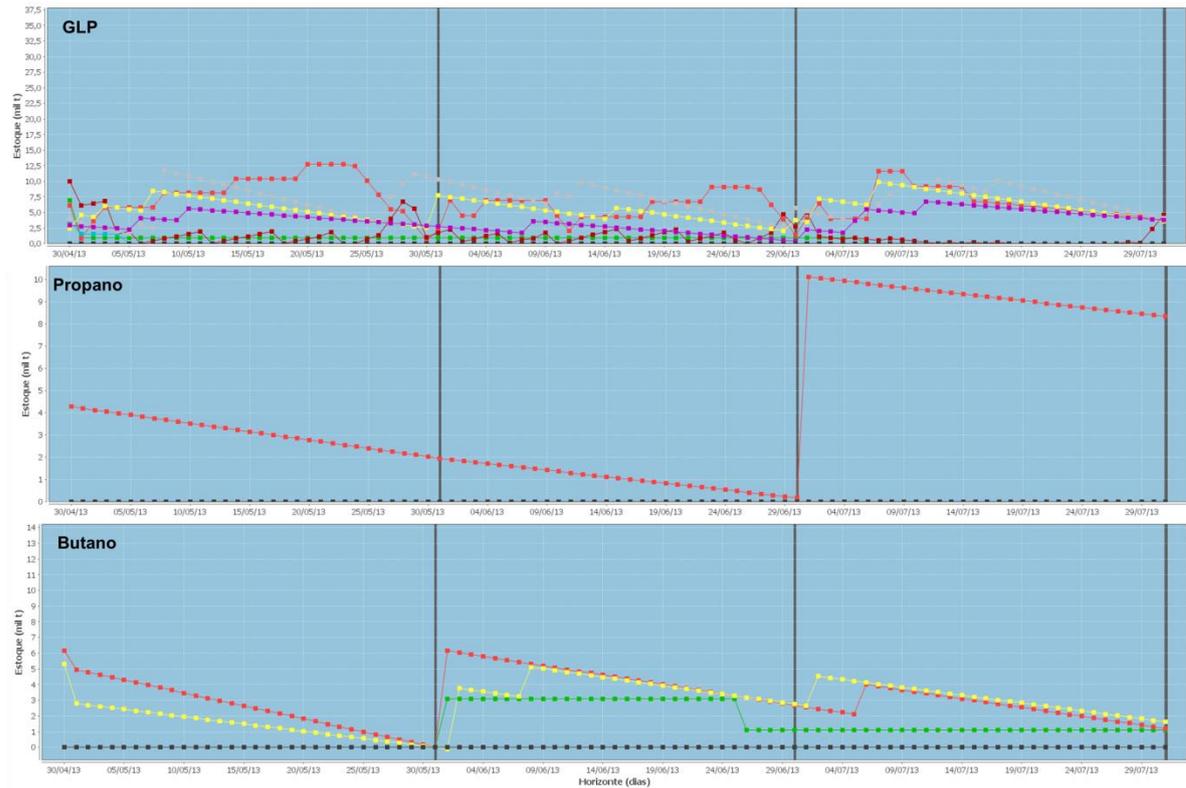


Figura 69 – Curvas de Estoque Finais de todas as Bases e Produtos referentes ao Cenário 6

No entanto, em alguns outros cenários, a disposição das bases e estoques podem formar situações em que a demanda não pode ser totalmente atendida pelos fluxos inter-regiões, sem haver certos atrasos na entrega. Esta é uma desvantagem da abordagem multinível. No nível inter-região, as regiões negociantes não apresentam conhecimento específico sobre as necessidades diárias de cada base. Assim, o objetivo único de uma região é atender a sua demanda agregada para posteriormente (no nível intrarregião) encontrar uma maneira de distribuir o produto recebido pelas bases reais. Porém, neste processo de distribuição, o tempo de transporte entre as bases internas pode provocar atrasos no atendimento das demandas.

Por fim, para uma visão mais ampla sobre o resultado do experimento, os indicadores da solução são apresentados na Tabela 15. Dentre os indicadores, vale salientar o uso das operações de degradação para evitar a falta do produto GLP em certos intervalos de dias. Em qualquer cenário do grupo de GLP, os produtos propano ou butano podem ser degradados para GLP.

Tabela 15 – Indicadores dos Resultados do Cenário 6

	1º Período	2º Período	3º Período	Total
Quantidade de fluxos	40	40	47	127
Quantidade de leilões	90	68	74	232
Volume transferido internamente (mil t)	109,5	104,1	103,6	317,2
Volume recebido de outras regiões (mil t)	10,5	15,4	40	65,9
Volume enviado a outras regiões (mil t)	0	0	0	0
Operações de degradação	2	0	3	5
Quant. Degradaada (mil t)	3,4	0	8	11,4
Demanda não atendida	---	---	---	0%
Violação da cap. de armazenamento	---	---	---	0%
Custo das transferências (mil R\$)	20,38	12,34	21,11	53,83
Tempo de execução				4s 961ms

5.2.4 Cenário 7: Rede de GLP Intrarregião Referente à Região de Produção

O cenário corrente corresponde ao nível intrarregião da Bahia, sendo esta região uma grande produtora dos produtos do grupo de GLP. A topologia desta região é apresentada na Figura 70, sendo composta por 8 bases, 10 rotas internas, 6 rotas inter-regiões de escoamento, 3 rotas inter-regiões de escoamento e recebimento e 1 uma rota de importação.

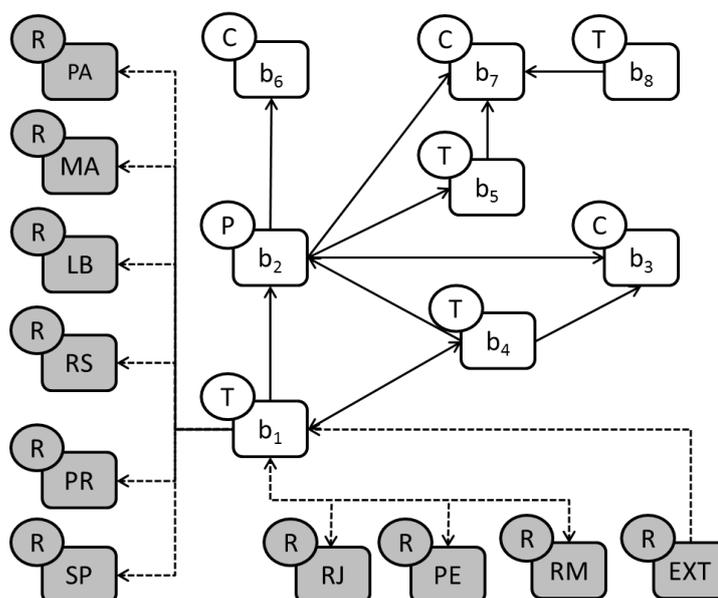


Figura 70 – Topologia do Cenário 7

Este cenário também é parte do cenário 5, tal como ocorre com o cenário 6. Esta região tem importância crucial na distribuição dos produtos no Brasil, uma vez que apresenta rota de importação e rotas de escoamento para muitas outras regiões. Conforme os resultados obtidos no cenário 5, o planejamento agregado da região Bahia finalizou com curvas de estoque positivas para os três produtos da classe. Estas curvas de estoque finais são apresentadas na Figura 71. Por meio da análise de tal figura, pode-se notar que o

planejamento inter-região da Bahia resultou em um nível de estoque diário muito baixo, o que dificulta a viabilização de tal planejamento em nível intrarregião.

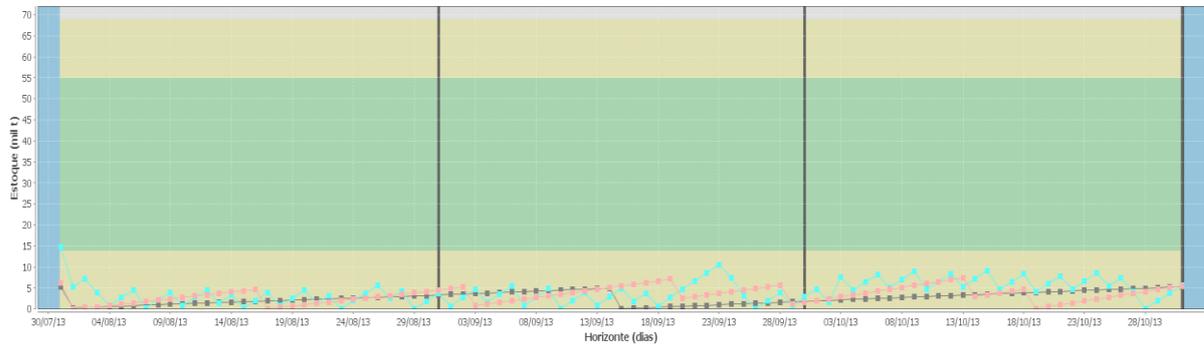


Figura 71 – Curvas de Estoque Agregada da Região Bahia

Na execução do cenário corrente, tais dificuldades foram confirmadas e inviabilizaram a obtenção de uma solução factível. As curvas de estoque iniciais e finais de cada produto e base da região da Bahia são apresentadas respectivamente na Figura 72 e Figura 73. Como se pode observar nos gráficos da Figura 73, ocorreram alguns intervalos de déficit de estoque. Estes intervalos se referem principalmente às curvas de estoque da base b_1 , ou seja, da base responsável por enviar os produtos para as outras regiões.

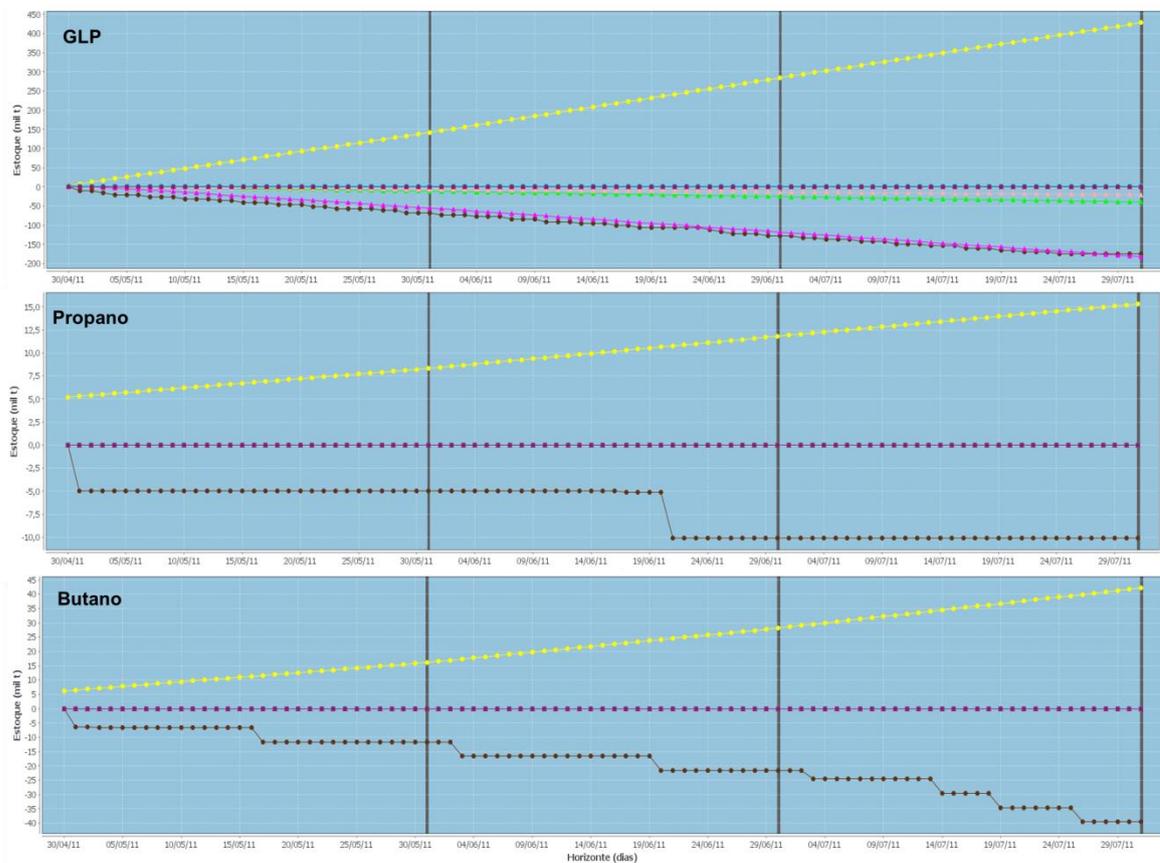


Figura 72 – Curvas de Estoque Iniciais de todas as Bases e Produtos referentes ao Cenário 7

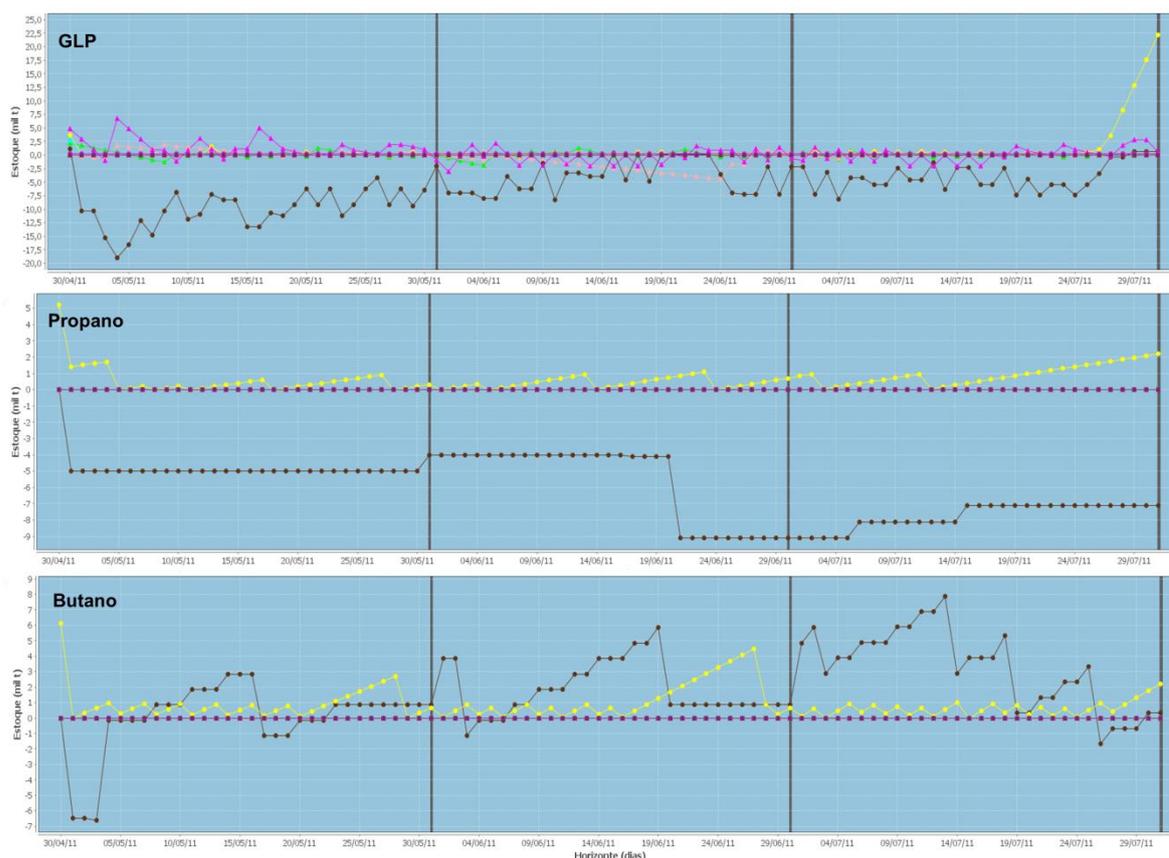


Figura 73 – Curvas de Estoque Finais de todas as Bases e Produtos referentes ao Cenário 7

No experimento realizado, a base b_1 não conseguiu receber a produção e estoques das bases internas para reunir o montante necessário para escoamento externo. Isto ocorreu por conta da restrição de lote mínimo das bases internas e principalmente por causa dos tempos de transportes de tais rotas, que adicionaram intervalos de atrasos nas entregas.

Mesmo assim, tais violações podem ser contornadas por meio de ajustes realizados pelos especialistas de planejamento. Entretanto, o ideal seria a redução da necessidade de tais intervenções. Para sanar este problema, uma alternativa satisfatória seria o tratamento de todo o Brasil como um único cenário e nível de planejamento. Assim, os especialistas poderiam se basear exclusivamente nesta solução completa de um único nível ou então usá-la para corrigir as possíveis imperfeições da abordagem multinível, se assim desejarem. Seguramente, as características não combinatórias e distribuídas do modelo multiagente podem futuramente viabilizar esta prática.

Por fim, os indicadores da solução são apresentados na Tabela 16. Vale salientar a supremacia das movimentações externas em relação às internas no primeiro período. Certamente, tais movimentações externas foram definidas no nível inter-região. Conforme o indicador de atendimento da demanda, o cenário corrente teve um déficit percentual de

aproximadamente 10% no atendimento da demanda em todo o horizonte de planejamento, sendo esta demanda decorrente de movimentações incompatíveis do nível superior de planejamento.

Tabela 16 – Indicadores dos Resultados do Cenário 7

	1º Período	2º Período	3º Período	Total
Quantidade de fluxos	95	76	96	267
Quantidade de leilões	149	138	143	430
Volume transferido internamente (mil t)	151,6	153,4	156,6	461,6
Volume recebido de outras regiões (mil t)	187,2	58	37	282,3
Volume enviado a outras regiões (mil t)	272,7	132,8	102,5	508,1
Operações de degradação	5	3	1	9
Quant. Degradada (mil t)	7,0	1,9	1,2	10,1
Demanda não atendida	---	---	---	10,29%
Violação da cap. de armazenamento	---	---	---	0%
Custo das transferências (mil R\$)	301,37	325,83	542,29	1169,49
Tempo de execução				5s 130ms

5.2.5 Cenário 8: Rede de Claros

O cenário corrente se refere ao nível inter-região da rede de claros. Esta rede se difere das anteriores por ser constituída por múltiplos grupos de produtos. Mais precisamente, esta rede é formada por 5 grupos de produtos, à saber: gasolina, nafta, querosene, óleo de turbina e diesel. Cada grupo é formado por diferentes quantidades de tipos de produtos. Por exemplo, o grupo de gasolina é formado por 5 tipos de produtos, o grupo de nafta por 3 e o grupo de diesel, o mais complexo, é formado por 10 tipos de produtos. Os grupos de querosene e óleo de turbina são formados, cada qual, por 2 tipos de produtos.

A topologia do corrente cenário é formada por 16 regiões e um total de 145 rotas. Todas as rotas possuem capacidades ilimitadas e podem suportar movimentações de um, alguns ou de todos os grupos de produtos. Esta topologia é apresentada na Tabela 17. Nesta tabela, as letras identificadoras se referem às iniciais dos nomes de tais grupos de produtos (e.g. a letra G representa o grupo Gasolina). Como exceção, a letra X simboliza a existência de rotas para todos os cinco grupos de produtos.

Tabela 17 – Rotas Registradas do Cenário 8

		RECEBIMENTO															
ESCOAMENTO		BA	RG	PR	RJ	SP	RS	RM	PA	MA	LB	RC	PB	PE	AL	ES	EX
	BA	---	G	NQOD	X	X	GNOD	X	X	GNOQ	X	GD	GQ	X	G	GOD	
	RG		---		NO	OQ										GNOD	
	PR	X		---	NOQD	X	NOQD	OD	GOD	X	GOD	G	G	X	GD	GOD	
	RJ	GOQD	GNQD	X	---	NOQD	GNOD	X	X	X	GOQD	G	GN	X	GNOD	GNOD	NOD
	SP	X	GOQD	X	X	---	GNOD	X	X	X	GOQD	GO	G	X	GNOD	GNOD	
	RS	GNOD		GD	GOD	D	---	GND	GOD	GOD	GD	G	G	GNOD	D	GD	D
	RM	N			NQ	N	N	---	Q		Q						
	PA				Q	D			Q	---	Q						
	MA	X		X	X	X	GNOD	GOQD	GNOQ	---	GQD	G	G	X	GD		
	LB	OQD		Q	Q	O		GNOD	X	X	---		G	X	GNOD		
	RC	GNOD							GNOD	GNOD	D	---		GNOD	GOD		
	PB													---			
	PE	GQD		GOD	GQD	GQD	D	X	X	GQD	GQD	GD	G	---	GD	GD	ND
	AL														---		
	ES	O	GD	Q	GNOD	GNOD	O	O	GNOD	O	O				GNOD	---	ND
	EX	GN				GND	N			Q	D			GOQD			---

Como resultado da execução do cenário, as curvas de estoque resultantes se mantiveram na maior parte do horizonte dentro das faixas físicas de estoque, com algumas exceções que serão explanadas mais adiante. Em uma visão mais ampla, a Figura 74 apresenta o estoque agregado de cada produto em relação à capacidade agregada do respectivo grupo de produto. Basicamente, cada curva de estoque representa um produto e é formada pela soma das curvas de estoque do mesmo tipo de produto em todas as regiões do cenário. Pela análise dos gráficos, pode-se observar uma baixa disponibilidade de estoque de cada produto em todo o cenário. Notavelmente, os estoques agregados se encontram próximos ou abaixo dos limites mínimos operacionais agregados. Certamente, estas condições aumentam o grau de dificuldade de resolução do cenário.

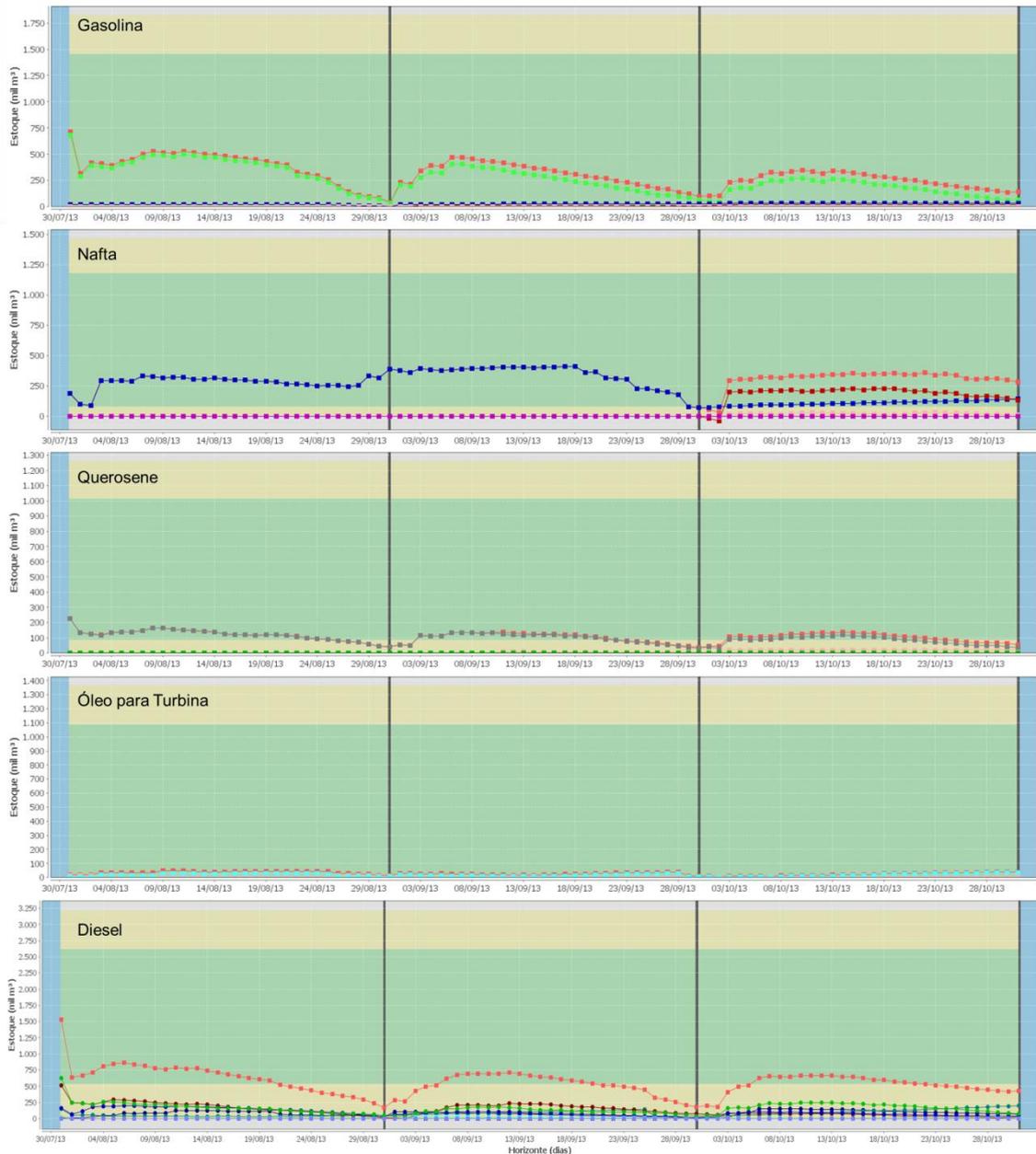


Figura 74 – Curvas de Estoque Agregadas Finais dos Produtos da Rede de Claros

Para uma observação mais detalhada dos resultados, as figuras seguintes apresentam as curvas de estoque finais de cada produto dos grupos de gasolina (Figura 75), nafta (Figura 76), querosene (Figura 77) e óleo de turbina (Figura 78). Os resultados do grupo de diesel serão discutidos mais adiante, não estando representados nesta figura.

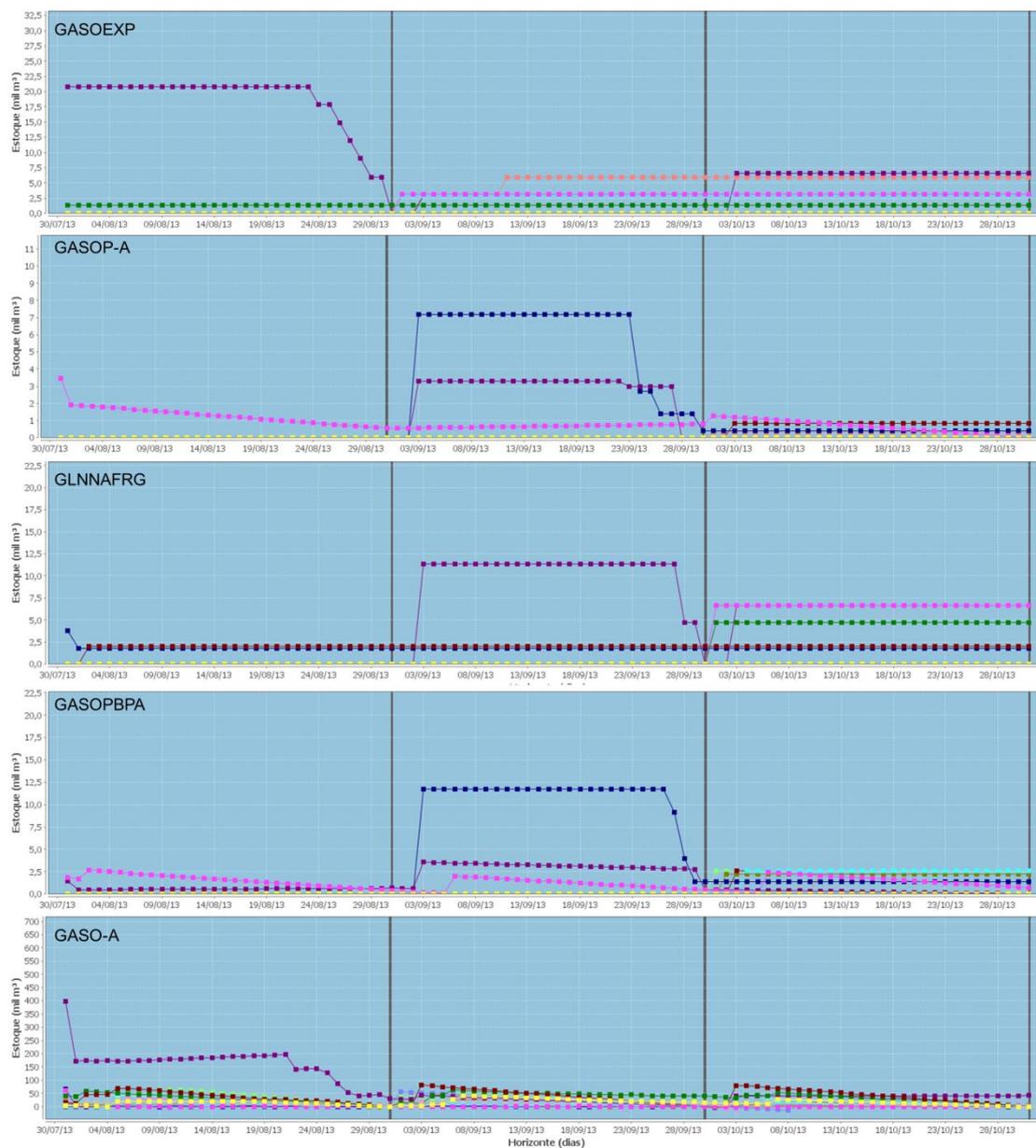


Figura 75 – Curvas de Estoque de todas as Bases e Produtos do Grupo de Gasolina do Cenário 8

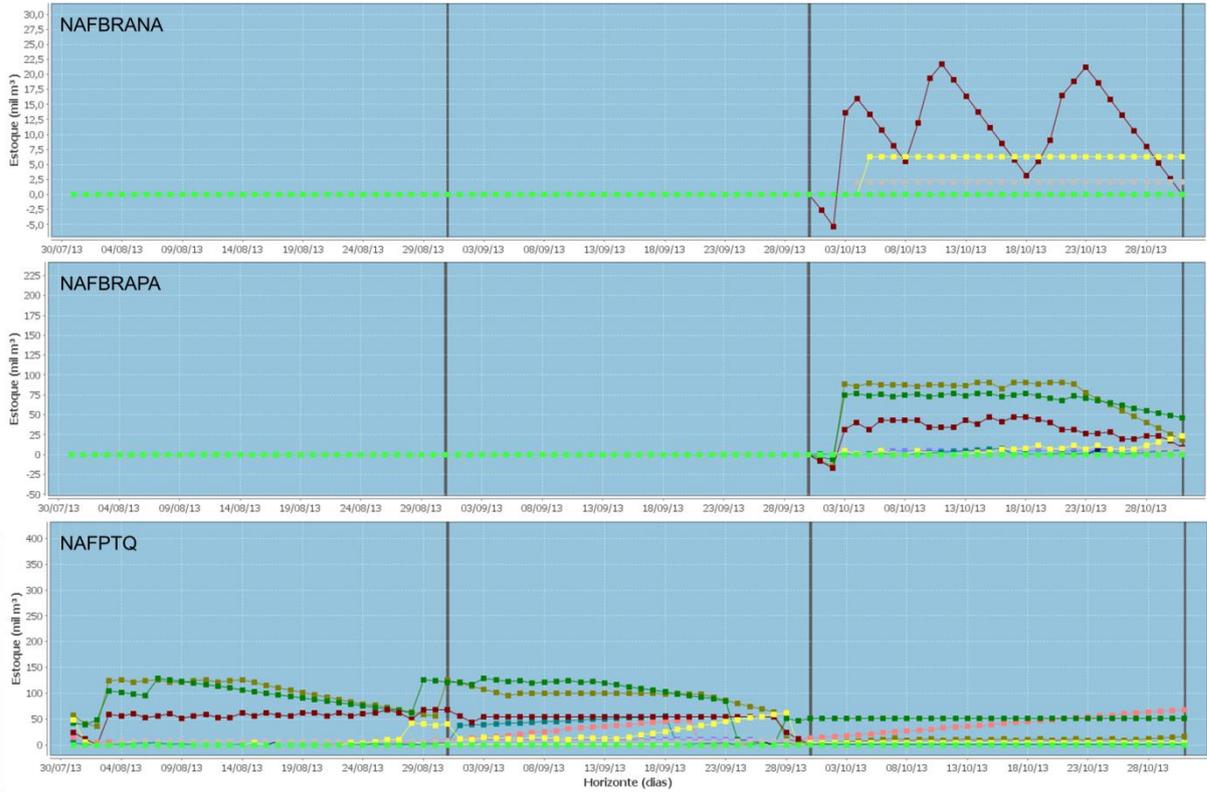


Figura 76 – Curvas de Estoque de todas as Bases e Produtos do Grupo de Nafta do Cenário 8

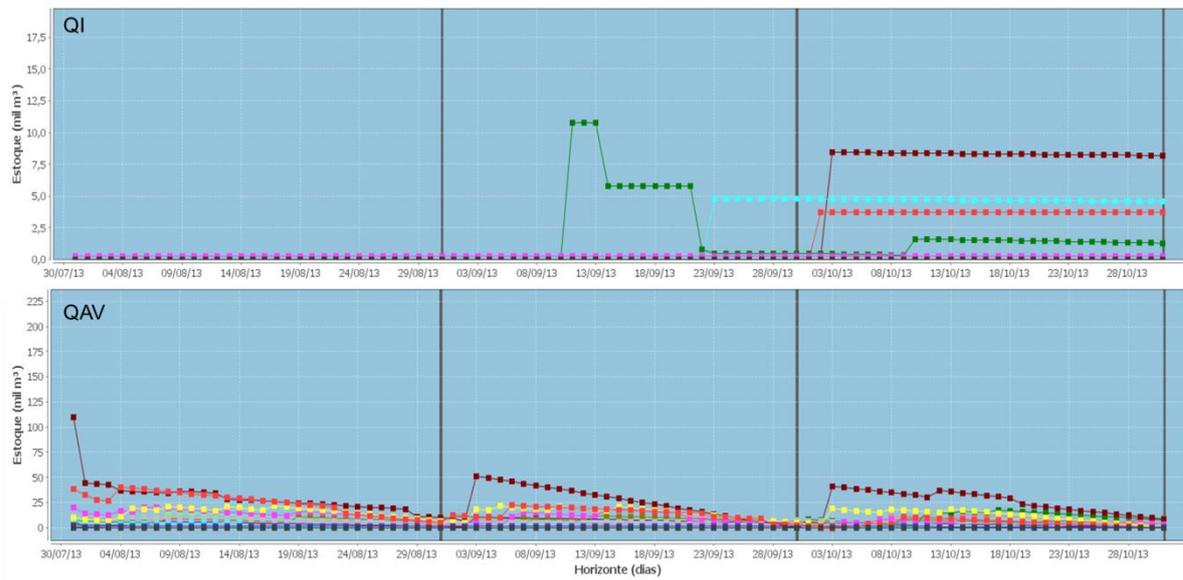


Figura 77 – Curvas de Estoque de todas as Bases e Produtos do Grupo de Querosene do Cenário 8

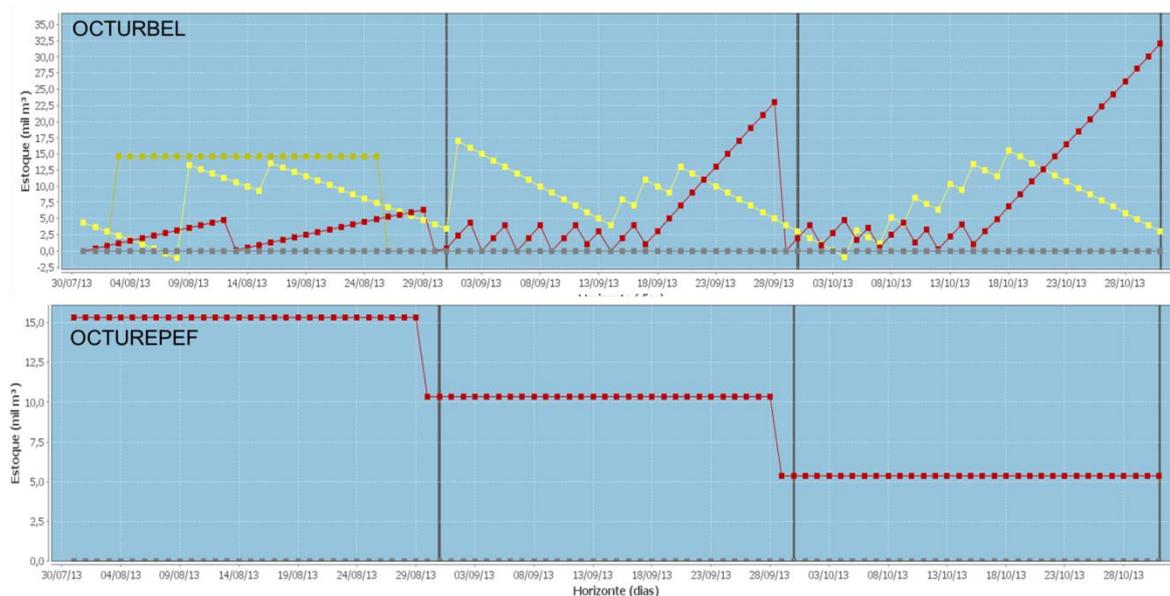


Figura 78 – Curvas de Estoque de todas as Bases e Produtos do Grupo de Óleo de Turbina do Cenário 8

Como se pode observar, as curvas de estoque dos produtos se mantiveram na maior parte do tempo dentro das faixas físicas, ou seja, quase todas as demandas diárias das regiões foram satisfeitas. Como exceção, particularmente em relação ao grupo de gasolina, algumas poucas regiões (i.e. RM, LB e MA) ficaram com déficit de estoque do produto GASO-A no início do terceiro período. Isto ocorreu por causa da dificuldade do modelo multiagente em lidar com a estruturação do modelo do problema em termos de períodos. Esta situação ocorreu porque no final do segundo período, as regiões com maior demanda no período seguinte, ou seja, no terceiro período, finalizaram com um estoque maior do produto GASO-A. Por conta disto, nas negociações durante o terceiro período, tais regiões não puderam escoar estes estoques para atender os déficits das regiões com menores demandas justamente por estarem precisando do produto para suprir as suas próprias demandas, mesmo que em dias mais posteriores. Entretanto, esta decisão obedece plenamente ao processo de criação dos anúncios e demais heurísticas formuladas. Em relação aos demais grupos apresentados nas figuras, tais situações não foram observadas, levando ao atendimento total das demandas.

Em relação ao grupo de diesel, por apresentar um número maior de produtos, o processo de encontrar uma solução foi mais dispendioso em termos de negociações e processamento computacional. Mesmo assim, as curvas de estoque finais contribuíram para o atendimento quase total das demandas. Neste cenário, aconteceu o mesmo problema do cenário de gasolina, onde a estruturação do problema por meio de períodos e mesmo a existência de tempos de transporte maiores acarretaram em pequenos atrasos na entrega nos

inícios dos períodos. Estas situações podem ser constatadas visualmente por meio da análise das curvas de estoque finais do grupo de diesel apresentadas na Figura 79.

Todavia, tais atrasos podem ser facilmente corrigidos pelos especialistas responsáveis por colocar em prática a solução. Certamente, a definição de transportes comprometidos é uma possibilidade para sanar tais inconsistências. No entanto, esforços futuros poderão ser empregados para tratar automaticamente deste problema. Uma alternativa seria reduzir o intervalo de dias utilizados para a formação dos vetores do anúncio ou então, usar metas particulares mais precisas para cada produto em cada período. Com isso, um produto poderia finalizar um período com um estoque razoável a fim de atender as suas demandas no início do período seguinte, quando houver.

Por fim, a Tabela 18 apresenta os indicadores da solução para todos os grupos de produtos. Pela análise da tabela, pode-se observar certas variações no atendimento da meta Brasil. No cenário em análise, tais situações ocorreram por causa da inexistência de rotas de importação ou exportação com suporte a certos grupos de produtos. Por exemplo, a meta de gasolina no primeiro período foi significativamente extrapolada por conta da inexistência de rotas de exportação. Nos demais períodos, as metas foram exatamente satisfeitas por conta do consumo e importações de produtos. A mesma situação ocorreu com o grupo de querosene.

Uma situação diferente ocorreu no atendimento da meta Brasil do grupo de óleo de turbina. Este grupo ficou abaixo da meta no primeiro período, acima da meta no segundo período e exatamente na meta no terceiro período. Esta situação aconteceu por causa da restrição de lote mínimo das rotas de importação e exportação, cujo valor é de 5.000m³. Mais precisamente, a região Exterior ficou com excedente de estoque de 4,306m³ no primeiro período, não havendo possibilidade de escoar para o Brasil. Por sua vez, o Brasil ficou com excedente de estoque de 4,909m³ no segundo período, também não havendo condições de movimentar para o Exterior. No terceiro período, a meta foi satisfatoriamente atingida.

Na análise das soluções, estas pequenas variações no atendimento da meta são consideradas aceitáveis. A faixa de tolerância da meta define o intervalo de variação. Em cenários compostos por muitos produtos e possivelmente maiores variações, uma alternativa imediata para sanar o suposto problema de estoque ligeiramente inferior à meta está no aumento suplementar da própria meta, podendo passar a considerá-la como um ponto intermediário ou máximo da faixa de tolerância. Com isso, o estoque remanescente no Exterior tem seu impacto reduzido no atingimento da meta do Brasil.

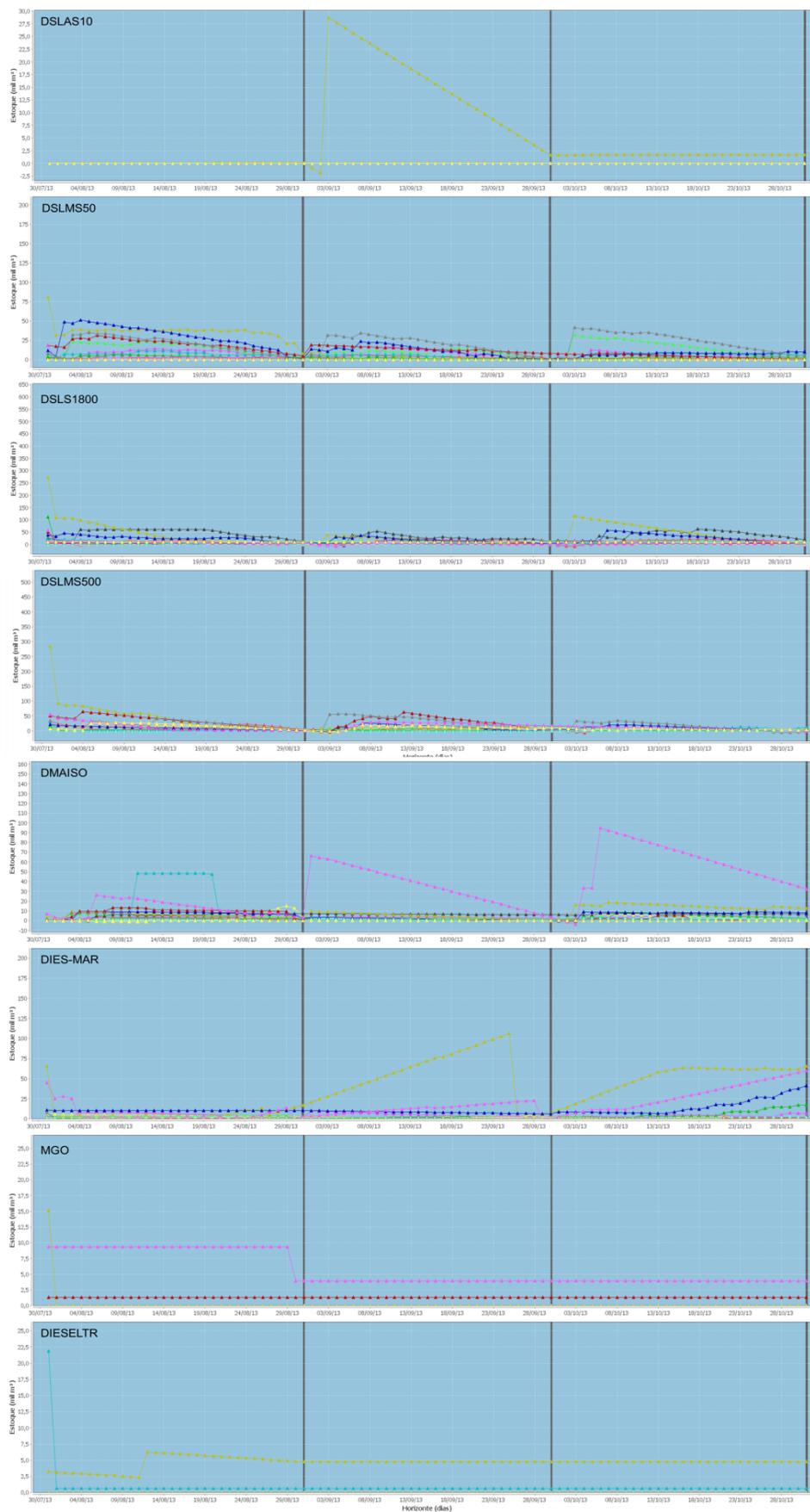


Figura 79 – Curvas de Estoque de todas as Bases e Produtos do Grupo de Diesel do Cenário 8

No grupo de diesel, uma situação ainda diferente contribuiu para o atingimento da meta Brasil e conseqüentemente, para o atendimento das demandas dos produtos. Neste grupo, ocorreram importações e exportações concomitantes de diferentes produtos. Alguns produtos precisaram ser exportados para que outros pudessem ser importados a fim de atender as demandas e ainda satisfazer a meta. A quantidade importada de cada produto leva em consideração a possível formação de estoques remanescentes dos produtos demandados nas bases produtoras ou terminais durante a distribuição, podendo ocorrer de tais estoques estarem impedidos de serem escoados por causa da restrição de lote mínimo das respectivas rotas. Por conta disto, a quantidade importada de cada produto é influenciada pela quantidade de bases com déficit dos produtos.

Mesmo com a ocorrência concomitante das operações de importação e exportação, a existência de estoques remanescentes de produtos no Brasil e Exterior impediram que a meta fosse exatamente atingida, ocorrendo uma desprezível diferença. Entretanto, esta pequena variação é plenamente satisfeita pela faixa de tolerância. Para o grupo de diesel, a faixa de tolerância consiste em 3% para cima e para baixo da meta Brasil.

Tabela 18 – Indicadores dos Resultados do Cenário 8

		1º Período	2º Período	3º Período	Total
GASOLINA	Quantidade de fluxos	75	125	151	351
	Quantidade de leilões	334	391	531	1256
	Volume transferido internamente (mil m ³)	495,6	564,6	532,9	1593,1
	Volume importado (mil m ³)	0	349,2	411,9	761,1
	Volume exportado (mil m ³)	0	0	0	0
	Meta Brasil (mil m ³)	140,0	144,0	140,0	---
	Atendimento da meta Brasil	179,5%	100%	100%	126,5%
	Operações de degradação	1	1	7	9
	Quant. Degradada (mil m ³)	1,5	1,7	15,5	18,7
	Demanda não atendida	---	---	---	0,465%
	Violação da cap. de armazenamento	---	---	---	0%
	Custo das transferências (mil R\$)	11,201	11,795	12,653	35,650
NAFTA	Quantidade de fluxos	101	77	112	290
	Quantidade de leilões	248	158	241	647
	Volume transferido internamente (mil m ³)	412,8	389,4	280,9	1083,1
	Volume importado (mil m ³)	652,2	536,3	657,7	1846,2
	Volume exportado (mil m ³)	0	55	427,1	482,1
	Meta Brasil (mil m ³)	420,5	458,0	283,4	---
	Atendimento da meta Brasil	100%	100%	100%	100%
	Operações de degradação	0	0	0	0
	Quant. Degradada (mil m ³)	0	0	0	0
	Demanda não atendida	---	---	---	0%
	Violação da cap. de armazenamento	---	---	---	0%

	Custo das transferências (mil R\$)	6,733	7,346	3,746	17,826
QUEROSENE	Quantidade de fluxos	21	58	51	130
	Quantidade de leilões	77	135	280	492
	Volume transferido internamente (mil m ³)	156,6	137,9	181,4	476
	Volume importado (mil m ³)	0	162,9	178,2	341
	Volume exportado (mil m ³)	0	0	0	0
	Meta Brasil (mil m ³)	55,0	57,0	55,0	---
	Atendimento da meta Brasil	111,9%	100%	100%	103,9%
	Operações de degradação	0	0	0	0
	Quant. Degradada (mil m ³)	0	0	0	0
	Demanda não atendida	---	---	---	0%
	Violação da cap. de armazenamento	---	---	---	0%
	Custo das transferências (mil R\$)	3,600	2,694	4,219	10,514
ÓLEO DE TURBINA	Quantidade de fluxos	3	9	8	20
	Quantidade de leilões	11	16	12	39
	Volume transferido internamente (mil m ³)	20	29,6	30	79,6
	Volume importado (mil m ³)	29,6	0	0	29,6
	Volume exportado (mil m ³)	0	30,2	30	60,2
	Meta Brasil (mil m ³)	44,8	39,7	39,7	---
	Atendimento da meta Brasil	90,39%	112,36%	100%	100,9%
	Operações de degradação	0	0	0	0
	Quant. Degradada (mil m ³)	0	0	0	0
	Demanda não atendida	---	---	---	0%
	Violação da cap. de armazenamento	---	---	---	0%
	Custo das transferências (mil R\$)	0,450	0,336	0,275	1,061
DIESEL	Quantidade de fluxos	349	336	372	1057
	Quantidade de leilões	1087	1257	1120	3464
	Volume transferido internamente (mil m ³)	1655,7	1523,6	1359,9	4539,2
	Volume importado (mil m ³)	296	878,2	833,7	2007,9
	Volume exportado (mil m ³)	625,5	37,4	138,8	801,7
	Meta Brasil (mil m ³)	396,1	398,2	422,1	---
	Atendimento da meta Brasil	101,1%	98,5%	101,7%	100,4%
	Operações de degradação	0	0	0	0
	Quant. Degradada (mil m ³)	0	0	0	0
	Demanda não atendida	---	---	---	1,662%
	Violação da cap. de armazenamento	---	---	---	0%
	Custo das transferências (mil R\$)	21,233	19,205	19,772	60,211
Tempo de Execução	4m 11s 058ms				

Em relação à satisfação das demandas dos produtos do grupo de diesel, a sua percentagem média de não atendimento foi pequena, mas mesmo assim, ainda foi maior do que a observada nos demais grupos que não tiveram suas demandas completamente atendidas. Certamente, isto se explica devido à maior complexidade do grupo analisado. Conforme a Tabela 18, a percentagem média de demanda não atendida do grupo de diesel foi de 1,662%, sendo o desvio padrão de 2,91 mil m³. Esta discrepância se deveu ao intervalo dos primeiros 12 dias do primeiro período havendo um déficit máximo de 13,211 mil m³ do produto

DMAISO na região ES. Este déficit aconteceu por conta do estoque inicial zero e dificuldades de atendimento por meio de outras regiões.

Por fim, o cenário de claros também foi executado de forma distribuída. Neste experimento, foram utilizados três computadores conectados a uma rede interna. O computador utilizado como padrão para a execução de todos os testes anteriores foi utilizado para abrigar o container principal, ao qual foram alocados os subagentes do grupo de diesel e também o agente gerente. Os outros dois computadores apresentam configurações idênticas, sendo equipados com processadores Intel Core 2 Quad e 4 GB de memória RAM. Cada um destes dois computadores acomodaram dois diferentes grupos de produtos, sendo que cada qual executou apenas um container. Um deles ficou responsável pelas negociações dos subagentes dos grupos de gasolina e óleo de turbina e o outro pelas negociações dos grupos de nafta e querosene. Os agentes rotas e arcos foram distribuídos juntamente com as sub-bases de acordo com as regras de distribuição apresentada na seção 4.2.7. No entanto, como tais rotas apresentam capacidade ilimitada, as comunicações entre as sub-bases e rotas foram expressivamente reduzidas.

Durante a execução distribuída, o agente gerente exerceu um papel crucial para um melhor aproveitamento do poder de processamento paralelo. Ele atuou resolvendo os conflitos entre os leilões a fim de permitir fechamentos simultâneos dos leilões de diferentes grupos de produtos. Esta tarefa foi facilitada por causa da inexistência de conflitos entre as rotas em virtude do compartilhamento da capacidade dos arcos, uma vez que a capacidade é ilimitada. Desta forma, o tempo total de execução baixou de 4m 11s 058ms para exatos 2m 59s 249ms. Este tempo não considera a criação dos agentes nas máquinas remotas. Desta forma, este experimento permite vislumbrar os potenciais ganhos de processamento que podem ser obtidos com a execução distribuída do sistema, principalmente quando o sistema for executado em um ambiente de cluster com maior velocidade de comunicação entre as máquinas. Supostamente, tais características podem viabilizar uma futura execução de todo o cenário brasileiro em um único nível de planejamento.

5.3 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este capítulo apresentou alguns experimentos que permitiram observar as qualidades do modelo multiagentes em diferentes situações no PPTDP. Tais experimentos também permitiram evidenciar algumas necessidades de melhoramentos, os quais podem ser materializados por meio de ajustes ou novas heurísticas, e também por meio de

reestruturações no modelo do problema. De modo geral, este capítulo permitiu demonstrar a eficiência do modelo multiagentes na busca de soluções factíveis em cenários de diferentes tamanhos e complexidades. Certamente, esta eficiência de execução está condicionada à natureza não combinatória do modelo e à forma ordenada de resolução de conflitos.

Notavelmente, o tempo de execução do modelo multiagentes é fortemente influenciado pelo volume e topologia dos cenários. Esta dependência é retratada no cálculo representado na equação (81). Este cálculo é baseado na quantidade média de leilões realizados na execução de um cenário, a qual influencia diretamente no tempo de execução do sistema. Mais precisamente, o número aproximado de leilões executado por uma base b^{sent} , de um produto $prod$ em um período per consiste na divisão do estoque disponível na base no período per pelo valor médio dos volumes solicitados nos lances pelos participantes, acrescido ainda pelo produto dos possíveis leilões de repasse executados pela base.

$$n_{auctions} = \sum_{b^{sent}}^{B^{sent}} \sum_{prod}^{PROD} \sum_{per}^H \left(\frac{vol_{b^{sent},prod,per}^{sent}}{vf_{b^{rec},prod}^{max}} * n_{repass} \right) \quad (81)$$

Como se pode observar na equação, o número de leilões pode aumentar consideravelmente se houver uma grande disparidade entre o volume disponível em uma base leiloeira e o volume solicitado nos lances para tal base. Como apresentado nos experimentos, os melhores resultados foram encontrados ao assegurar que o volume solicitado em um leilão seja mínimo a fim de haver uma maior distribuição do produto pelo leiloeiro em situações mais críticas. Por conta disto, um esforço futuro seria a atribuição, ao papel de leiloeiro, da responsabilidade de conceber e definir os atributos dos fluxos. Com isso, há a percepção de uma potencial redução no número de leilões graças à possibilidade de atribuição de volumes maiores aos participantes em situações menos críticas. Mesmo sem este melhoramento, nos cenários avaliados, o tempo de processamento se mostrou satisfatório.

Em relação à factibilidade de estoque e de capacidade de armazenamento, o modelo também se apresentou satisfatório. Porém, em cenários que tiveram suas demandas parcialmente atendidas ou atendidas com certos intervalos de atrasos, faltou o conhecimento sobre as respectivas soluções ótimas a fim de realizar análises mais precisas.

Neste sentido, o modelo matemático em desenvolvimento pela equipe da UFF foi inicialmente avaliado como ferramenta para retornar as soluções ótimas desejadas. No entanto, há algumas diferenças entre o modelo multiagentes e matemático que dificultam comparações mais profundas em termos de resultados. Ambos os modelos fazem uso de

formulações, heurísticas e ponderações diferentes, o que os tornam incompatíveis em relação a certas particularidades da solução (e.g. violações da capacidade operacional e impacto dos custos). Mesmo assim, ambas as abordagens são compatíveis no que se refere ao respeito das capacidades físicas de planejamento.

Entretanto, mesmo havendo tal compatibilidade, as comparações não puderam ser realizadas de forma efetiva. O modelo matemático, em seu estado atual de desenvolvimento, possui uma particularidade que impede a formação de fluxos mais precisos, uma vez que somente permite movimentações de volumes múltiplos do lote mínimo. Em algumas situações, esta simplificação inviabiliza a concepção de certos fluxos potenciais e necessários para a formação de soluções factíveis. Por conta disto, as soluções retornadas pela instância atual do modelo matemático apresentaram certas imperfeições que impediram comparações mais justas. Desta forma, a avaliação da qualidade dos resultados do modelo multiagentes em relação à solução ótima retornada pelo modelo matemático precisará ser realizada futuramente, envolvendo as versões mais avançadas de ambos os modelos.

6 CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS

Este capítulo apresenta a conclusão final sobre o corrente trabalho de tese e abre perspectivas para trabalhos futuros. O capítulo é organizado em três seções. A seção 6.1 apresenta a conclusão sobre as atividades de pesquisa realizadas, a seção 6.2 descreve alguns direcionamentos futuros de pesquisa e por fim, a seção 6.3 apresenta as publicações derivadas dos trabalhos realizados durante o curso de doutorado.

6.1 CONCLUSÃO

Este trabalho de tese apresentou um modelo multiagente baseado em um novo protocolo de leilões como solução ao PPTDP. Este modelo foi proposto com a intenção de experimentar a aplicação da abordagem multiagente em problemas geralmente resolvíveis por meio de métodos tradicionais, tais como a programação matemática. Tais métodos apresentam certas inconveniências que desencorajam o uso no PPTDP, principalmente por causa da forma centralizada de resolução de problemas, da dificuldade para representação computacional dos problemas e por causa do alto tempo de processamento, geralmente causado pela complexidade combinatória do problema.

Desta forma, certas características naturais da abordagem multiagente motivaram a sua adoção para resolução do PPTDP. Esta abordagem permite uma representatividade computacional mais detalhada do problema e permite resolvê-lo de forma distribuída e em tempo hábil quando técnicas heurísticas são empregadas. Estas características são requisitos desejados ao sistema, pois um baixo tempo de processamento incentiva o uso pelos usuários e a natureza descentralizada da solução torna o sistema mais flexível em face de presumíveis mudanças no mercado petrolífero¹⁴.

Ademais, a abordagem multiagente permite uma maior simplicidade na representação do problema devido à equivalência natural dos agentes com os elementos

¹⁴ Se a abertura do mercado levar ao ingresso de empresas concorrentes no segmento *downstream*, a existência de uma solução distribuída seria imprescindível para realizar o planejamento de transferência de produtos de petróleo, principalmente por causa da provável política de confidencialidade dos dados entre os envolvidos.

estruturais dos cenários reais. Certamente, esta equivalência é elevada com a adoção de mecanismos de interação baseados em negociações. Como importante vantagem, esta naturalidade de representação do problema também permite um melhor entendimento e acompanhamento do processo de obtenção dos resultados do planejamento. Como exemplo, um especialista de planejamento pode ter acesso a todo o conjunto de leilões realizados por qualquer base, produto e período para entender passo-a-passo a construção das curvas de estoque finais. Também, um especialista de planejamento pode analisar particularmente qualquer leilão a fim de entender porque um dado fluxo foi concebido considerando o contexto de negociação em um dado momento.

Além disso, esta correspondência entre o modelo e a realidade facilita o processo de evolução do modelo em caso de mudanças nos requisitos do problema. Esta flexibilidade oferecida é de suma importância para o desenvolvimento de um projeto complexo como o PPTDP, principalmente porque mudanças nos requisitos ou inclusões/alterações de atributos do problema são geralmente inevitáveis.

Apesar da simplicidade oferecida pela abordagem, o processo de concepção do protocolo de negociação e conseqüentemente do modelo multiagente para o PPTDP foi bastante desafiador. Uma das dificuldades da modelagem foi justamente a disparidade entre a complexidade do problema e a simplicidade do protocolo de leilões utilizado, resultando em um modelo com diferentes tratamentos heurísticos combinados.

Por se tratar de um problema do mundo real, o modelo apresentado envolve um conjunto de características que dificilmente são encontradas de forma conjunta em problemas da literatura resolvidos por meio de leilões. Esta constatação também contribuiu para aumentar o grau de dificuldade da concepção do modelo.

Na verdade, o maior desafio decorreu da necessidade de integrar, em forma de leilões, soluções para vários subproblemas conectados, tais como: manipulação de vários tipos de produtos, manipulação de múltiplos itens de cada tipo de produto, existência de recursos complementares, existência de vários recursos compartilhados, alocações dos recursos em relação ao tempo, transformações entre tipos de produtos, atingimento de metas, satisfação de objetivos distintos (i.e. satisfação da demanda e redução dos custos), relacionamento muitos para muitos entre leiloeiros e participantes e negociações simultâneas.

De qualquer forma, graças aos esforços dispensados e aos resultados obtidos, a execução do modelo computacional permite demonstrar a viabilidade da aplicação de mecanismos de leilões na resolução de problemas complexos, tal como o PPTDP.

Certamente, o protocolo proposto também pode ser generalizado a fim de ser aplicado efetivamente na resolução de qualquer outro problema que clame pelas mesmas necessidades do PPTDP, e com isso, possa desfrutar das mesmas vantagens supracitadas.

Entretanto, apesar das qualidades do modelo abordado nesta tese, este também apresenta algumas deficiências que podem prejudicar a obtenção de resultados de melhor qualidade, principalmente em relação aos custos de movimentação. Como exemplo, o modelo apresentado não permite desistências de acordos, não incentiva explicitamente a formação de fluxos com maiores volumes para ganho em escala, não permite replanejamentos em períodos anteriores e principalmente, não apresenta flexibilidade para sair de soluções estacionárias ditas ótimas locais.

De certa forma, a implementação dos melhoramentos supracitados exige significativas mudanças no modelo atual. Também, a incorporação de extensões ao protocolo atual pode levar a uma desconfiguração e distanciamento de sua essência, ou seja, do propósito para o qual foi inicialmente concebido. Desta forma, a solução adotada consistiu na elaboração de um segundo modelo (e protocolo) a fim de aproveitar todo o conhecimento heurístico empregado no modelo atual e incorporar os melhoramentos necessários. Neste sentido, o APÊNDICE A apresenta a proposta deste novo modelo para aplicação no PPTDP.

Em suma, os modelos apresentados neste trabalho de tese e apêndice compartilham do mesmo objetivo: encontrar soluções factíveis em tempo hábil. Porém, apesar das similaridades, estes modelos apresentam significativas diferenças. Por exemplo, os modelos se diferem especialmente em termos dos protocolos utilizados, quantidade de iterações, conjunto de heurísticas (e.g. armazenamento de fluxos temporários, estrutura do anúncio) e teoricamente em termos de qualidade dos resultados.

Basicamente, o modelo multiagente abordado nesta tese segue as diretrizes de um protocolo que institui o fechamento de acordos em leilões simultâneos por meio de um sequenciamento realizado de acordo com os próprios valores dos lances, sendo que os lances expressam propriedades subjetivas de cada participante. Neste protocolo, a fase de sequenciamento contribui para a redução do tempo de processamento do sistema por evitar a necessidade de realização de leilões especializados para resolver conflitos na alocação de recursos compartilhados (i.e. tanques e modais). Assim, a forma pela qual os atributos dos lances são calculados e manipulados contribuem para a formação de acordos de qualidade que evitam negociações excessivas ou mesmo o uso de soluções combinatórias.

Por sua vez, o modelo apresentado no APÊNDICE A foi proposto na intenção de encontrar uma solução factível de melhor qualidade do que a resultante do primeiro modelo, fazendo uso de um provável maior tempo de processamento. Basicamente, neste modelo, os leilões ocorrem totalmente de forma simultânea, sem necessidade de uma fase de sequenciamento de fechamento de acordos. Esta interação é possibilitada pela permissão de quebras de contrato a qualquer momento por ambas as partes do acordo (i.e. leiloeiro ou participante). Esta prática ameniza o problema das incertezas em tomadas de decisões dos agentes, uma vez que os envolvidos sempre podem desfazer seus acordos ao vislumbrarem melhores oportunidades. Este dinamismo nas negociações gera naturalmente uma maior interatividade entre os agentes, a qual é considerada benéfica para que uma solução não se mantenha estagnada em um espaço de solução não factível. Ademais, por não haver a necessidade de uma sequencialidade do fechamento dos leilões, este modelo apresenta uma maior capacidade de distribuição e execução paralela do que o anterior, o que pode compensar a inconveniência do provável aumento na quantidade de leilões.

Com a materialização destes modelos, ambos podem ser utilizados conjuntamente na resolução do PPTDP. Como ambos podem provavelmente se diferir em termos de qualidade de resultados e tempo de processamento, a escolha sobre o modelo mais adequado ao cenário em planejamento poderá caber ao próprio usuário ou mesmo ao sistema, de forma automática. Esta escolha pode ser influenciada pela complexidade do cenário, disponibilidade de tempo do usuário para aguardar a construção do resultado ou ainda outros fatores mais subjetivos.

Independente do modelo multiagente em consideração, este trabalho de tese busca evidenciar os benefícios e valores da utilização de abordagens heurísticas, descentralizadas, baseadas em leilões multiagente na resolução de problemas complexos e reais. Certamente, a vantagem de envolvimento de um maior número de particularidades do problema, mantendo a simplicidade e fácil compreensão da solução, juntamente com vantagens computacionais, como capacidade de distribuição e baixo tempo de execução, foram os principais pilares que permitiram demonstrar a viabilidade de aplicação destes mecanismos em problemas industriais, tal como o PPTDP, que são habitualmente resolvíveis por meio de métodos tradicionais. Desta forma, este trabalho também tem como intuito incentivar novas pesquisas que contribuam para o aperfeiçoamento de tais técnicas e aplicabilidade em novos problemas industriais.

6.2 TRABALHOS FUTUROS

Durante o período de doutorado, várias atividades foram realizadas e contribuíram para a conclusão do corrente trabalho de tese. De um modo geral, estas atividades consistiram na própria definição do tema de estudo, no entendimento das particularidades do problema de planejamento, na definição do tipo de abordagem para resolução deste problema, na descrição formalizada do problema, na concepção de dois modelos e protocolos multiagentes e consequentemente, na materialização computacional de tais modelos.

Atualmente, o modelo multiagente apresentado no corpo desta tese se encontra em fase de implantação juntamente à Petrobras. Em paralelo, uma série de requisitos está sendo levantada para aproximar ainda mais o problema corrente do planejamento operacional. Certamente, o tratamento destes novos requisitos consiste em parte das atividades futuras a serem realizadas em desdobramentos do projeto.

Mais precisamente, com o objetivo de haver uma maior proximidade do problema com o planejamento realizado pelos especialistas, existe a intenção de gerar fluxos de movimentações que envolvam mais de um tipo de produto para serem movimentados juntos em um mesmo modal de transporte. Este requisito é importante para prover um melhor aproveitamento e alocação das capacidades dos modais ditos ilimitados. Estes modais se diferem dos dutos, pois são os modais que se movimentam e não os produtos. Geralmente, tais modais carregam concomitantemente mais de um tipo de produto.

Para auxiliar nesta tarefa de compor fluxos multiprodutos, o modelo precisará respeitar novos tamanhos de lotes que serão definidos particularmente para cada rota que contenha modais ilimitados. Além do lote mínimo existente, o modelo também precisará lidar com as informações de lote típico e máximo. O lote típico consiste no estoque comum ou ideal de uma dada unidade de modal ilimitado (e.g. um único navio), enquanto o lote máximo consiste na capacidade máxima de uma unidade de modal ilimitado. Estes lotes precisarão ser respeitados apenas na formação dos fluxos, não influenciando na capacidade das rotas, as quais continuarão sendo consideradas como ilimitadas por poderem ser formadas por inúmeras unidades destes modais.

Outra atividade futura consiste no refinamento da alocação da capacidade dos modais limitados, ou seja, dos dutos. Para haver uma maior aproximação do problema ao planejamento operacional, esta atividade consiste no tratamento das capacidades dos dutos em termos de subperíodos (e.g. semanas) ao invés de períodos. Neste caso, a capacidade do período seria distribuída igualmente entre os subperíodos. Certamente, quanto menor for

a granularidade de um subperíodo, maior será a aderência do modelo ao planejamento operacional e logicamente, maior será a exigência de processamento computacional para encontrar uma solução factível.

De um modo geral, as propostas de melhoramento apresentadas visam reduzir os esforços dos especialistas na viabilização das soluções de planejamento tática em nível operacional. Neste sentido, outra atividade que contribui para este fim seria o tratamento de um cenário da malha brasileira como um único nível hierárquico. Este melhoramento contribui para sanar as limitações da abordagem multinível apresentadas na seção 5.2.4. Certamente, tal funcionalidade exige um maior esforço computacional na execução do modelo, fazendo com que qualquer otimização em termos de processamento seja bem-vinda. Desta forma, há a necessidade de reavaliar minuciosamente as implementações heurísticas a fim de tornar o modelo atual ainda mais eficiente. Provavelmente, o ajuste que pode gerar um maior impacto positivo no desempenho do sistema consiste na redução da quantidade de leilões.

Para reduzir a quantidade de leilões realizados em um cenário, se faz necessário aumentar os volumes de produtos objetos de acordos nos leilões. Este comportamento pode ser obtido por meio da transferência ao papel de leiloeiro da responsabilidade de definir tais volumes. O volume de um acordo seria definido com base em informações enviadas pelos participantes, tais como, a capacidade diária de armazenamento, grau de urgência, volume mínimo e máximo desejado. Como o papel de leiloeiro possui uma visão mais ampla sobre as necessidades dos participantes, ele é o mais indicado para decidir sobre o volume dos fluxos a serem escoados a fim de atender satisfatoriamente cada participante.

Outra medida importante para a viabilização da execução de cenários de um único nível, de forma eficiente, seria a adequação do modelo multiagente para execução em ambientes de cluster, respeitando as políticas de alocação de recursos e segurança cabíveis. Esta atividade contribuiria para externalizar uma vantagem intrínseca aos modelos multiagente: a execução descentralizada e paralela de um sistema.

De forma concomitante às atividades de melhoramento e extensão da solução apresentada nesta tese, esforços futuros também serão despendidos para a finalização da implementação do modelo apresentado no APÊNDICE A. Atualmente, este modelo se encontra parcialmente implementado, faltando materializar o suporte a múltiplos produtos, negociações por meio de leilões de repasse, certas interações de cancelamento e operações

eventuais. Como complementação a estas atividades de implementação, se faz necessário considerar as importantes atividades de teste e validação do modelo.

Em um foco mais conceitual, outra atividade futura consiste em analisar formalmente as propriedades de ambos os protocolos multiagentes a fim de provar, por meio de representações matemáticas ou lógicas (e.g. Redes de Petri), as suas respectivas corretudes de execução. Mais precisamente, este estudo formal buscaria demonstrar e garantir a qualidade dos protocolos por meio da análise formal de alguns de seus pontos cruciais, entre eles: a) a garantia de encontrar uma solução; b) a garantia de término das negociações e c) a garantia de evitar *deadlocks* em relação aos recursos durante as negociações simultâneas. Mesmo que um protocolo tenha sido aplicado em diferentes cenários de um problema complexo do mundo real e não se tenha observado nenhuma incorretude, este estudo é importante para assegurar o funcionamento correto dos protocolos em qualquer outro domínio de aplicação.

Contudo, os trabalhos futuros estão respectivamente relacionados a ajustes e conclusão dos modelos multiagentes para que estes possam contribuir efetivamente para com o processo de planejamento das transferências de derivados de petróleo. Certamente, estudos e aperfeiçoamentos de tais modelos consistem na base desta tese. Entretanto, juntamente com o objetivo de demonstrar a viabilidade do emprego de leilões para resolver problemas reais complexos, esta tese também tem como intenção inspirar o desenvolvimento de novos projetos na área petrolífera ou em qualquer outra área com base em mecanismos de leilões multiagentes.

6.3 PUBLICAÇÕES

Como resultado das contribuições desta tese, alguns trabalhos foram publicados. As referências destes trabalhos estão listadas abaixo:

1. Pereira, F. R., Banaszewski, R. F., Simão, J.M., Tacla, C.A. (2010). Método Baseado em Detecção de Mudanças para Determinar Preço de Oferta de Pedidos de Clientes no Ambiente TAC-SCM. WESAAC 2010 - IV Workshop-Escola de Sistemas de Agentes, seus Ambientes e aplicações. Rio Grande - RS.
2. Banaszewski, R. F., Tacla, C. A., Pereira, F. R., Arruda, L. V., Enembreck, F. (2010). Planning Transport of Crude Oil Derivatives with Simultaneous Auctions. IEEE Conference on Systems, Man and Cybernetics, Istambul, Turquia.
3. Banaszewski, R. F., Pereira F. R., Arruda, L. V., Simão, J. M., Tacla, C. A., (2010). Simultaneous Auctions in Transport Planning of Multiple Derivatives of Oil in Multi-

- Modals Networks. 42º Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional (SBPO). Bento Gonçalves, RS.
4. Banaszewski, R. F., Nogueira, K. E., Simão, J. M., Arruda, L. V., Tacla, C. A. (2011). Uma Extensão ao Protocolo Contract-Net Aplicado ao Problema de Planejamento de Transporte de Derivados de Petróleo. V Workshop-Escola de Sistemas de Agentes, seus Ambientes e Aplicações (WESAAC 2011). Curitiba - Brazil: 39-50.
 5. Banaszewski, R. F., Nogueira, K. E., Simão, J. M., Arruda, L. V., Tacla, C. A. (2012). "Protocolo de Leilões Simultâneos com Escalonamento: Aplicação ao Problema de Planejamento de Movimentações de Derivados de Petróleo." Revista de Informática Teórica e Aplicada – RITA.
 6. Banaszewski, R. F., Nogueira, K. E., Arruda, L. V., Simão, J. M., Tacla, C. A., Relvas, S., Barbosa-Póvoa, A.P. (2012). Transportation Planning of Oil Products: An application of multi-agents auction-based protocol with improvements in the bidding strategy. 22nd European Symposium on Computer Aided Process Engineering. Londres - Inglaterra, Elsevier, v. 30. p. 387-391.
 7. Banaszewski, R. F., Arruda, L. V., Simão, J. M., Tacla, C. A., Relvas, S., Barbosa-Póvoa, A.P. (2013). An application of a multi-agent auction-based protocol to the tactical planning of oil product transport in the Brazilian multimodal network. Computers & Chemical Engineering, p. 17-32.

O artigo (1) foi publicado em uma conferência nacional e é resultado dos esforços despendidos na concepção de um sistema de otimização baseado em agentes para competir em um evento internacional de cadeias de suprimentos. Este trabalho permitiu adquirir um maior conhecimento dos conceitos e práticas que envolvem a tecnologia de agentes e cadeias de suprimentos.

Posteriormente, o autor publicou o artigo (2) em conferência internacional e o artigo (3) em conferência nacional. Estes trabalhos descrevem um modelo multiagente para a resolução de uma simplificação do PPTDP. Uma das simplificações mais pertinentes é a desconsideração do tempo na alocação dos recursos de armazenamento e de transporte. Estes trabalhos suportam, respectivamente, o planejamento de cenários compostos por um e vários tipos de produtos.

Na sequência, o autor publicou o artigo (4) em conferência nacional. Basicamente, este descreve o modelo apresentado no capítulo 4. Este artigo foi escolhido como um dos três

melhores do evento e recebeu convite para publicação em revista nacional. Desta forma, uma extensão do artigo foi publicada em revista conforme a referência (5).

Por fim, o autor publicou o artigo (6) em uma conferência internacional. Basicamente, o artigo descreve alguns aperfeiçoamentos recentes propostos ao modelo, os quais se referem principalmente ao cálculo dos valores dos lances com impacto direto no sequenciamento dos fechamentos dos leilões. Este artigo gerou um convite para submissão de sua extensão a uma revista internacional conceituada (i.e. classificada pela CAPES em 2013 com o qualis A1 na área de Ciência da Computação e qualis B1 na área de Engenharias IV). Como resultado, o artigo (7) foi publicado em tal revista.

REFERÊNCIAS

- AIZEMBERG, L. et al. **MODELO DE OTIMIZAÇÃO PARA O PROBLEMA DO TRANSPORTE DE DERIVADOS DE PETROLEO COM BUSCA LOCAL POR MIP E SIMULAÇÃO**. XLIII Simposio Brasileiro de Pesquisa Operacional. Ubatuba - SP 2011.
- AIZEMBERG, L. et al. **New formulations and a column generation-based heuristic for a problem of petroleum transportation**. Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional. Natal - RN 2013.
- AKNINE, S.; PINSON, S.; SHAKUN, M. F. An Extended Multi-Agent Negotiation Protocol. **Autonomous Agents and Multi-Agent Systems**, v. 8, n. 1, p. 5-45, 2004. ISSN 1387-2532.
- ALVES, V. R. F. M. **Programação de Transferência de Derivados de Petróleo em Rede Dutoviária usando Algoritmo Genético**. 2007. (Dissertação de Mestrado). Departamento de Engenharia de Produção, Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ, Rio de Janeiro.
- ANTHONY, P. et al. **Autonomous agents for participating in multiple on-line auctions**. IJCAI Workshop on E-Business and the Intelligent Web. Seattle, USA: 54-64 p. 2001.
- BALLOU, R. H. **Gerenciamento da Cadeia de Suprimentos: Logística Empresarial**. Bookman, 2004. ISBN 9788536305912. Disponível em: < <http://books.google.com/books?id=XTq7VgXxm5MC> >.
- BANASZEWSKI, R. F. et al. **Simultaneous Auctions in Transport Planning of Multiple Derivatives of Oil in Multi-Modals Networks**. 42º Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional (SBPO). Bento Gonçalves, RS 2010.
- BANASZEWSKI, R. F. et al. Planning Transport of Crude Oil Derivatives with Simultaneous Auctions. IEEE Conference on Systems, Man and Cybernetics, 2010. Istanbul, Turquia.
- BAUER, B.; MÜLLER, J. P.; ODELL, J. An extension of UML by protocols for multiagent interaction. 1998.
- BAZARAA, M. S.; JARVIS, J. J.; SHERALI, H. D. **Linear Programming and Network Flows**. John Wiley & Sons, 2009. ISBN 9780470462720. Disponível em: < http://books.google.com/books?id=2DKKHvV_xVwC >.
- BELLIFEMINE, F. L.; CAIRE, G.; GREENWOOD, D. **Developing multi-agent systems with JADE**. John Wiley, 2007. ISBN 9780470057476. Disponível em: < <http://books.google.com/books?id=ZLBQAAAAMAAJ> >.
- BOSCHETTO, S. N. **Otimização das operações de terminais petrolíferos usando técnicas de pré-processamento**. 2006. (Dissertação de Mestrado). Curso de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial - CPGEI, Universidade Tecnológica Federal do Paraná - UTFPR, Curitiba.

BOSCHETTO, S. N. **Otimização das Operações de Transferência e Estocagem em Redes de Dutos**. 2011. 237 Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial (CPGEI), Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), Curitiba.

BOSCHETTO, S. N. et al. An operational scheduling model to product distribution through a pipeline network. **Industrial & Engineering Chemistry Research**, v. 49, n. 12, p. 5661–5682, 2010.

BOYAN, J.; GREENWALD, A. Bid determination in simultaneous auctions: An agent architecture. Third ACM Conference on Electronic Commerce, 2001.

BRACONI, V. M. **Heurísticas multifluxo para roteamento de produtos em redes dutoviárias**. 2002. (Dissertação de Mestrado). Departamento de Informática PUC-Rio, Rio de Janeiro, Brasil.

BRATMAN, M. **Intention, plans, and practical reason**. Harvard University Press, 1987. ISBN 9780674458185. Disponível em: <<http://books.google.com/books?id=I0nuAAAAMAAJ>>.

BRITO, R. C. **Um simulador multiagente para auxiliar decisões logísticas de alocação de petróleo em portos**. 2008. (Mestrado). Curso de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial -CPGEI, Universidade Tecnológica Federal do Paraná - UTFPR, Curitiba - Paraná.

BRITO, R. C.; TACLA, C. A. **Um Sistema Multiagente Auto-Interessado para Auxiliar nas Decisões Logísticas de Alocação de Petróleo em Portos**. III Workshop Escola de Sistemas de Agentes para Ambientes Colaborativos (WESAAC). Caxias do Sul, RS 2009.

BROOKS, R. A robust layered control system for a mobile robot. **Robotics and Automation, IEEE Journal of**, v. 2, n. 1, p. 14-23, 1986. ISSN 0882-4967.

BRUSCO, S.; LOPOMO, G. Simultaneous Ascending Auctions with Complementarities and Known Budget Constraints. Symposium on Auction Theory, 2006. p.105-124.

BUSSINESSDICTIONARY. Planning Definition. 2011. Disponível em: <<http://www.businessdictionary.com/definition/planning.html>> >. Acesso em: 22/09/2011.

CAMPONOGARA, E. **A-Teams para um Problema de Transporte de Derivados de Petróleo**. 1995. Programa de Pós-Graduação em Matemática, Universidade Estadual de Campinas. Instituto de Matemática, Estatística e Computação Científica, Campinas, São Paulo.

CLOUTIER, L. et al. A commitment-oriented framework for networked manufacturing coordination. **International Journal of Computer Integrated Manufacturing**, v. 14, n. 6, p. 522-534, 2001. Disponível em: <<http://www.ingentaconnect.com/content/tandf/tcim/2001/00000014/00000006/art00003>>.

CRAMTON, P., Ed. **Simultaneous Ascending Auctions**: University of Maryland. 2004.

CRAMTON, P. **Combinatorial Auctions**. The MIT Press, 2006. ISBN 0262033429.

CRANE, D. S.; WAINWRIGHT, R. L.; SCHOENEFELD, D. A. Scheduling of multiproduct fungible liquid pipelines using genetic algorithms. Proceedings of the 1999 ACM Symposium on Applied Computing, 1999. San Antonio, USA. p.280-285.

CSCMP, C. O. S. C. M. P.-. CSCMP Supply Chain Management Definitions. 2011. Disponível em: < <http://cscmp.org/aboutcscmp/definitions.asp> >. Acesso em: Março.

DAVIDSSON, P. et al. **Multi agent based simulation of transport chains**. Proceedings of the 7th international joint conference on Autonomous agents and multiagent systems - Volume 2. Estoril, Portugal: International Foundation for Autonomous Agents and Multiagent Systems: 1153-1160 p. 2008.

DE LA CRUZ, J. M. et al. Multiobjective optimization of the transport in oil pipelines networks. Emerging Technologies and Factory Automation, 2003. Proceedings. ETFA '03. IEEE Conference, 2003. 16-19 Sept. 2003. p.566-573 vol.1.

DEB, K. **Multi-objective optimization using evolutionary algorithms**. John Wiley & Sons, 2001. ISBN 9780471873396. Disponível em: < <http://books.google.com/books?id=OSTn4GSy2uQC> >.

DESHPANDE, U.; GUPTA, A.; BASU, A. Performance enhancement of a contract net protocol based system through instance-based learning. **Systems, Man, and Cybernetics, Part B: Cybernetics, IEEE Transactions on**, v. 35, n. 2, p. 345-358, 2005. ISSN 1083-4419.

DOMSCHKE, W.; SCHOLL, A. **Grundlagen der Betriebswirtschaftslehre**. 3rd Edition. Berlin: Springer, 2005. Disponível em: < <http://ideas.repec.org/p/dar/wpaper/20670.html> >.

EXCELENTE-TOLEDO, C. B.; BOURNE, R. A.; JENNINGS, N. R. **Reasoning about commitments and penalties for coordination between autonomous agents**. Proceedings of the fifth international conference on Autonomous agents. Montreal, Quebec, Canada: ACM: 131-138 p. 2001.

FARATIN, P.; SIERRA, C.; JENNINGS, N. R. Negotiation decision functions for autonomous agents. **Robotics and Autonomous Systems**, v. 24, n. 3-4, p. 159-182, 1998. ISSN 0921-8890. Disponível em: < <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921889098000293> >.

FATIMA, S. **Sequential versus simultaneous auctions: a case study**. Proceedings of the 8th international conference on Electronic commerce: The new e-commerce: innovations for conquering current barriers, obstacles and limitations to conducting successful business on the internet. Fredericton, New Brunswick, Canada: ACM: 82-91 p. 2006.

FATIMA, S. S. A Comparison of Sequential and Simultaneous Auctions. In: FASLI, M. e SHEHORY, O., TADA/AMEC'06 Proceedings of the 2006 AAMAS workshop and TADA/AMEC 2006 conference on Agent-mediated electronic commerce: automated negotiation and strategy design for electronic markets, 2006. Berlin, Heidelberg. Springer-Verlag p.164-177.

FELIZARI, L. C. **Programação das operações de transporte de derivados de petróleo em redes de dutos**. 2009. (Doutorado). CPGEI, Universidade Tecnológica Federal do Paraná - UTFPR, Curitiba, PR.

FENG, J. **Simultaneous Vs. Sequential Auctions, Intensity of Competition and Uncertainty**. Penn State University: Working Paper 2005.

FEO, T. A.; RESENDE, M. G. C. Greedy Randomized Adaptive Search Procedures. **Journal of Global Optimization**, v. 6, n. 2, p. 109-133, 1995. ISSN 0925-5001. Disponível em: < <http://dx.doi.org/10.1007/BF01096763> >.

FERBER, J. **Multi-agent systems: an introduction to distributed artificial intelligence**. Addison-Wesley, 1999. ISBN 9780201360486. Disponível em: < <http://books.google.com/books?id=zt1SAAAAMAAJ> >.

FILHO, E. M. D. S.; BAHIENSE, L.; FILHO, V. J. M. F. **Programação de uma rede dutoviária considerando períodos de manutenção programada**. XLIII Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional. Ubatuba - SP 2011.

FILHO, E. M. D. S. et al. **Pipeline network scheduling with peak hours**. Rio Oil & Gas Expo and Conference 2010. Rio de Janeiro: Instituto Brasileiro de Petróleo, Gás e Biocombustíveis - IBP 2010.

FLEISCHMANN, B.; MEYR, H.; WAGNER, M. Advanced Planning Supply Chain Management and Advanced Planning. In: STADTLER, H. e KILGER, C. (Ed.): Springer Berlin Heidelberg, 2005. p.81-106. ISBN 978-3-540-24814-9.

FONSECA, C. M.; FLEMING, P. J. Multiobjective optimization and multiple constraint handling with evolutionary algorithms. I. A unified formulation. **Systems, Man and Cybernetics, Part A: Systems and Humans, IEEE Transactions on**, v. 28, n. 1, p. 26-37, 1998. ISSN 1083-4427.

FOUNDATION FOR INTELLIGENT PHYSICAL AGENTS. **FIPA Contract Net Interaction Protocol Specification**. <http://www.fipa.org/specs/fipa00029/index.html> 2002a.

FOUNDATION FOR INTELLIGENT PHYSICAL AGENTS. **FIPA Iterated Contract Net Interaction Protocol Specification** <http://www.fipa.org/specs/fipa00029/index.html> 2002b.

FOUNDATION FOR INTELLIGENT PHYSICAL AGENTS. Publicly Available Implementations of Agent Platforms. 2011. Disponível em: < <http://www.fipa.org/resources/livesystems.html#zeus> >. Acesso em: 30/10/2011.

FRIEDMAN-HILL, E. **Jess in action: rule-based systems in Java**. Manning, 2003. ISBN 9781930110892. Disponível em: < <http://books.google.com/books?id=-xxjRZhyFOIC> >.

GARCIA, J. M. C. et al. Hybrid heuristic and mathematical programming in oil pipelines networks. Evolutionary Computation, 2004. CEC2004. Congress on, 2004. 19-23 June 2004. p.1479-1486 Vol.2.

GASS, S. I. **Linear programming: methods and applications**. Dover Publications, 1985. ISBN 9780486432847. Disponível em: < <http://books.google.com/books?id=dDIMnAntgUsC> >.

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

GOVIL, M.; PROTH, J. M. **Supply chain design and management: strategic and tactical perspectives**. Academic, 2001. ISBN 9780122941511. Disponível em: < <http://books.google.com.pe/books?id=AsUMo2euPUkC> >.

HAUSCH, B. D. Multi-object auctions: sequential vs. simultaneous sales. **Manage. Sci.**, v. 32, n. 12, p. 1599-1610, 1986. ISSN 0025-1909.

HILLIER, F. S.; LIEBERMAN, G. J. **Introduction to Operations Research**. 8th. Boston MA: McGraw-Hill, 2005.

HUHNS, M. N.; STEPHENS, L. M. Multiagent systems and societies of agents. In: (Ed.). **Multiagent systems**: MIT Press, 1999. p.79-120. ISBN 0-262-23203-0.

ILOS, I. **Panorama 2010 - Custos Logísticos no Brasil**. Instituto de Logística e Supply Chain. Rio de Janeiro - Brasil. 2010

IPC. 5th International Planning Competition - PipesWorld Domain. 2006. Disponível em: < <http://zeus.ing.unibs.it/ipc-5/> >.

JENNINGS, N. R. **Agent-Oriented Software Engineering**. Proceedings of the 9th European Workshop on Modelling Autonomous Agents in a Multi-Agent World: MultiAgent System Engineering: Springer-Verlag: 1-7 p. 1999.

JENNINGS, N. R. On Agent-Based Software Engineering. **Artificial Intelligence**, v. 117, n. 2, p. 277-296, 2000.

JENNINGS, N. R. et al. Automated negotiation: prospects, methods and challenges. **Intern. J. of Group Decision and Negotiation**, v. 10, n. 2, p. 199-215, 2001.

JENNINGS, N. R. et al. On Argumentation-Based Negotiation. IWMAS, 1998. MIT Endicott House, Massachusetts, USA.

KAGEL, J. H.; LEVIN, D. **Auctions: A Survey of Experimental Research, 1995-2008**. Department of Economics - The Ohio State University. 2008

KENNEDY, J.; EBERHART, R. Particle swarm optimization. Neural Networks, 1995. Proceedings., IEEE International Conference on, 1995. Nov/Dec 1995. p.1942-1948 vol.4.

KLEMPERER, P. Auction theory: A guide to the literature. **Journal of Economic Surveys**, 1999.

KNABE, T.; SCHILLO, M.; FISCHER, K. Improvements to the FIPA Contract Net Protocol for Performance Increase and Cascading Applications. **International Workshop for Multi-Agent Interoperability at the German Conference on AI**, 2002.

KOESTLER, A. **The ghost in the machine**. Henry Regnery, 1971. Disponível em: < <http://books.google.co.uk/books?id=NTSsAAAAIAAJ> >.

KOK, A. G. D.; GRAVES, S. C., Eds. **Supply Chain Management: Design, Coordination and Operation**. Handbooks in Operations Research and Management Science: North-Holland, v.11, p.752, Handbooks in Operations Research and Management Scienceed. 2003.

KRISHNA, V. **Auction Theory**. 1st edition. Academic Press, 2002. 200 ISBN 012426297X.

LACHTERMACHER, G. **Pesquisa Operacional na Tomada de Decisão**. 4rd Edition. Rio de Janeiro: Campus, 2007.

LANKFORD, R. Production scheduling. In: ZANDIN, K. B. (Ed.). **Maynard's Industrial Engineering Handbook**. New York: McGraw-Hill, 2001.

LIPORACE, F. D. S. **Planejadores para transporte em polidutos**. 2005. (Tese de Doutorado). Departamento de Informática, Pontífica Universidade Católica do Rio de Janeiro - PUC-Rio, Rio de Janeiro.

LOPES, T. M. et al. A hybrid model for a multiproduct pipeline planning and scheduling problem. **Constraints**, v. 15, n. 2, p. 151-189, 2010. ISSN 1383-7133.

LOPES, T. M. T. **O Problema de Planejamento e Agendamento de Operações em uma Rede de Oleodutos**. 2010. (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Ciência da Computação, Universidade Estadual de Campinas . Instituto de Computação, Campinas, São Paulo.

LOU, P. et al. Study on multi-agent-based agile supply chain management. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 23, n. 3, p. 197-203, 2004. ISSN 0268-3768. Disponível em: < <http://dx.doi.org/10.1007/s00170-003-1626-x> >.

MAFIK, V.; PECHOUCEK, M. Social knowledge in multi-agent systems. Systems, Man and Cybernetics, 2004 IEEE International Conference on, 2004. 10-13 Oct. 2004. p.1950-1957 vol.2.

MARCELLINO, F. J. D. M. **Solução do problema de transporte de derivados de petróleo em oleodutos através de um modelo de satisfação de restrições distribuído com otimização**. 2006. 211 (Dissertação de Mestrado). Curso de Pós-Graduação em Engenharia Eletrônica e Computação, Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos - SP.

MARRIOTT, K.; STUCKEY, P. J. **Programming with constraints: an introduction**. MIT Press, 1998. ISBN 9780262133418. Disponível em: < <http://books.google.com/books?id=jBYAleHTldsC> >.

MILGROM, P. **Putting Auction Theory to Work**. Cambridge University Press, 2004. 368

MILIDIÚ, R. L.; PESSOA, A. A. **Complexidade de Problemas de Planejamento de Distribuição em Oleodutos**. PUC-RIO. Rio de Janeiro. 2001

MILIDIU, R. L. et al. Um algoritmo GRASP para o problema de transporte de derivados de petróleo em oleodutos. Proceedings of the XXXIII Brazilian Symposium on Operations Research, 2001. p.237-246.

MILIDIU, R. L.; PESSOA, A. A.; LABER, E. S. **Pipeline transportation of petroleum products with no due dates**. LATIN 2002. Cancun, Mexico: 248-262 p. 2002.

MODI, P. et al. Adopt: asynchronous distributed constraint optimization with quality guarantees. **Artificial Intelligence**, v. 161, n. 1-2, p. 149-180, 2005. ISSN 00043702. Disponível em: < <http://dx.doi.org/10.1016/j.artint.2004.09.003> >.

MOURA, A. et al. Planning and Scheduling the Operation of a Very Large Oil Pipeline Network
Principles and Practice of Constraint Programming. In: STUCKEY, P. (Ed.): Springer Berlin / Heidelberg, v.5202, 2008. p.36-51. (Lecture Notes in Computer Science). ISBN 978-3-540-85957-4.

MOURA, A. V. et al. Heuristics and Constraint Programming Hybridizations for a Real Pipeline Planning and Scheduling Problem. Computational Science and Engineering, 2008. CSE '08. 11th IEEE International Conference on, 2008. 16-18 July 2008. p.455-462.

NATHAN, I., Ed. **The Energy Intelligence Top 100: Ranking The World's Oil Companies**. Energy Intelligence Research Energy Intelligence Research Publications, Energy Intelligence Research ed. 2011.

NING, L.; FEI-YAN, G. Research on the Negotiation Strategy of Multi-agent Based on Extended Contract Net. International Conference on Future Computer and Communication, 2009. 6-7 June 2009. p.105-108.

NWANA, H. S. Software Agents: An Overview. . **Knowledge Engineering Review**, v. 11, n. 3, p. 1-40, 1966.

OHKO, T.; HIRAKI, K.; ANZAI, Y. **Addressee Learning and Message Interception for Communication Load Reduction in Multiple Robot Environments**. Selected papers from the Workshop on Distributed Artificial Intelligence Meets Machine Learning, Learning in Multi-Agent Environments: Springer-Verlag: 242-258 p. 1997.

PAPADIMITRIOU, C. H.; STEIGLITZ, K. **Combinatorial optimization: algorithms and complexity**. Dover Publications, 1998. ISBN 9780486402581. Disponível em: < <http://books.google.com/books?id=u1RmDoJqkF4C> >.

PARUNAK, H. V. D. Industrial and practical applications of DAI. In: (Ed.). **Multiagent systems**: MIT Press, 1999. p.377-421. ISBN 0-262-23203-0.

PEREIRA, B. C. **Programação de transferência de derivados de petróleo em rede dutoviária: uma análise exata via branch-and-bound**. 2008. (Dissertação de Mestrado). Programa de Engenharia de Produção, COPPE-UFRJ. , Rio de Janeiro - RJ.

PEREIRA, F. R. **DCOP MOASSÍ: Otimização de Restrição Distribuída em Problemas Contínuos de Fluxo em Rede pela Unificação da Discretização e Resolução**. 2011. (Dissertação de Mestrado). Curso de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial - CPGEI, Universidade Tecnológica Federal do Paraná - UTFPR, Curitiba - PR.

PEREIRA, F. R. et al. **Método Baseado em Detecção de Mudanças para Determinar Preço de Oferta de Pedidos de Clientes no Ambiente TAC-SCM**. WESAAC 2010 - IV Workshop-Escola de Sistemas de Agentes, seus Ambientes e aplicações. Rio Grande - RS 2010.

PETCU, A.; FALTINGS, B. **A scalable method for multiagent constraint optimization**. Proceedings of the 19th international joint conference on Artificial intelligence. Edinburgh, Scotland: Morgan Kaufmann Publishers Inc.: 266-271 p. 2005.

PETROBRAS. Site da Petrobras. 2011. Disponível em: < <http://www.petrobras.com.br> >. Acesso em: Agosto de 2011.

PIDD, M. **Tools for thinking: modelling in management science**. Wiley, 1996. ISBN 9780471964551. Disponível em: < <http://books.google.com.br/books?id=e2UeAQAAIAAJ> >.

POSLAD, S.; BUCKLE, P.; HADINGHAM, R. The FIPAOS agent platform: Open Source for Open Standards. 2000. Disponível em: < <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/summary?doi=10.1.1.146.2570> >.

PU-CHENG, Z.; YU-SHENG, H.; MO-GEN, X. Extended Contract Net Protocol for Multi-Robot Dynamic Task Allocation. **Information Technology Journal**, v. 6, p. 733-738, 2007.

RAO, A. S.; GEORGEFF, M. P. BDI-agents: from theory to practice. Proceedings of the First Intl. Conference on Multiagent Systems, 1995.

RAZA, M. et al. Q-Contract Net: A Negotiation Protocol to Enable Quality-Based Negotiation in Digital Business Ecosystems. Complex, Intelligent and Software Intensive Systems (CISIS), 2010 International Conference on, 2010. 15-18 Feb. 2010. p.161-167.

REKLAITIS, G. Overview of scheduling and planning of batch process operations. In: REKLAITIS, G.; SUNOL, A., et al (Ed.). **Batch Processing Systems Engineering**. Antalya, Turkey: Springer Publications, 1992. p.660-705.

RELVAS, S.; BARBOSA-PÓVOA, A.; MATOS, H. A. Heuristic batch sequencing on a multi-product oil distribution system. **Computers & Chemical Engineering**, v. 33, n. 3, p. 712-730, 2009.

ROHDE, J.; MEYR, H.; WAGNER, M. **Die Supply Chain Planning Matrix**. Darmstadt Technical University, Department of Business Administration, Economics and Law, Institute for Business Studies (BWL), p.10-15. 2000

RUSSELL, S. J.; NORVIG, P. **Artificial intelligence: a modern approach**. Prentice Hall, 2003. ISBN 9780137903955. Disponível em: < <http://books.google.com/books?id=KI2WQgAACAAJ> >.

SANDHOLM, T. An Implementation of the Contract Net Protocol Based on Marginal Cost Calculations. Eleventh National Conference on Artificial Intelligence, 1993. Washington D.C. p.256 - 262.

SANDHOLM, T. W. Distributed rational decision making. In: (Ed.). **Multiagent systems**: MIT Press, 1999. p.201-258. ISBN 0-262-23203-0.

SANDHOLM, T. W. Leveled Commitment Contracts and Strategic Breach. 2001.

SANDHOLM, T. W.; LESSER, V. R. Advantages of a Leveled Commitment Contracting Protocol. Proceedings of the thirteenth national conference on Artificial intelligence, 1995. Portland, Oregon. p.126-133.

SAUER, J.; APPELRATH, H.-J. **Scheduling the Supply Chain by Teams of Agents**. Proceedings of the 36th Annual Hawaii International Conference on System Sciences (HICSS'03) - Track 3 - Volume 3: IEEE Computer Society: 81.1 p. 2003.

SCHILLO, M.; KRAY, C.; FISCHER, K. **The eager bidder problem: a fundamental problem of DAI and selected solutions**. Proceedings of the first international joint conference on Autonomous agents and multiagent systems: part 2. Bologna, Italy: ACM: 599-606 p. 2002.

SEAR, T. N. Logistic Planning in the Downstream Oil Industry. **The Journal of the Operation Research Society**, v. 44, n. 1, p. 9-17, 1993.

SEARLE, J. R. **Speech acts: an essay in the philosophy of language**. Cambridge University Press, 1969. ISBN 9780521096263. Disponível em: < http://books.google.com/books?id=t3_WhfknvFOC >.

SHOHAM, Y.; LEYTON-BROWN, K. **Multiagent systems: algorithmic, game-theoretic, and logical foundations**. Cambridge University Press, 2009. ISBN 9780521899437. Disponível em: < http://books.google.com/books?id=bMR_qScakukC >.

SIMCHI-LEVI, D.; KAMINSKY, P.; SIMCHI-LEVI, E. **Designing and managing the supply chain: concepts, strategies, and case studies**. McGraw-Hill/Irwin, 2003. ISBN 9780072492569. Disponível em: < <http://books.google.com/books?id=SYKYU06odPgC> >.

SMITH, R. G. The Contract Net Protocol: High-Level Communication and Control in a Distributed Problem Solver. **IEEE TRANSACTIONS ON COMPUTERS**, v. 29, n. 12, p. 1104-1113, 1980.

SOUZA, T. C. N. D. **Algoritmo Evolucionário para a Distribuição de Produtos de Petróleo por Redes de Polidutos**. 2010. Departamento de Informática e Matemática Aplicada, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal - Rio Grande do Norte.

SUN, D.; WU, J. Multi-agent Coordination Based on Contract Net Protocol. Intelligent Ubiquitous Computing and Education, 2009 International Symposium on, 2009. 15-16 May 2009. p.353-357.

TA, L.; CHAI, Y.; LIU, Y. **Multi-agent-based Architecture and Mechanism for Coordination and Execution in Agile Supply Chain Operational Management**. Proceedings of the 2005 IEEE International Conference on e-Technology, e-Commerce and e-Service (EEE'05) on e-Technology, e-Commerce and e-Service: IEEE Computer Society: 400-403 p. 2005.

TALUKDAR, S. et al. Asynchronous Teams: Cooperation Schemes for Autonomous Agents. **Journal of Heuristics**, v. 4, n. 4, p. 295-321, 1998. ISSN 1381-1231. Disponível em: < <http://dx.doi.org/10.1023/A:1009669824615> >.

TELECOM ITALIA. Site da Telecom Italia. 2011. Disponível em: < <http://www.telecomitalia.com/tit/en.html> >. Acesso em: 1/11/2011.

TIAN, J. et al. An extended Contract Net Mechanism for Dynamic Supply Chain Formation and Its Application in China Petroleum Supply Chain Management. 2006.

TRANSPETRO. **Transpetro - Relatório Anual**. 2009

TRANSPETRO. Transpetro: A empresa de transporte e logística do Sistema Petrobras. 2010. Disponível em: < <http://www.transpetro.com.br/portugues/empresa/transpetro/transpetro.shtml> >. Acesso em: 11/08/2011.

TUTTE, W. T. **Graph theory**. Cambridge University Press, 2001. ISBN 9780521794893. Disponível em: < <http://books.google.com/books?id=uTGhooU37h4C> >.

VICKREY, W. COUNTERSPECULATION, AUCTIONS, AND COMPETITIVE SEALED TENDERS. **The Journal of Finance**, v. 16, n. 1, p. 8-37, 1961. ISSN 1540-6261. Disponível em: < <http://dx.doi.org/10.1111/j.1540-6261.1961.tb02789.x> >.

VOKŘÍNEK, J. et al. **Competitive Contract Net Protocol**. Proceedings of the 33rd conference on Current Trends in Theory and Practice of Computer Science. Harrachov, Czech Republic: Springer-Verlag: 656-668 p. 2007.

WEISS, G. **Multiagent systems: a modern approach to distributed artificial intelligence**. MIT Press, 1999. ISBN 9780262232036. Disponível em: < <http://books.google.pt/books?id=XQ24QgAACAAJ> >.

WOLFSTETTER, E. Auctions: An Introduction. **Journal of Economic Surveys**, v. 10, n. 4, p. 367-420, 1996. Disponível em: < <http://ideas.repec.org/a/bla/jecsur/v10y1996i4p367-420.html> >.

WOLSEY, L. A. **Integer programming**. Wiley, 1998. ISBN 9780471283669. Disponível em: < <http://books.google.com/books?id=x7RvQgAACAAJ> >.

WOOLDRIDGE, M.; JENNINGS, N. Intelligent Agents: Theory and Practice. **Knowledge Engineering Review**, v. 10, n. 2, p. 115-152, 1995. Disponível em: < <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/summary?doi=10.1.1.55.2702> >.

WOOLDRIDGE, M. J. **An introduction to multiagent systems.** J. Wiley, 2002. ISBN 9780471496915. Disponível em: < <http://books.google.com/books?id=BoEZAQAAIAAJ> >.

WRAY, R. E.; JONES, R. M. An introduction to Soar as an agent architecture. In: SUN, R. (Ed.). **Cognition and Multi-agent Interaction: From Cognitive Modeling to Social Simulation:** Cambridge University Press, 2005. p.53-78.

WRIGHT, G. H. **Norm and action: a logical enquiry.** Humanities, 1963. Disponível em: < <http://books.google.com/books?id=6VMYAAAAIAAJ> >.

WURMAN, P. R.; WALSH, W. E.; WELLMAN, M. P. Flexible double auctions for electronic commerce: theory and implementation. **Decision Support Systems**, p. 17-27, 1998.

ZARANDI, M. H. F.; POURAKBAR, M.; TURKSEN, I. B. A Fuzzy Agent-Based Model for Reduction of Bullwhip Effect in Supply Chain Systems. **Expert Systems with Applications: An International Journal**, v. 34, 2008.

APÊNDICE A - PROPOSTA DE UM MODELO MULTIAGENTE BASEADO EM UM PROTOCOLO DE LEILÕES SIMULTÂNEOS COM ACORDOS PROVISÓRIOS

Este apêndice apresenta a proposta de outro modelo multiagente baseado em um novo protocolo de leilões a ser aplicado ao PPTDP. Este modelo herda muitos conceitos e heurísticas do modelo multiagente apresentado no corpo principal desta tese. Como exemplo, os dois modelos são formados pelos mesmos tipos de agentes (i.e. bases, rotas, modais e gerente) com precisas diferenças em relação às suas estruturas internas. O modelo a ser apresentado neste apêndice também contempla leilões simultâneos que ocorrem incrementalmente em relação aos períodos, sendo que cada leilão consiste na oferta de um único tipo de produto por uma base com a intenção de escoamento.

Entretanto, o protocolo a ser apresentado permite negociações mais iterativas entre os agentes a fim de sanar algumas deficiências do protocolo apresentado anteriormente. O protocolo corrente permite que os envolvidos realizem acordos temporários e que possam desistir de tais acordos assim que surjam melhores oportunidades. Esta prática evita a necessidade de um membro centralizador para priorizar o fechamento de acordos mais satisfatórios a cada participante, uma vez que os próprios participantes podem decidir a qualquer momento sobre a manutenção ou cancelamento de qualquer acordo. Por outro lado, o protocolo corrente demanda mais interações entre os agentes, podendo resultar na elevação do tempo computacional do sistema.

Este apêndice apresenta a proposta conceitual do modelo multiagente e um breve experimento a fim de demonstrar os resultados obtidos com a versão atual da materialização computacional do modelo. Deste modo, o apêndice está organizado em quatro seções: a seção A.1 apresenta os agentes que compõem o modelo, a seção A.2 descreve os conceitos principais do modelo com base no protocolo proposto, a seção A.3 apresenta os resultados preliminares do modelo e por fim, a seção A.4 apresenta as considerações finais.

A.1.PAPÉIS DOS AGENTES

Da mesma forma que no modelo multiagente apresentado no corpo principal da tese, o modelo corrente é composto pelos mesmos quatro tipos de agentes. Estes agentes representam as entidades reais da cadeia produtiva petrolífera, como as bases, rotas e modais e, também o agente gerente responsável pelo gerenciamento de todo o sistema.

Basicamente, o agente gerente é responsável pela leitura e escrita dos arquivos XMLs, controle do início e fim dos leilões em cada período e conseqüentemente responsável pela finalização do sistema. O papel de gerente no modelo atual se difere do papel de gerente do modelo anterior em principalmente dois comportamentos: no modelo corrente, o gerente não recebe candidaturas de bases para realizar leilões e também não realiza o sequenciamento para o fechamento de acordos.

Por sua vez, os agentes bases negociam por meio de leilões a transferência de volumes de produtos. No protocolo, uma entidade base pode assumir tanto o papel de leiloeiro como de participante para um mesmo tipo de produto ou produto diferente. O papel de leiloeiro é exercido por bases com a intenção de escoar um volume de um dado produto para as bases com quem mantém rotas de escoamento. O papel de participante é exercido por bases com a intenção de receber os produtos. Cada base pode suportar um ou mais produtos, os quais geralmente compartilham a capacidade de armazenamento. Para controlar o compartilhamento do espaço entre os produtos de um mesmo grupo, o modelo também define limites operacionais e físicos particulares a cada produto, sendo que tais limites podem ser estáticos ou dinâmicos. Desta forma, o objetivo de cada base é manter a curva de estoque do grupo dentro das respectivas faixas operacionais e as curvas de estoque de cada produto dentro das respectivas faixas físicas do grupo e preferencialmente dentro das respectivas faixas operacionais particulares.

Da mesma forma que no modelo anterior, os agentes arcos também são classificados em ArcoLimitado e ArcoIlimitado. Entretanto, no modelo corrente, os agentes arcos participam mais ativamente dos leilões, principalmente quando estes representam os agentes do tipo ArcoLimitado. Um agente ArcoLimitado tem como atividade principal o gerenciamento de uma agenda de transporte de produtos, podendo autonomamente decidir sobre a aceitação, rejeição ou cancelamento da alocação de capacidade para movimentação de um volume. O ArcoLimitado toma suas decisões com a intenção de priorizar fluxos destinados ao atendimento de participantes com maior urgência de estoque. Neste modelo, a agenda pode suportar uma granularidade temporal configurável, podendo consistir em meses,

semanas ou então qualquer intervalo de dias a fim de gerar um plano mais refinado. Por sua vez, como um agente Arcollimitado apresenta capacidade sempre suficiente para o atendimento das demandas e não há informações precisas sobre suas capacidades individuais, este não adota uma agenda de transporte e por isso é tratado da mesma forma que no modelo anterior.

Por fim, um agente rota atua como intermediário entre um papel de participante e dos agentes arcos nas atividades de movimentação de produtos. Este tipo de agente auxilia os papéis de participante nas comunicações com os agentes arcos principalmente na obtenção de informações sobre o tempo de movimentação e capacidade disponível para transporte e também na persistência da alocação de capacidade quando um participante concretiza ou cancela um acordo.

A.2. MODELAGEM BASEADA NO PROTOCOLO PROPOSTO

Esta seção apresenta a modelagem do PPTDP baseado no novo protocolo de leilões. O protocolo de leilão proposto consiste em uma extensão ao CNet e se inspira na versão estendida do CNet apresentada em (AKNINE et al., 2004). Porém, este protocolo se difere da versão inspiradora pela adoção de uma nova estratégia de negociação e novas interações entre os agentes para melhor adaptação às particularidades do PPTDP.

No protocolo proposto, os papéis de leiloeiro e participantes interagem para a formação de acordos provisórios, os quais podem ser alterados ou cancelados durante as negociações. Estas interações ocorrem de forma cooperativa entre os agentes a fim de alcançar o objetivo global do sistema, ou seja, o atendimento das demandas para cada tipo de produto e com um baixo custo de movimentação.

Os leilões ocorrem simultaneamente dentro do escopo de um período informado pelo gerente. Cada leilão tem início com o envio de um anúncio pelo leiloeiro e tais leilões não são sincronizados uns com os outros, ou seja, os leilões não ocorrem por rodadas bem definidas. Cada participante pode receber vários anúncios de diferentes leiloeiros e para diferentes produtos. Os participantes podem submeter lances a qualquer número de leiloeiros que lhe apresentem ofertas, sendo que mais tarde um participante pode livremente se negar a fechar um acordo, principalmente quando vence mais leilões do que o necessário. Também, um participante pode cancelar um acordo a qualquer momento, principalmente quando vislumbra uma melhor oportunidade com outros leiloeiros. Para atender um novo lance, um leiloeiro também pode cancelar acordos provisórios realizados com outros participantes, levando tais

participantes a submeterem novos lances, inclusive aos leiloeiros com quem se recusaram a realizar acordos em negociações passadas.

As decisões necessárias para encontrar acordos satisfatórios se dividem entre o papel de leiloeiro e participante. O papel de leiloeiro é incumbido de priorizar o atendimento da demanda dos participantes a fim de evitar que estes fiquem sem produtos, independentemente dos custos de movimentação. Neste modelo, é o leiloeiro que define os atributos mais importantes dos fluxos (e.g. volume, dias de saída e chegada), uma vez que supostamente apresenta um conhecimento mais aperfeiçoado para tal. Por sua vez, os participantes são incumbidos de informar aos leiloeiros as suas necessidades dos produtos e outras informações necessárias (e.g. intervalos de dias e de volumes, capacidade de armazenamento e de transporte) para a formação dos fluxos.

Como o leiloeiro geralmente prioriza o atendimento dos participantes com maior urgência de estoque, cada participante deve decidir quais dos fluxos atribuídos devem ser mantidos ou rejeitados a fim de reduzir os seus custos de movimentação. Assim, à medida que um participante vai vencendo os leilões, ele deve optar por manter os fluxos com custos menores e rejeitar os fluxos com custos maiores, tanto que estes continuem atendendo a sua demanda. De acordo com esta estratégia, o processo de solução prioritariamente busca definir movimentações que contemplem as demandas das bases e posteriormente a redução dos custos das movimentações.

No entanto, como o processo de solução envolve múltiplos períodos, pode ocorrer de um acordo considerado satisfatório em um período não o ser em um período posterior. Este caso pode ocorrer principalmente por causa da diferença entre balanços de massa em diferentes períodos. Por exemplo, uma base pode apresentar balanço positivo em um período e negativo em outro. Assim, uma base pode decidir escoar um volume em um período e tentar adquirir o volume necessário em um período seguinte, mas a mesma pode não obter sucesso nesta aquisição. Deste modo, quando uma base não apresenta mais oportunidades para escoamento e nem mesmo de recebimento de um dado produto em um período e ainda não apresenta um nível de estoque adequado, ela precisa ter a chance de cancelar certas movimentações realizadas indevidamente em períodos anteriores.

Para melhor atender esta estruturação do problema em termos de períodos, a estratégia utilizada consiste na resolução incremental e combinada dos períodos. Em outras palavras, as negociações ocorrerão normalmente por período, mas quando as negociações de um período finalizam, uma fase de resolução combinada de períodos é iniciada, ou seja, o

período corrente é resolvido juntamente com os períodos anteriores, quando houver, como se fossem um único período. Esta prática ajuda a corrigir movimentações indevidas realizadas em períodos anteriores. Assim, após a resolução combinada dos períodos, o período seguinte, quando houver, é resolvido normalmente de forma independente. Quando este é finalizado, ele é integrado aos períodos anteriores para formar um único período agregado. Este processo continua até todos os períodos estarem resolvidos.

Os leilões também envolvem a participação dos agentes rotas e arcos, os quais influenciam diretamente nas decisões dos participantes e leiloeiros. Quando uma rota é notificada por um participante, ela pode atuar para resolver duas situações de conflito: a) conflito pela alocação de um arco compartilhado com outras rotas e b) conflito entre os produtos de um grupo para alocação de sua capacidade de transporte. Estes conflitos são resolvidos por meio da comunicação entre a rota e seus respectivos agentes arcos. A rota informa aos arcos a urgência do participante para receber o produto em leilão e por meio da comparação deste valor com as demais solicitações recebidas, o arco decide sobre a alocação de sua capacidade para o atendimento do participante e também sobre os produtos a serem movimentados entre aqueles demandados pelo participante.

A estrutura principal do protocolo de leilões proposto está ilustrada na Figura 80 na forma de um diagrama de sequência. O protocolo é composto por um conjunto de interações particulares, as quais serão melhores explicadas no decorrer desta seção. Neste sentido, as interações, estruturas e semânticas das mensagens, bem como os comportamentos internos dos agentes durante as negociações, serão descritas fazendo menção à aplicação do protocolo na modelagem do PPTDP. O protocolo também envolve algumas interações adicionais necessárias para a inicialização e finalização do sistema. Assim, o protocolo e consecutivamente o modelo multiagente serão descritos nas próximas subseções de acordo com as seguintes fases: a) fase de inicialização dos agentes, b) fase de preparação e envio do anúncio, c) fase de concepção e envio dos lances, d) fase de seleção dos lances vencedores, e) fase de confirmação, f) fase de concretização do acordo, g) fase de cancelamentos de acordos e por fim, h) a fase de finalização do sistema.

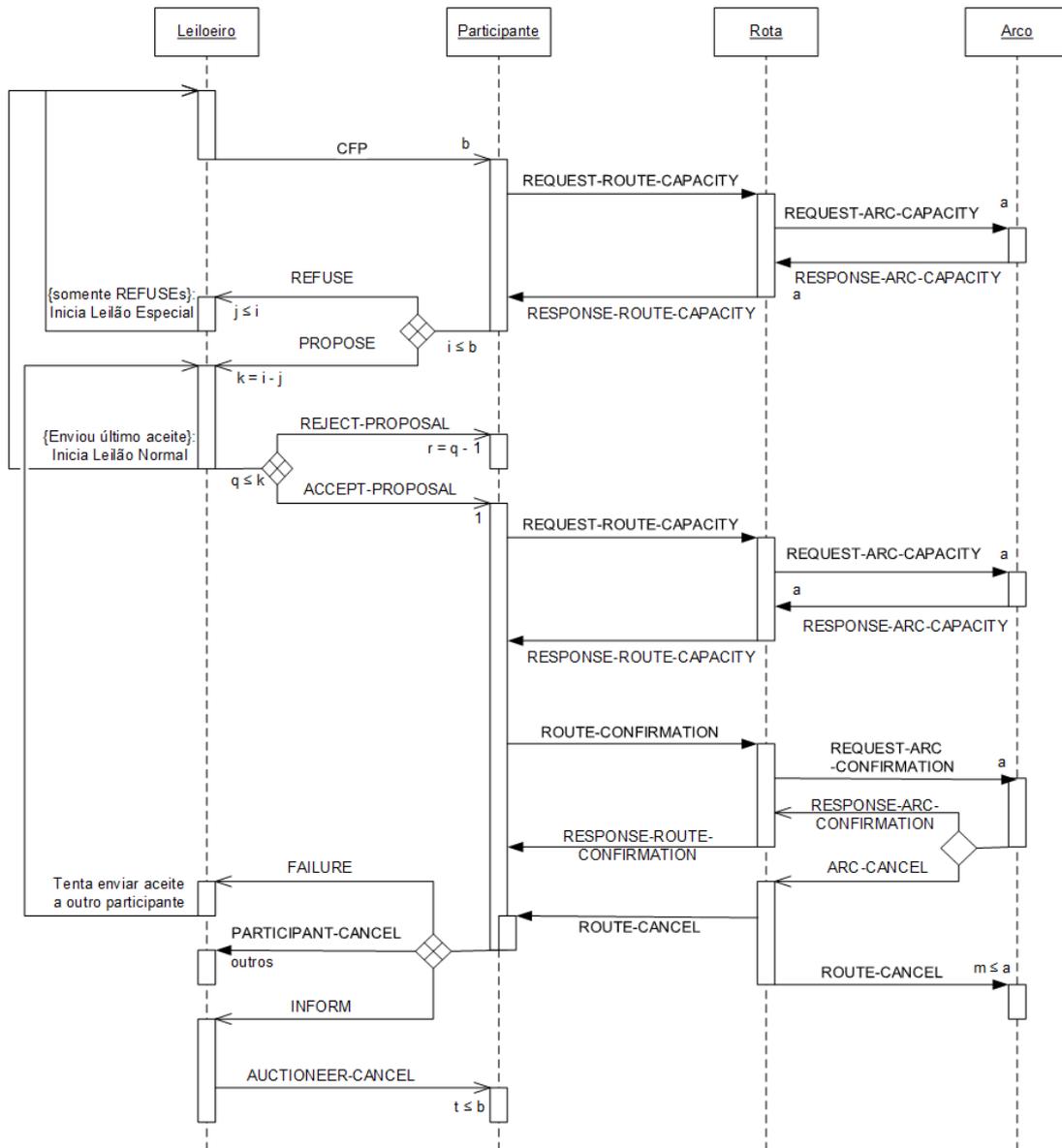


Figura 80 – Protocolo Interativo com Acordos Provisórios

A.2.1. Fase de Criação e Inicialização dos Agentes

O primeiro agente a ser criado no modelo consiste no agente gerente. Em sua criação, ele é informado sobre a localização do arquivo de dados de entrada (i.e. XML de Entrada) para leitura e o local para persistir o arquivo de saída (i.e. XML de saída) com o resultado do planejamento. A partir dos dados de entrada, o gerente cria os agentes componentes do cenário de planejamento e aguarda por uma confirmação destes agentes. A interação do gerente com os agentes criados é apresentada na Figura 81. Esta interação se difere pontualmente da fase de inicialização do protocolo apresentado no capítulo 4, uma vez que o protocolo corrente não exige que as bases se candidatem com o gerente para a realização de leilões.

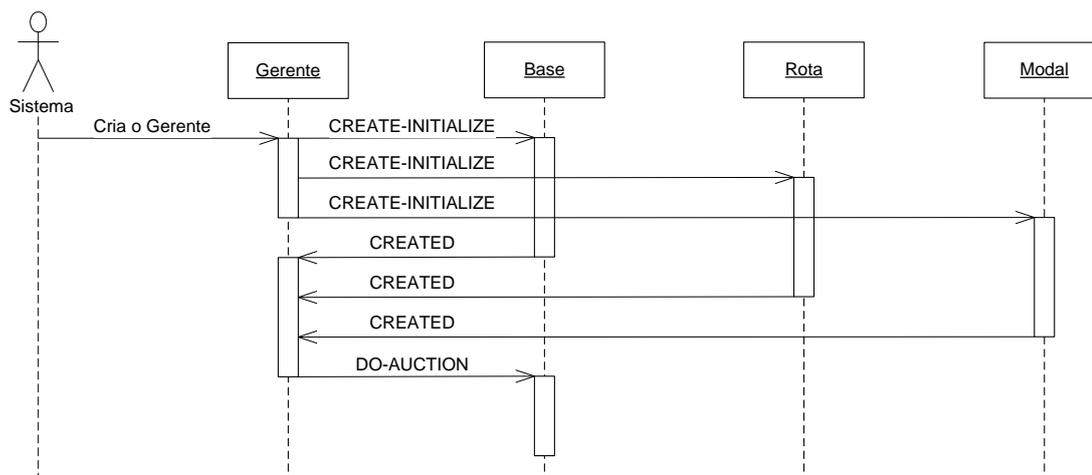


Figura 81 – Inicialização e Criação dos Agentes

No processo de criação dos agentes, o gerente envia uma mensagem CREATE-INITIALIZE aos agentes com os dados comuns a todos os agentes (e.g. quantidade de períodos, número de dias de cada período, composição de cada grupo de produto) e particulares para cada tipo de agente correspondente. Os dados particulares referem-se aos atributos descritivos das entidades reais (e.g. limites operacionais e físicos, balanço) apresentados na seção 2.3 e aos fluxos em trânsito, comprometidos ou inter-região, quando for o caso.

As informações contidas nestes fluxos são usadas para atualização dos atributos internos dos agentes, principalmente das curvas de estoque (no caso das bases) e agenda de transporte (no caso dos modais). Os fluxos que serão objetos de acordo em leilões também devem ser contemplados pelos agentes. Mesmo que os leilões ainda não tenham sido iniciados, é preciso que cada agente crie uma estrutura a ser usada para armazenar internamente estes fluxos. Por causa da natureza provisória dos acordos, esta estrutura pode ser vista como uma espécie de memória para acordos passados e permitirá que o agente avalie tais acordos em negociações futuras para decidir sobre a viabilidade de manutenção de alguns diante de novas oportunidades.

Para que um leiloeiro vivencie novas oportunidades de acordo, um volume alocado provisoriamente a um participante deve continuar sendo oferecido a outros participantes. Assim, caso um leiloeiro receba uma melhor proposta pelo volume de um fluxo, ele pode desfazer o acordo referente a este fluxo e atribuir provisoriamente o respectivo volume para o participante que enviou a proposta mais vantajosa. Da mesma forma, um participante com alguns fluxos atribuídos provisoriamente, pode visualizar novas oportunidades de negociação com outros leiloeiros e decidir por desfazer certos acordos passados e obter novos fluxos com outros leiloeiros. Portanto, tanto os leiloeiros como os participantes precisam armazenar os

seus fluxos enviados e recebidos, respectivamente. Da mesma forma, os agentes do tipo ArcoLimitado também precisam armazenar os seus fluxos para permitir certos cancelamentos futuros. Neste caso, um fluxo pode ser cancelado para possibilitar uma movimentação para outro participante com maior urgência de estoque.

Quando os agentes inicializam as suas estruturas de dados internas, eles respondem com uma mensagem de `CREATED` para o gerente como uma forma de confirmar o sucesso da criação e inicialização dos dados. Quando o gerente recebe todas as mensagens de confirmação dos agentes criados, ele passa para a fase de autorização de início dos leilões. Nesta fase, o gerente envia a mensagem `DO-AUCTION` para todos os agentes bases. Esta mensagem autoriza as bases a iniciarem os leilões para o primeiro período de planejamento, sendo que a informação sobre o período está inserida no conteúdo da mensagem. Ao receber a mensagem, cada agente base analisa a situação de suas curvas de estoque para cada produto e decide sobre os produtos que podem ser leiloados. Como resultado desta análise, uma base pode decidir iniciar nenhum, um ou vários leilões simultaneamente, um leilão para cada tipo de produto.

A.2.2. Fase de Preparação do Anúncio

Nesta fase, após a definição de quem fará leilão para um dado produto, o leiloeiro deve executar um conjunto de passos a fim de preparar o respectivo anúncio. Estes passos são representados graficamente na Figura 82 em forma de um diagrama de estados e são descritos brevemente por possuir grande similaridade com a forma de concepção de anúncios descrita no modelo anterior.

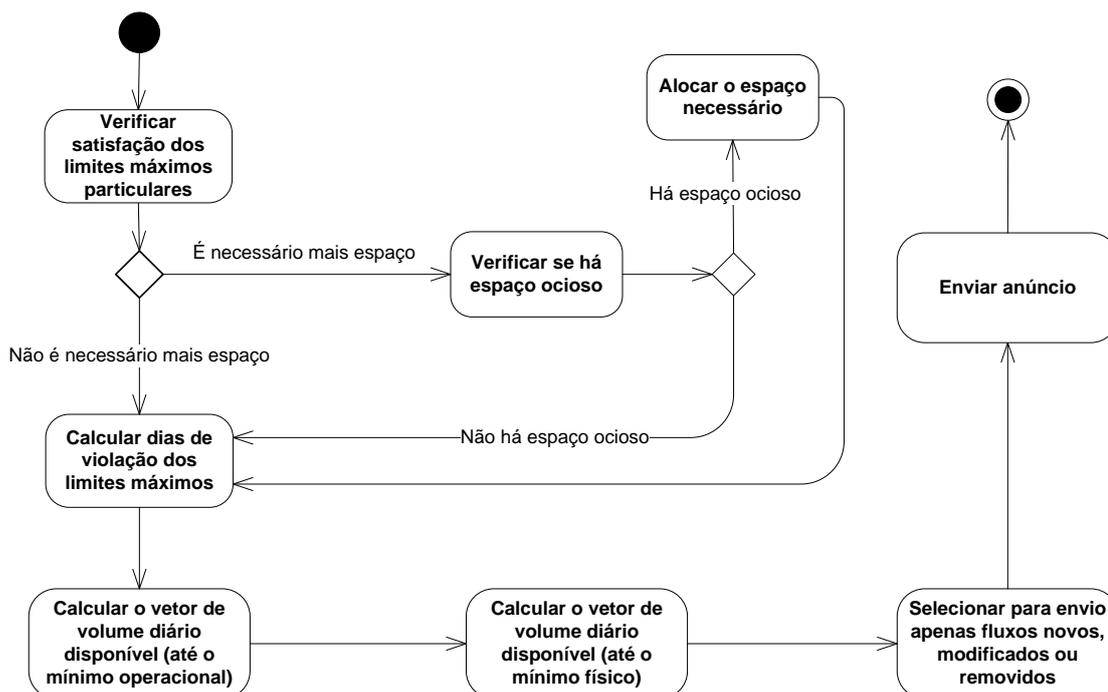


Figura 82 – Etapas do Processo de Preparação do Anúncio

Antes de iniciar um leilão para um produto, o leiloeiro deve verificar se a curva de estoque do produto respeita diariamente os limites operacionais e físicos dinâmicos estabelecidos. Caso seja necessário, o leiloeiro tenta alavancar tais limites nos dias violados, quando houver capacidade ociosa suficiente no tanque compartilhado.

Após esta etapa, o leiloeiro prossegue com a preparação do anúncio. Basicamente, um anúncio informa aos participantes o produto a ser leiloadado, o período corrente, os dias de violação da curva de estoque do produto em relação aos limites dinâmicos e o volume diário disponível deste produto no período corrente. O leiloeiro informa o volume disponível para escoamento por meio de três diferentes estruturas de dados lineares, ou seja, por meio de três vetores. A estrutura básica de um anúncio é apresentada na Figura 83, sendo que esta estrutura se difere do modelo anterior pela inclusão do vetor de fluxos.

Anúncio							
Produto = GLP							
Período = 1							
Dia de Violação do Limite Operacional Máximo = 6							
Dia de Violação do Limite Físico Máximo = 7							
Vetor Operacional	0	10	20	30	40	50	60
Vetor Físico	10	10	10	10	10	10	10
Dias	1	2	3	4	5	6	7
Fluxos	--	--	--	--	--	--	--

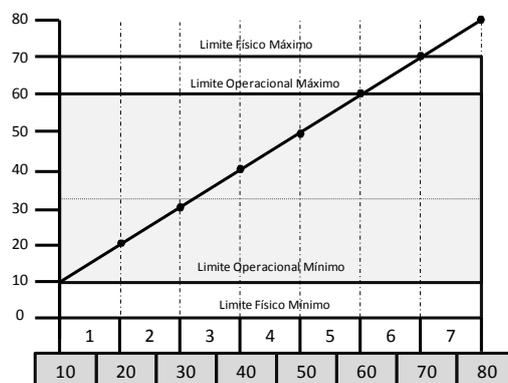


Figura 83 – Estrutura de um Anúncio com o Vetor de Fluxos

A primeira e a segunda estrutura referem-se respectivamente ao vetor operacional e vetor físico. Estes vetores são formados em conformidade com a prática apresentada na seção 4.2.4, inclusive com a reoferta de volumes não escoados em períodos anteriores devido à forma incremental de resolução do problema em termos de períodos. A terceira estrutura consiste no vetor de fluxos já escoados (provisoriamente) pelo leiloeiro, ou seja, fluxos objetos de acordos realizados em leilões passados e que ainda estão ativos (i.e. não foram cancelados).

Quando um leiloeiro escoar um produto, ele decrementa o respectivo volume da curva de estoque do produto. Por isso, devido à natureza provisória dos acordos, os fluxos escoados também devem ser ofertados no anúncio para que os participantes estejam cientes da disponibilidade destes volumes. Assim, a curva de estoque em um determinado tempo refere-se à diferença entre a curva de estoque inicial e os fluxos de movimentação realizados até aquele momento. No exemplo da Figura 83, a respectiva curva de estoque ainda está em seu estado inicial e por isso não há fluxos resultantes. Porém, com o início dos leilões e prováveis movimentações, o vetor passará a incluir alguns fluxos previamente alocados (de forma provisória) a certos participantes.

No modelo, um fluxo pode ser classificado em dois tipos: normal e de ajuda. Um fluxo do tipo normal é formado pelo leiloeiro quando o participante vencedor apresenta interesse na aquisição do produto para satisfação de sua demanda. Por sua vez, um fluxo de ajuda é formado quando o participante está satisfeito para o produto, mas se encontra em desequilíbrio de estoque com o leiloeiro, ou seja, o estoque do leiloeiro está violando algum limite máximo e o estoque do participante se apresenta em níveis mais inferiores.

O volume referente a um fluxo deve ser representado de uma forma especial a fim de identificar de qual vetor de anúncio (operacional ou físico) ele é originário ou então as parcelas originadas de cada vetor. Se houver tal identificação, quando um fluxo com parcelas obtidas de ambos os vetores for ofertado em um leilão, um participante que não está apto a gerar um lance para todo o volume (originado dos vetores operacional e físico) por não apresentar urgência de estoque suficiente para tal, apenas realizará o lance para o volume referente ao vetor operacional. No fluxo também consta uma estrutura de dados que define os dias de produção do respectivo volume a fim de permitir o reestabelecimento da curva de estoque do leiloeiro caso o fluxo seja posteriormente cancelado.

Para evitar que o mesmo fluxo seja enviado redundantemente em cada novo anúncio, considera-se que os participantes armazenam cópias destes fluxos. Com isso, o vetor de fluxos

em um anúncio é composto apenas por fluxos recém-criados, atualizados (e.g. mudança de volume, data de saída ou chegada) ou removidos. Ao receber tais fluxos de um leiloeiro, cada participante atualiza o seu repositório de cópias de fluxos pertinentes ao dado leiloeiro. O armazenamento destas informações contribui para a redução do tamanho das mensagens de anúncio e ainda permite que o participante possa avaliar tais fluxos a qualquer momento com a intenção de enviar um lance, principalmente quando tem algumas de suas movimentações canceladas.

Após a concepção do anúncio, o leiloeiro envia o CFP para as bases com quem mantém rota para escoamento do dado produto. Então, o leiloeiro aguarda por todos os lances dos participantes ou até um determinado *deadline*. Neste modelo, o leiloeiro tem a responsabilidade de criar os fluxos para os participantes visando um aumento do volume nos fluxos, atendimento satisfatório das demandas dos participantes e outras particularidades pertinentes aos novos requisitos do problema (i.e. movimentação concomitante de múltiplos produtos e respeitos aos lotes típicos e máximos).

A.2.3. Fase de Concepção do Lance

Ao receber um CFP, um participante deve realizar uma sequência de etapas para a preparação do lance. Como o papel de leiloeiro é o responsável pela criação dos fluxos, que envolve a decisão sobre os dias de saída, chegada e tamanho do volume, o participante precisa enviar algumas informações para guiar a tomada de decisão do leiloeiro. Neste sentido, o participante forma um lance com um intervalo de volume e intervalos de dias desejados e capacidades de recebimento, a fim de que tais atributos sejam respeitados pelo leiloeiro. Mesmo assim, o participante também informa um valor preferencial dentro do intervalo para ser desejosamente atendido. Este volume corresponde ao menor volume possível para levar à satisfação de estoque, ou seja, para manter o estoque exatamente nos limites mínimos particulares.

As etapas para a formação do lance estão descritas nas duas seguintes subseções. A subseção A.2.3.1 apresenta as decisões anteriores e posteriores à escolha da rota a ser utilizada para a possível movimentação do produto. Por sua vez, a subseção A.2.3.2 descreve sobre as decisões para a escolha da rota.

A.2.3.1. Decisões anteriores e posteriores à escolha da rota

As etapas mais gerais que antecedem e sucedem às decisões mais intrínsecas à escolha da rota são apresentadas na forma de um diagrama de estados na Figura 84. Conforme a figura, o participante primeiramente precisa atualizar a sua estrutura de armazenamento com as informações dos fluxos encontradas no anúncio. Estes fluxos podem se referir a movimentações realizadas pelo próprio participante com o corrente leiloeiro ou movimentações deste leiloeiro com outros participantes. Na sequência, o participante precisa verificar se é necessário aumentar os seus limites dinâmicos, uma vez que sua curva de estoque pode estar extrapolando tais limites. Caso haja capacidade de armazenamento ociosa, o participante aloca esta capacidade elevando os respectivos limites dinâmicos.

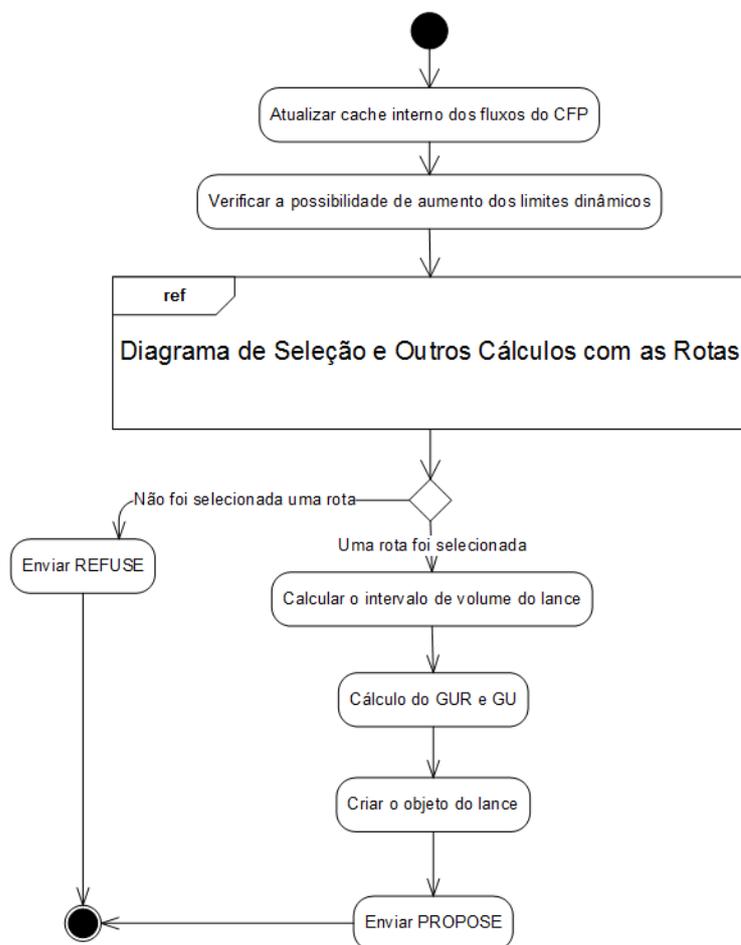


Figura 84 – Etapas gerais do Processo de Preparação do Lance

Após a execução destas etapas, o participante segue para a definição da rota a ser utilizada para a formação do fluxo, priorizando as rotas de menor custo. Em resumo, o participante experimenta as rotas uma após a outra até encontrar uma que satisfaça as

restrições e que preferencialmente permita a formação de um fluxo factível ou então a formação de um fluxo infactível com menor intervalo de atraso. As particularidades a respeito da seleção da rota e cálculos relacionados serão apresentadas na subseção A.2.3.2.

Caso nenhuma rota seja selecionada, o participante enviará uma mensagem de REFUSE ao leiloeiro, caso contrário, continuará na execução das etapas para a formação de um PROPOSE. Neste modelo, como é o papel do leiloeiro criar os fluxos de movimentação, o participante somente precisa enviar as informações necessárias para auxiliar o leiloeiro nesta tarefa. Neste sentido, o participante envia um intervalo de volume para que o leiloeiro possa decidir, ao analisar também as necessidades dos demais participantes, sobre o volume a ser atribuído ao fluxo do acordo.

Este intervalo é formado por três valores: o volume mínimo, o volume preferencial e o volume máximo. O volume mínimo consiste exatamente ao lote mínimo da rota. O volume preferencial corresponde ao volume que o participante realmente deseja e o volume máximo corresponde ao volume máximo que o participante pode receber para ainda se manter em equilíbrio de estoque com o leiloeiro. Estes atributos podem ser facilmente adaptáveis para situações que demandam o suporte aos novos tamanhos de lotes, ou seja, lote mínimo, lote típico e lote máximo.

Na sequência, o participante precisa calcular o atributo grau de urgência da rota (GUR). Este atributo é calculado da mesma forma que no modelo anterior. Porém, a diferença está no envio de um valor único de grau de urgência (GU) para guiar as decisões do leiloeiro. Este valor é obtido pela multiplicação entre os atributos GUR e GUE (também calculado da mesma forma como no modelo anterior). O atributo resultante GU tem a intenção de facilitar a percepção do leiloeiro sobre as urgências de recebimento pelos participantes. Por exemplo, caso o valor de GUE seja zero, significa que o respectivo participante pode estar com a demanda satisfeita, caso o GUR seja zero, significa que tal participante pode conseguir um volume ainda alto, em virtude de suas demandas, com os outros leiloeiros. Nestes casos, o leiloeiro priorizaria o atendimento dos participantes que ainda apresentam urgência de atendimento ou então, caso nenhum esteja com urgência e ainda haja desequilíbrio de estoque, o leiloeiro priorizaria aqueles com menores custos.

Ainda, o participante também informa no lance os volumes que podem adquirir com os outros leiloeiros com custos mais reduzidos do que os fluxos temporariamente já obtidos. Este atributo é importante para a resolução de conflitos na atribuição e cancelamento de fluxos realizados pelo leiloeiro. Por fim, caso o participante tenha obtido sucesso na

composição do fluxo para o leiloeiro corrente, ele procede com o envio do lance por meio de uma mensagem de PROPOSE e caso contrário, informará o leiloeiro sobre sua decisão de não participar do leilão por meio de uma mensagem de REFUSE.

A.2.3.2. Decisões relacionadas à escolha da rota

Para a concepção de um fluxo, o participante precisa selecionar uma rota. É a responsabilidade do papel de participante selecionar e comunicar com as rotas para não sobrecarregar o papel de leiloeiro. O participante prioriza a escolha da rota de menor custo e que possibilite a formação de um fluxo factível. Para tanto, o participante analisa sequencialmente as rotas, em forma crescente de custo de movimentação, até encontrar uma que melhor satisfaça esta condição. O processo de análise da rota e cálculos relacionados está apresentado na Figura 85.

Na análise de uma rota, o participante primeiramente obtém o tempo médio de transporte para movimentar o produto desde o leiloeiro. Com esta informação, ele consegue obter uma melhor precisão na análise dos vetores de anúncio em virtude dos possíveis dias de recebimento. Mesmo que o papel de leiloeiro seja o responsável pela definição dos dias de saída e volume de um fluxo, o participante analisa os vetores de anúncio para formar janelas de tempo no intuito de poupar esforços do leiloeiro. Desta forma, o participante calcula janelas de tempo particulares para cada vetor de anúncio do leiloeiro. Estas janelas mais particulares derivam da janela de tempo dita inicial, a qual define um intervalo de dias para saída do produto da base leiloeira a fim de ser entregue exatamente nos dias do período corrente no participante.

Na sequência, o participante precisa calcular o dia em que a curva de estoque viola os limites operacional e físico mínimos. No entanto, este cálculo depende de certas modificações na curva de estoque corrente do produto, uma vez que tal curva pode estar incrementada por volumes de fluxos com custos superiores ao custo da rota corrente e mesmo por fluxos de nenhum interesse subjetivo ao participante, ou seja, fluxos de ajuda ao leiloeiro. Assim, alguns volumes destes fluxos precisam ser temporariamente omitidos da curva de estoque para verificar os reais dias de violação dos limites mínimos. Provavelmente, caso o participante chegue a vencer o leilão corrente, estes fluxos mais caros ou de ajuda são fortes candidatos a cancelamentos.

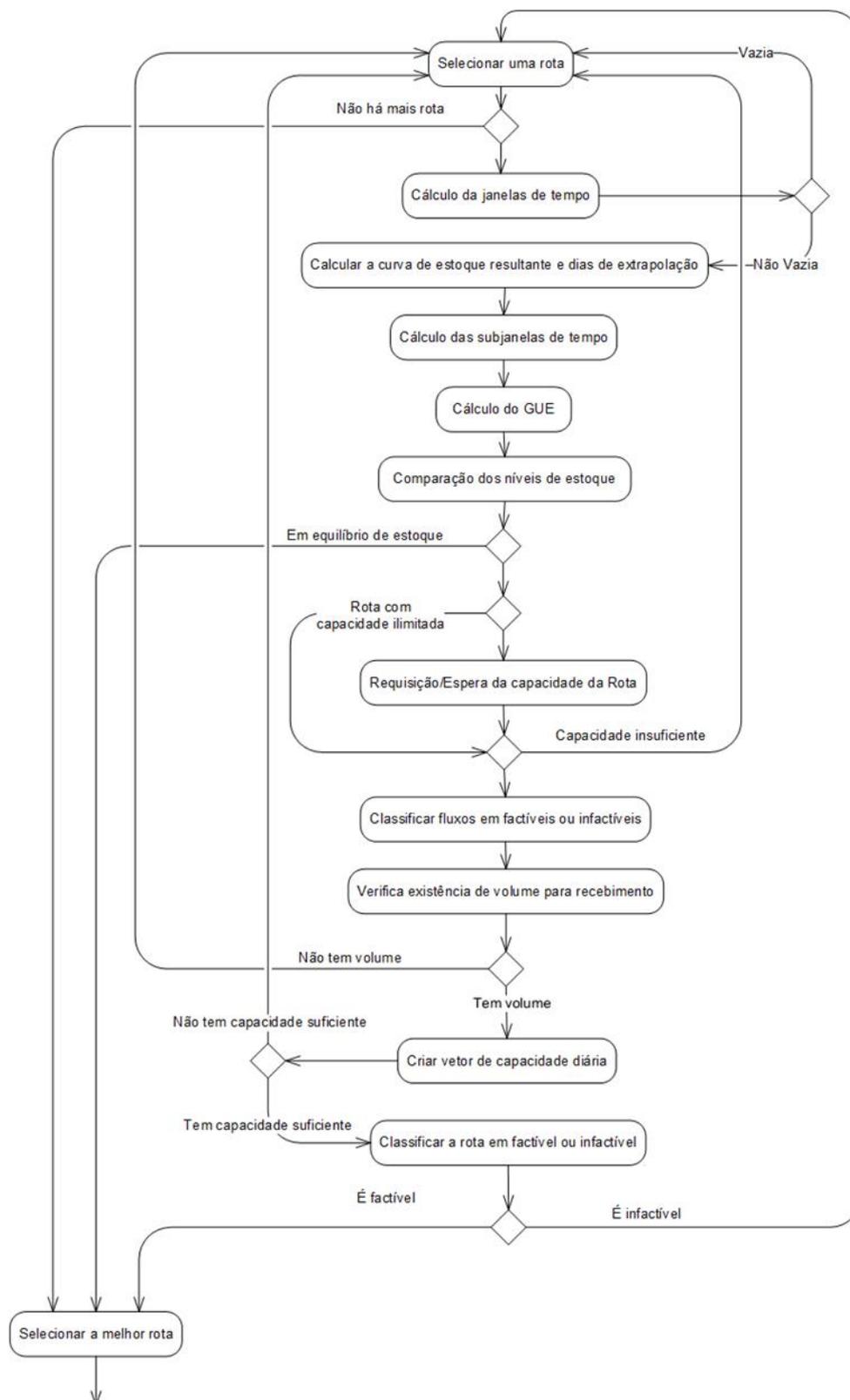


Figura 85 – Etapas Relacionadas à Seleção da Rota

No entanto, se faz necessário considerar algumas particularidades na omissão destes fluxos. Um fluxo somente pode ser omitido caso sua omissão não resulte na violação dos limites mínimos em dias anteriores ao dia mais prévio possível de recebimento de um volume

mínimo do leiloeiro corrente. Ademais, como o participante ainda não conhece o real dia de chegada do fluxo objeto de acordo com o leiloeiro corrente, o dia mais prévio de chegada pode não ser o escolhido pelo leiloeiro. Assim, caso o participante chegue a vencer o corrente leilão e o dia de chegada do fluxo for realmente mais posterior, ele poderá concluir que alguns fluxos omitidos no momento da criação do lance, são de suma importância para a satisfação das demandas. Nesta situação, o próprio participante bloqueia tais fluxos para que não sejam erroneamente omitidos nos próximos leilões. Certamente, tal prática também contribui para aumentar a precisão do cálculo dos dias de violações dos limites mínimos e consequentemente, dos valores de urgência.

Na sequência, o participante faz uso dos dias de violação recém-calculados para subdividir as janelas de tempo dos vetores operacional e físico, anteriormente calculadas, em subjanelas factíveis e infactíveis. Esta subdivisão da janela auxilia o leiloeiro no processo da definição do dia de escoamento do fluxo a fim de formar um fluxo preferencialmente factível.

Os dias de violação calculados também são utilizados para calcular o valor de GUE conforme as mesmas orientações do modelo anterior. No entanto, como o cálculo do GUE é dependente do dia de chegada do fluxo no participante e como o fluxo ainda é uma incógnita, o participante faz uso do dia de chegada mais prévio possível calculado a partir dos vetores de anúncio recebidos. Esta prática incentiva disputas pelo estoque do leiloeiro disponível em dias mais prévios.

Caso o valor de GUE calculado seja zero, isto é, o participante esteja satisfeito para o produto, as omissões dos fluxos na curva de estoque precisam ser revistas para que a mesma seja utilizada de forma mais adequada posteriormente no cálculo da capacidade de armazenamento do participante. Neste caso, os fluxos de ajuda são reinseridos na curva de estoque, pois o lance a ser enviado só poderá resultar na concepção de outro fluxo de ajuda, em caso de junção de fluxos.

Na etapa seguinte, o participante calcula os seus níveis de estoque do produto e grupo a fim de realizar a verificação de equilíbrio de estoque com o leiloeiro. Caso o participante e leiloeiro já estejam em equilíbrio de estoque, o participante não avalia as demais rotas e prossegue para o envio do REFUSE, uma vez que qualquer diferença nos atributos das rotas não modifica este estado de equilíbrio. Caso o equilíbrio ainda não tenha sido encontrado, o participante continua a avaliação da rota.

Neste ponto, o participante verifica a necessidade de comunicação com a rota para saber a sua capacidade de movimentação no período corrente. O participante somente

comunica com a rota caso ela possua arcos com capacidade limitada, ou seja, dutos. Caso contrário, não há necessidade de tal comunicação.

Conforme o protocolo, o participante solicita a capacidade ao respectivo agente rota por meio de uma mensagem de REQUEST-ROUTE-CAPACITY. Esta mensagem carrega unicamente a informação sobre o período corrente e o valor do GUE do participante. Por sua vez, o agente rota comunica-se com cada agente arco para obter as respectivas capacidades de transporte. A rota envia uma mensagem de REQUEST-ARC-CAPACITY para cada arco, repassando as informações recebidas do participante.

Como particularidade deste modelo, os agentes arcos priorizam o atendimento de rotas, e consequentemente de participantes, que apresentam maior GUE. Desta forma, caso um arco não apresente capacidade ociosa, ele omite os fluxos com valores de GUE menores do que o informado pela rota a fim de calcular sua capacidade. Estes fluxos omitidos ainda não são cancelados pelo arco, uma vez que o respectivo participante pode não vencer o leilão que participa. Por isso, um arco apenas pode cancelar fluxos quando tiver certeza de que a movimentação irá ocorrer, ou seja, somente quando o participante fechar um acordo com o leiloeiro.

Ao calcular as informações solicitadas, o arco responde à rota por meio de uma mensagem de RESPONSE-ARC-CAPACITY. Finalmente, quando a rota obtém as informações necessárias de todos os arcos, ela envia a resposta ao participante por meio de uma mensagem de RESPONSE-ROUTE-CAPACITY. Com posse da capacidade de transporte da rota, o participante verifica se tal capacidade pelo menos satisfaz a restrição de lote mínimo da rota. Caso contrário, ele partirá para a análise de outra rota, se houver.

Se a capacidade da rota for suficiente, então o participante inicia a análise e classificação dos fluxos ofertados pelo leiloeiro. Estes fluxos são analisados em termos de valores de GUE e custo. Mais precisamente, quando um participante apresenta um GUE superior a de um fluxo do leiloeiro, o participante tem maior prioridade em uma disputa por este volume, sendo que os leiloeiros sempre priorizam o atendimento de participantes com maior urgência. Da mesma forma, quando o participante apresenta um custo menor do que o atual detentor do fluxo, ele também tem a possibilidade de disputar o volume do fluxo com o atual detentor do fluxo. Porém, neste caso, mesmo que um participante esteja apto a concorrer a tal volume, a alocação final deste fica condicionada a uma avaliação posterior do leiloeiro. Mais precisamente, o participante com menor custo apenas terá preferência pelo volume se o

atual detentor do fluxo apresentar outras oportunidades com outros leiloeiros para obter o produto. Esta possibilidade de interação incentiva reduções globais dos custos de transporte.

Deste modo, o participante envia ao leiloeiro os identificadores dos fluxos que pretende concorrer em termos de GUE e em termos de custo. Para poupar esforços do leiloeiro, estes identificadores são enviados separadamente em subestruturas de fluxos factíveis e infactíveis. Estas subestruturas possuem a mesma utilidade das subjanelas dos vetores de anúncio operacional e físico. Com a informação de tais fluxos, o leiloeiro, durante o processo de atribuição de volumes aos participantes, poderá analisar a possibilidade de cancelar certos fluxos dos atuais participantes detentores a fim de direcioná-los total ou parcialmente para o participante vencedor do leilão corrente.

Ainda, neste processo de avaliação dos fluxos do anúncio, o participante também verifica se ele próprio é o atual vencedor de alguns fluxos oferecidos pelo leiloeiro. De forma semelhante, os identificadores dos fluxos obtidos como leiloeiro no período corrente e transportados pela mesma rota em análise, são também enviados no lance. Esta informação auxilia o leiloeiro na tarefa de junção de fluxos.

Com a análise destes fluxos, o participante finaliza a avaliação dos três vetores de anúncio. Com isso, ele já pode calcular um volume máximo factível que ele pode adquirir com o corrente leiloeiro. Se este volume não satisfizer a restrição de lote mínimo da rota, o participante passa a analisar a rota seguinte, se houver.

Caso exista a possibilidade do participante receber um volume factível mínimo com o leiloeiro pela rota em análise, ele passa a calcular a capacidade de armazenamento operacional e física. Como é o leiloeiro quem define o dia de saída/chegada e volume de um fluxo, se faz necessário ele saber quanto cabe diariamente no participante para não enviar um volume maior do que sua capacidade. Neste sentido, as duas capacidades são calculadas e enviadas ao leiloeiro em forma de uma estrutura de dados linear a fim do leiloeiro decidir sobre o uso da capacidade mais apropriada para a formação do fluxo. O leiloeiro age de forma colaborativa com o participante, priorizando o uso da capacidade operacional. O leiloeiro somente fará uso da capacidade física do participante quando for necessário evitar a formação de um fluxo infactível. Também, quando um participante não apresenta interesse na alocação de sua capacidade física, este pode omitir a informação sobre esta capacidade.

As capacidades calculadas ainda podem ser restringidas pela capacidade de transporte da rota seleccionada, uma vez que é a responsabilidade do participante controlar tal recurso. Pode acontecer da capacidade de armazenamento ser maior do que a capacidade da

rota, devendo a capacidade informada ser restringida para satisfazer a capacidade de transporte. Para poupar esforços do leiloeiro, que não deve se preocupar com as particularidades das rotas, o participante cria as estruturas de capacidades diárias com os índices se referindo aos prováveis dias de saída do leiloeiro, considerando para isso, o tempo de transporte da rota.

Antes de enviar os vetores de capacidade, o participante analisa se há capacidade para armazenar pelo menos o lote mínimo da rota ou então, para um volume menor, mas que haja a possibilidade de junção com um fluxo já existente entre o participante e o leiloeiro, que certamente já satisfaz a restrição de lote mínimo. Caso a capacidade seja insuficiente, o participante passa a analisar outra rota que apresente um lote mínimo menor ou tempo de transporte mais longo, se houver. Certamente, quando mais tarde um produto for entregue no participante, maior é a possibilidade de existência de capacidade de armazenamento ociosa. No entanto, caso a capacidade seja suficiente, então o participante prossegue com o cálculo da proposta.

Por fim, o participante classifica a rota avaliada de acordo com a possibilidade de formação de um fluxo factível ou infactível. O participante analisa as subjanelas de tempo dos vetores de anúncio. Se a soma dos volumes disponíveis nas subjanelas factíveis for maior do que o lote mínimo da rota ou haja possibilidade de junção de fluxos, a rota é classificada como factível. Neste caso, o participante considera a rota atual como a selecionada para continuação da formação da proposta. Caso contrário, a rota é classificada como infactível e o participante passa a analisar a rota seguinte, se houver. Como resultado deste processo, o participante seleciona a rota infactível com menor atraso na entrega em relação ao dia de violação, pela curva de estoque, do limite mínimo operacional particular do produto.

A.2.4. Fase de Definição do Lance Vencedor

Normalmente, o leiloeiro inicia o processo de definição do lance vencedor quando recebe todos os lances ou quando expira o deadline do leilão. O leiloeiro pode receber lances de propostas ou de recusas. Conforme o tipo de lance recebido, o leiloeiro age de forma diferente. Neste sentido, a subsecção A.2.4.1 descreve o tratamento de lances de propostas e a subsecção A.2.4.2 descreve o tratamento de lances de recusas.

A.2.4.1. Tratamento de propostas

Cada lance de proposta recebido apresenta um conjunto de atributos (e.g. intervalo de volume e janelas de tempo) que restringe as escolhas do leiloeiro para a formação de um fluxo e outros que guiam o leiloeiro na resolução de conflitos (e.g. GU e custo) entre os participantes. Por meio da análise dos atributos de todas as propostas recebidas, o leiloeiro busca distribuir o seu estoque a fim de satisfazer as demandas de todos seus participantes.

No papel de leiloeiro, a estratégia envolvida consiste em não garantir exclusividade de atendimento para o participante com maior urgência, mas na avaliação das necessidades de todos os participantes a fim de melhor equilibrar a distribuição de seu estoque entre estes participantes. Na verdade, o leiloeiro primeiramente analisa todos os fluxos para descobrir o nível de estoque (e.g. abaixo do mínimo físico, abaixo do mínimo operacional) mais baixo entre os participantes. Então, ele seleciona apenas os lances cujos participantes apresentem curvas de estoque em tal nível. Desta forma, o leiloeiro busca reservar parcelas de seu estoque para o atendimento de cada um dos participantes referidos em tal subconjunto e conseqüentemente, atribuir tais parcelas a tais participantes em forma de fluxos.

Conforme o modelo, cada participante apresenta autonomia para aceitar ou rejeitar o fluxo concebido. Isto pode ocorrer em qualquer momento do processo da formação da solução. Assim, à medida que um participante encontra uma movimentação mais satisfatória com algum outro leiloeiro e cancela um fluxo atribuído pelo leiloeiro em questão, o volume de tal fluxo é reofertado em um novo leilão a fim de ser distribuído entre os demais participantes. Neste processo de atribuição e cancelamento de fluxos, o volume ideal de escoamento para cada participante vai naturalmente sendo descoberto.

Na distribuição do estoque entre os participantes, o leiloeiro cria um vetor particular de reserva de estoque para cada participante, onde cada partição representa um dia no horizonte e o conteúdo representa o volume reservado em tal dia. Assim, de acordo com os valores de GU e custo informados pelos participantes, o estoque disponível nos vetores de anúncio operacional e físico e dos fluxos temporariamente já atribuídos a outros participantes são reservados para cada participante. A reserva é realizada a partir dos dias de produção de cada volume, inclusive para os fluxos em conflito temporariamente já atribuídos a outros participantes.

Para a formação de tais estruturas, é utilizado um procedimento incremental. Primeiramente, o subconjunto de lances é ordenado de forma decrescente por GU e em caso de empate, de forma crescente por custo. As atribuições do estoque aos vetores de reserva

seguem esta ordem de prioridade. Ainda, a distribuição dos estoques dos vetores de anúncio também segue uma ordem pré-determinada. Primeiramente, o leiloeiro distribui o volume do vetor operacional. Depois, o leiloeiro distribui o volume dos fluxos referenciados pelos participantes em termos de GUE. Neste caso, um mesmo fluxo pode ter sido referenciado por mais de um participante, sendo que cada qual apresenta maior grau de urgência do que o atual detentor do fluxo. Assim, a única responsabilidade do leiloeiro é resolver o conflito entre os participantes que referenciaram o fluxo e não entre estes e o atual detentor do fluxo, uma vez tal conflito já foi resolvido durante a concepção de cada lance.

Similarmente, a próxima etapa consiste na distribuição do volume dos fluxos referenciados pelos participantes em termos de custos. Porém, como este tipo de lance pode conflitar com algum fluxo de maior GUE, o leiloeiro não pode simplesmente usar o volume do fluxo previamente alocado, uma vez que o atual participante detentor pode realmente estar precisando do volume. Portanto, o leiloeiro precisa analisar com maior cuidado esta possibilidade de atribuição ao participante com menor custo a fim de não prejudicar o atendimento da demanda do atual detentor do fluxo, contribuindo assim, para a redução dos custos gerais de movimentação.

Como o atual detentor do fluxo também é participante do leilão corrente e envia em seu lance a quantidade diária do produto que ele pode adquirir com os outros leiloeiros, com custo igual ou mais baixo, o leiloeiro pode resolver este conflito por meio desta informação. Assim, caso o atual detentor possua chances de adquirir um volume substituto para o respectivo fluxo, o volume do fluxo pode ser distribuído pelo leiloeiro entre os vetores de reserva. Caso contrário, o fluxo não pode ser distribuído e recebe um selo de bloqueio para não ser referenciado em leilões seguintes, ao menos que o atual participante detentor modifique novamente tal selo em alguma outra ocasião. Vale salientar que, mesmo que o volume do fluxo seja distribuído entre os vetores de reserva e conseqüentemente atribuído a um participante, gerando um cancelamento do fluxo com o atual detentor, caso este último não consiga obter o volume substituto com os outros leiloeiros, ele continuará mantendo maior GUE para o volume, podendo recuperá-lo mais adiante em outros leilões.

Por fim, o leiloeiro ainda analisa a possibilidade de fazer uso do vetor de anúncio físico. O volume deste vetor somente é utilizado para atender participantes que ainda não tem volume reservado correspondente pelo menos ao lote mínimo ou possibilidade de formação de um fluxo factível. Além do mais, o vetor de anúncio físico somente é utilizado para atender participantes que apresentam nível de estoque abaixo do limite mínimo operacional.

O processo de distribuição dos volumes dos vetores de anúncio operacional, físico e fluxos prioriza o escoamento em dias mais prévios e respeita as janelas de tempo informadas pelos participantes. Ademais, os estoques diários são reservados de acordo com os valores de GU informados nos lances e em caso de empate, por custo. Esta prática incremental de distribuição também busca um melhor equilíbrio na distribuição do estoque. Assim, em uma primeira fase, o leiloeiro busca reservar somente o lote mínimo para cada participante. Certamente, o volume reservado para um determinado dia é também reservado para os dias procedentes. Na fase seguinte, o leiloeiro busca reservar o volume preferencial de cada participante, seguindo a ordem de avaliação dos lances. Deste modo, apenas o estoque suficiente para a formação de fluxos é reservado aos participantes, evitando processamento desnecessário que poderia ocorrer pela distribuição de todos os fluxos e estoques diários dos vetores operacional e físico.

Após a formação dos vetores de reserva de cada participante, o leiloeiro passa para fase de criação do fluxo. O leiloeiro cria prioritariamente apenas um fluxo. Este fluxo é criado para atender o participante com maior GU, ou em caso de empate, com menor custo. O leiloeiro não pode enviar mais de um ACCEPT-PROPOSAL simultaneamente para os participantes, uma vez que a atribuição de um fluxo a um participante pode levar o leiloeiro a cancelar outros fluxos com os demais participantes, podendo alterar significativamente as curvas de estoque destes e conseqüentemente, os atributos de seus lances.

Para a formação de um fluxo, o leiloeiro analisa o vetor de reserva do respectivo participante a fim de formar preferencialmente um fluxo factível, com dia de escoamento mais prévio e com volume mais próximo possível ao volume preferível do participante. Neste processo, o leiloeiro também considera a capacidade diária de recebimento do participante. O leiloeiro prioriza o uso da capacidade operacional do participante. A capacidade física do participante somente é utilizada caso não haja possibilidade de formar um fluxo factível. Ainda, o dia de saída pode ser selecionado para permitir uma operação de junção de fluxos, ou seja, o envio do volume selecionado no vetor de reserva em um fluxo já atribuído anteriormente ao respectivo participante com uso da mesma rota informada no lance em análise.

O fluxo concebido é enviado para o participante vencedor do leilão por meio de uma mensagem de ACCEPT-PROPOSAL. Caso o participante concorde com o fluxo criado, o acordo é fechado entre os envolvidos e o leilão é finalizado. O participante sinaliza esta intenção ao leiloeiro por meio de uma mensagem de INFORM. Caso o participante se negue a

concretizar o acordo, ele informa tal decisão ao leiloeiro por meio de uma mensagem de FAILURE. Neste caso, o volume reservado a tal participante é redistribuído entre os demais vetores de reserva remanescentes a fim de contribuir para uma melhor atribuição do estoque a outro participante. Então, o leiloeiro seleciona outro participante vencedor e cria um novo fluxo conforme as mesmas regras supracitadas. Este processo pode ocorrer repetidamente até não mais haver lances remanescentes. Por fim, o leiloeiro envia uma mensagem de REJECT-PROPOSAL para os participantes não contemplados com a atribuição de um fluxo.

A.2.4.2. Tratamento de recusas

Um leiloeiro deve atuar de uma forma especial a partir do momento em que não recebe propostas (i.e. mensagens de PROPOSE) para o seu anúncio, mas apenas recusas (i.e. mensagens de REFUSE). Neste momento, o leiloeiro conclui que não há possibilidade de escoamento do volume para as condições atuais de estoque dos participantes, e que seria ineficiente oferecer constantemente o anúncio, pois teria grande chance de receber constantes recusas.

Porém, o leiloeiro não pode simplesmente finalizar o leilão, pois como o protocolo permite cancelamentos de movimentações, os respectivos participantes podem ter algumas de suas movimentações canceladas por outros leiloeiros e demandar novas oportunidades de negociação. Por causa disso, quando o leiloeiro apenas recebe recusas, ele inicia um leilão especial. Este leilão é considerado especial por não reagir ao recebimento de mensagens de recusas. Mesmo que todos os participantes se recusem a participar do leilão, ele continua ativo a espera da ocorrência de um evento que altere esta situação. No entanto, quando recebe uma proposta, ele reage imediatamente para tratá-la e conseqüentemente realizar o acordo. Na seqüência, o leiloeiro inicia um leilão normal com a pretensão de que haja outros participantes também interessados em seu volume. Caso não haja, ele volta a abrir um leilão especial.

A.2.5. Fase de Confirmação

A fase de confirmação trata do recebimento de uma mensagem de REJECT-PROPOSAL ou ACCEPT-PROPOSAL. Ao receber uma mensagem de REJECT-PROPOSAL, o participante entende que não venceu o leilão. Assim, ele continua participando dos leilões seguintes realizados pelo mesmo leiloeiro, se houver, uma vez que ainda há oportunidade para aquisição do produto. Por sua vez, ao receber uma mensagem de ACCEPT-

PROPOSAL, o participante executa um conjunto de etapas a fim de decidir sobre a concretização do acordo. Estas etapas estão apresentadas graficamente na Figura 86.

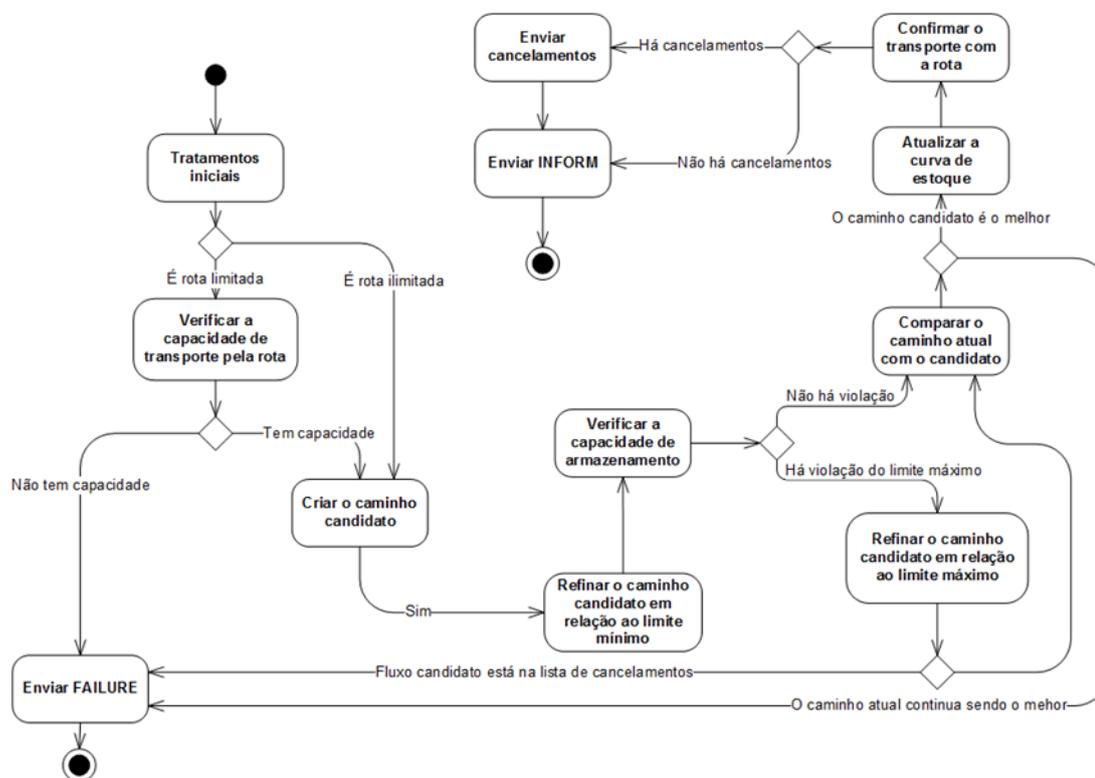


Figura 86 – Etapas do Processo de Confirmação de um Acordo

Durante a execução das etapas para a confirmação do acordo, o participante busca formar uma curva de estoque com uma quantidade mínima necessária do respectivo produto, ou seja, com o estoque estritamente suficiente para satisfazer o limite mínimo operacional particular do produto no último dia do período. Assim, caso cada produto do grupo satisfaça esta condição, a curva de estoque do grupo também se manterá com um estoque estritamente suficiente para satisfazer o limite mínimo operacional do grupo. Porém, como há a necessidade de manter um equilíbrio de estoque com os leiloeiros, esta condição pode muitas vezes ser desrespeitada por excesso de produto.

Como há a distinção entre fluxos normais e de ajuda, o participante busca atender esta condição unicamente com a obtenção de fluxos normais. No modelo, as demandas dos participantes são totalmente supridas por meio de fluxos normais, sendo que os fluxos de ajuda são apenas adquiridos com o intuito de obter um equilíbrio de estoque com os leiloeiros. Neste sentido, caso um volume de um fluxo de ajuda passe a ser útil e necessário para suprir a demanda de um participante, este é transformado, totalmente ou parcialmente, em um fluxo normal. Também, o participante atua para reduzir apenas os custos dos fluxos normais, uma vez que os fluxos de ajuda não são de seu real interesse. Desta forma, as etapas para

confirmação do acordo levam em consideração esta distinção entre os tipos de fluxos para melhor satisfazer a demanda do participante ou então a necessidade de escoamento do leiloeiro.

Conforme as etapas diagramadas na Figura 86, o participante primeiramente faz a leitura dos atributos do fluxo concebido pelo leiloeiro. Também, o participante assegura que a base não está tratando simultaneamente do recebimento de nenhum outro fluxo. Como os leilões ocorrem simultaneamente, o participante precisa adquirir um bloqueio dos recursos da base (e.g. curva de estoque, capacidade de armazenamento) a fim de evitar inconsistências causadas por problemas de acesso concorrente. Assim, uma base apenas pode tratar de uma mensagem de ACCEPT-PROPOSAL por vez.

Na sequência, o participante verifica se a rota continua tendo capacidade para transportar o volume ofertado no fluxo. Para isso, caso a rota apresente capacidade limitada, o participante solicita novamente a capacidade ao respectivo agente por meio de uma mensagem de REQUEST-ROUTE-CAPACITY. A rota responde ao participante por meio de uma mensagem de RESPONSE-ROUTE-CAPACITY. Caso a capacidade seja menor do que o lote mínimo da rota, o participante envia uma mensagem de FAILURE ao leiloeiro, caso contrário, continua analisando outros recursos a fim de decidir sobre a viabilidade de aquisição do fluxo.

Neste sentido, o participante precisa analisar se a inserção do fluxo na atual curva de estoque contribui para uma melhor satisfação de sua demanda ou então para a redução de seus custos de transporte. No modelo, este fluxo em análise é chamado de fluxo candidato. Alguns atributos deste fluxo, ou seja, o volume e datas de saída e recebimento, são passíveis de modificação pelo participante a fim de melhor adapta-lo às suas necessidades. Estas modificações são necessárias porque o participante pode ter fechado outros acordos com outros leiloeiros, mesmo de diferentes produtos, desde o envio do lance ao leiloeiro em questão, sendo que tais acordos podem ter resultado em alterações na curva de estoque e capacidade de armazenamento do participante. No entanto, as modificações permitidas ao participante estão restritas à redução do volume do fluxo e antecipação das datas de saída e chegada, tanto que respeitem a janela de tempo do fluxo formada pelo dia de produção e dia de escoamento do volume.

Neste processo de verificação da viabilidade de aquisição do fluxo, se faz necessário o uso de duas diferentes versões da curva de estoque do participante: a curva de estoque atual e a candidata. A curva de estoque atual é formada pela soma do estoque inicial da base

decrecido de possíveis escoamentos e do estoque dos fluxos recebidos dos leiloeiros, com exceção do fluxo candidato. Por sua vez, a curva de estoque candidata corresponde à curva de estoque atual incrementada pelo volume do fluxo candidato. Como tais curvas de estoques são praticamente formadas por fluxos, podendo o estoque inicial também ser considerado um fluxo, o conjunto de tais fluxos são também comumente chamados de caminho atual e caminho candidato.

Em suma, o participante manipula o caminho candidato, podendo realizar reduções parciais ou totais nos volumes dos fluxos e até mesmo antecipar as datas dos fluxos. Por fim, ambos os caminhos são comparados, e caso o caminho candidato seja o melhor, este substitui o atual, podendo resultar no cancelamento de alguns fluxos e confirmação do acordo com o leiloeiro.

Mais precisamente, o participante analisa o caminho candidato e conseqüentemente a curva de estoque candidata a fim de identificar a necessidade de redução do volume de alguns fluxos para que a curva de estoque finalize o período com estoque mínimo. Neste processo, a curva de estoque é formada apenas pelos fluxos normais. Estes fluxos são ordenados decrescentemente em termos de custos, sendo que os fluxos mais caros tem maior prioridade de serem refinados. Porém, um fluxo somente pode ser refinado quando o volume não for importante para evitar violações do limite mínimo operacional particular. No entanto, quando a omissão parcial ou total do volume de um fluxo levar à formação de intervalos de violações, o participante analisa a possibilidade de adiantar o recebimento de certos fluxos mais posteriores, se houver, a fim de evitar tais violações. Se isso for possível, as omissões desejadas poderão ser seguramente realizadas.

Certamente, os fluxos refinados nesta etapa são candidatos a cancelamentos com os respectivos leiloeiros e rotas, caso o caminho candidato seja melhor do que o atual. Os cancelamentos podem ser parciais ou totais. Um cancelamento parcial consiste em qualquer alteração nos atributos do fluxo, tais como na alteração das datas ou na redução parcial do volume, tanto que o volume do fluxo permaneça igual ou maior ao lote mínimo. Por sua vez, um cancelamento total consiste na exclusão do fluxo, causado pela redução total do volume do fluxo ou redução para um volume menor do que o lote mínimo. No entanto, estes fluxos ainda não são cancelados, pois ainda se faz necessário verificar a capacidade de armazenamento do participante.

Neste sentido, o participante verifica se a sua curva de estoque viola em alguns dias a capacidade operacional ou física. Como o fluxo foi formado pelo leiloeiro de acordo com a

capacidade operacional ou física informada pelo participante no momento do envio do lance, o participante avalia novamente a mesma capacidade. Caso o participante não identifique violação de capacidade, ele segue para a etapa de comparação dos caminhos. Caso contrário, ele segue para a etapa de refinamento do caminho candidato em relação ao respectivo limite máximo particular.

Para o refinamento em relação ao limite máximo, a curva de estoque utilizada contém todos os fluxos normais e de ajuda. Nesta etapa, os fluxos de ajuda apresentam maior prioridade de cancelamento do que os fluxos normais. Assim, alguns fluxos de ajuda poderão se tornar candidatos a cancelamento a fim de liberar espaço para armazenar o fluxo candidato, caso este seja de interesse do participante. Mesmo assim, o próprio fluxo candidato pode ser alvo do processo de refinamento dos volumes, havendo a possibilidade deste finalizar com um volume abaixo do lote mínimo. Neste caso, o participante conclui que não é viável adquirir o fluxo candidato e envia uma mensagem de FAILURE ao leiloeiro. Caso contrário, o participante passa para a etapa de comparação dos caminhos.

Os caminhos são comparados por meio de uma função que representa a qualidade da curva de estoque formada. Esta função considera apenas os fluxos normais e envolve a soma dos custos destes fluxos com penalizações referidas a prováveis violações dos limites operacionais e físicos. Deste modo, o participante seleciona o caminho que melhor satisfaz a demanda do produto com preferencial menor custo de movimentação. Desta forma, caso o caminho candidato não seja o selecionado, o participante envia FAILURE ao leiloeiro. Caso contrário, o participante passa para a etapa de atualização da curva de estoque.

Portanto, como o participante verificou a viabilidade de aquisição do fluxo, mesmo com alguns ajustes, ele substitui o caminho atual pelo caminho candidato e conseqüentemente, a curva de estoque atual pela curva de estoque candidata. Na seqüência, o participante passa para a etapa de confirmação da movimentação do fluxo com a rota selecionada.

Nesta etapa, o participante envia uma mensagem de ROUTE-CONFIRMATION para a rota, a qual deliberadamente confirma a movimentação com os arcos por meio de uma mensagem de ARC-CONFIRMATION. Neste momento, cada arco pode analisar novamente a sua capacidade e se achar necessário liberar capacidade, ele pode iniciar o processo de cancelamento de alguns fluxos menos urgentes. Um arco notifica o cancelamento de um dado fluxo à respectiva rota por meio de uma mensagem de ARC-CANCEL, sendo esta responsável por notificar os demais arcos que a compõem e também ao participante destino

do fluxo por meio de uma mensagem de ROUTE-CANCEL. Por sua vez, o participante procede com a notificação do cancelamento ao leiloeiro origem do fluxo, uma vez que não é permitido a um agente rota se comunicar diretamente com os leiloeiros. Ainda em relação à confirmação da movimentação do fluxo candidato, cada arco confirma a alocação do fluxo com a respectiva rota por meio de uma mensagem de RESPONSE-ARC-CONFIRMATION e a rota responde ao participante com a mensagem de RESPONSE-ROUTE-CONFIRMATION após o recebimento das confirmações de seus arcos. Um arco sempre irá confirmar positivamente a movimentação caso tenha respondido na requisição anterior que há disponibilidade de capacidade, uma vez que ele reserva a capacidade estritamente suficiente para o transporte do fluxo pela respectiva rota.

Por fim, o participante verifica se há fluxos a serem cancelados parcialmente ou totalmente. Se houver, o participante informa esta decisão aos respectivos leiloeiros e rotas para que atualizem os seus conjuntos de fluxos. O participante aguarda a confirmação de cancelamento de tais agentes. Na verdade, estes cancelamentos são realizados pela base, independente do papel de participante, uma vez que é necessário assegurar que a base não possui leilões ativos para o produto a fim de evitar inconsistências em relação ao volume alvo de cancelamento. Ao receber as confirmações ou mesmo quando não há necessidade de cancelamentos, o participante envia a mensagem de INFORM ao leiloeiro do corrente leilão a fim de concretizar o acordo. Esta mensagem também inclui o objeto fluxo, uma vez que este pode ter recebido ajustes do participante.

A.2.6. Fase de Finalização do Leilão

A fase de finalização de um leilão inicia com o recebimento de uma mensagem de FAILURE ou INFORM. Quando o leiloeiro recebe um FAILURE em um leilão do tipo normal ou especial, ele deve verificar se há possibilidade de atender outro participante com um ACCEPT-PROPOSAL no mesmo leilão. Se houver, o leiloeiro envia a mensagem de aceite ao respectivo participante, caso contrário, o leiloeiro inicia um novo leilão normal.

Por sua vez, quando um leiloeiro recebe um INFORM, ele executa os procedimentos para atualização de sua curva de estoque, uma vez que o acordo para o escoamento do produto já está concretizado. Vale salientar que o volume do fluxo objeto do acordo pode se referir ao volume ainda não alocado a nenhum participante ou então ao volume de certos fluxos pré-alocados pelo leiloeiro, podendo haver a necessidade do leiloeiro realizar alguns cancelamentos.

Neste sentido, o leiloeiro primeiramente verifica a disponibilidade de volume em estoque (i.e. volume ainda não alocado) e posteriormente, se for necessário, ele procede com os cancelamentos dos fluxos. O leiloeiro cancela apenas os fluxos suficientes para atender as necessidades do participante, iniciando pelos fluxos com menores urgências de atendimento entre aqueles informados no lance do participante. Certamente, tais cancelamentos resultam no retorno dos volumes à curva de estoque do leiloeiro a fim de atender o novo participante vencedor.

Após os cancelamentos, quando houver, o leiloeiro procede com a remoção do volume do fluxo corrente da curva de estoque a partir do dia de saída especificado. Também, os limites dinâmicos são atualizados. Então, o leiloeiro persiste as informações sobre o fluxo corrente a fim de serem usadas nos próximos leilões. Por fim, o leiloeiro finaliza o leilão e inicia um novo a fim de receber lances mais atualizados. Certamente, o anúncio deste novo leilão informará aos participantes sobre a recém-criação do fluxo.

A.2.7. Fase de Cancelamentos

No protocolo apresentado, os cancelamentos ocorrem naturalmente durante as negociações entre os agentes. Estes cancelamentos podem ser iniciados tanto por leiloeiros e participantes, bem como pelos agentes arcs. Os cancelamentos são responsáveis por prover a temporariedade dos acordos entre os envolvidos.

Nas negociações entre as bases, os cancelamentos podem ser iniciados pelo papel de leiloeiro por meio de mensagens de AUCTIONEER-CANCEL ou então pelo papel de participante por meio de mensagens de PARTICIPANT-CANCEL. Na verdade, uma base pode presenciar quatro situações diferentes envolvendo tais mensagens de cancelamento (a) a base pode enviar AUCTIONEER-CANCEL para cancelar um fluxo escoado, (b) a base pode tratar do recebimento de PARTICIPANT-CANCEL referente a um fluxo que não mais interessa ao participante, (c) a base pode tratar do recebimento de um AUCTIONEER-CANCEL para iniciar o processo de devolução de um fluxo solicitado pela base leiloeira e (d) a base pode enviar PARTICIPANT-CANCEL para devolver o volume de um fluxo recebido. Nota-se que as duas primeiras situações consistem no retorno do produto para a base, enquanto as outras duas consistem na retirada do produto do estoque da base.

O tratamento das mensagens de cancelamentos é de responsabilidade dos agentes bases, independente dos papéis de leiloeiro e participante. Como o cancelamento de um acordo pode ocorrer mesmo após a finalização de um leilão, as bases necessariamente

precisam ser as responsáveis por tais funções. Ademais, para evitar inconsistências, as situações de cancelamento que envolve a retirada de produtos do estoque não podem ocorrer sem a finalização de todos os leilões da base para o respectivo produto.

Por exemplo, para uma base enviar PARTICIPANT-CANCEL, ela precisa assegurar que não está realizando leilão para o produto, pois este leilão estaria ofertando todo o estoque do produto. Assim, qualquer cancelamento do participante levaria à redução do estoque da base e poderia inviabilizar o cumprimento de um provável acordo gerado neste leilão ativo. Neste sentido, caso o leiloeiro viesse a fechar um acordo para escoar um volume, este volume poderia não existir no estoque da base. O mesmo problema também ocorre no tratamento de mensagens de AUCTIONEER-CANCEL. O volume alvo de cancelamento não pode ser devolvido ao leiloeiro enquanto houver um leilão ativo, pois o volume pode estar sendo oferecido a outros participantes. Por sua vez, o tratamento do recebimento de mensagens de PARTICIPANT-CANCEL e envio de mensagens de AUCTIONEER-CANCEL não são dependentes da finalização dos leilões do produto, uma vez que contribuem para o aumento da curva de estoque do produto.

Ainda, uma base também pode cancelar um acordo quando é notificada por um agente rota sobre a indisponibilidade da capacidade de transporte alocada anteriormente. Esta forma de cancelamento é iniciada por um agente arco quando tenta atender a solicitação de uma rota com maior grau de urgência do que alguns fluxos pré-alocados e quando não há mais capacidade ociosa suficiente para atender tal solicitação. Neste caso, o agente arco cancela certos fluxos para liberar espaço para a movimentação do volume da rota solicitante. Para cada fluxo cancelado, o arco informa o respectivo agente rota para que este repasse a notificação à base destino do fluxo e aos demais arcos que a compõem. Por sua vez, esta base procede com o cancelamento notificando a base origem do fluxo.

Os cancelamentos também podem ocorrer em cascata quando o volume foco de cancelamento impacta em outras negociações dependentes. Por exemplo, quando uma base leiloeira cancela um fluxo, a base participante alvo do fluxo cancelado pode não ter mais o volume em estoque, uma vez que este pode ter sido repassado para outra base. Assim, caso a base participante verifique que não há volume disponível em estoque para substituição do volume repassado, ela pode propagar o cancelamento para as suas bases de destino e assim consecutivamente, se for necessário, até que o volume movimentado pela cadeia de leilões retorne à base participante.

A.2.8. Fase de Finalização

Os leilões ocorrem por período e as execuções em cada período podem ser finalizadas de duas formas diferentes: quando todas as bases estão satisfeitas para cada produto ou por tempo a fim de evitar que as negociações ocorram intermitentemente quando não há uma solução que satisfaça completamente todos os agentes. O tempo máximo de execução do sistema é distribuído igualmente pelos períodos. Por exemplo, se o tempo total de execução for t para um horizonte de n períodos, cada período teria um tempo máximo de execução de t/n . Cada base é responsável por controlar o tempo de execução por período.

Em um período, uma base é dita satisfeita para um produto quando não apresenta mais possibilidade de escoamento e de recebimento do produto no período corrente. Nesta situação, os papéis de leiloeiro e participante estão satisfeitos para o produto. Mais precisamente, um leiloeiro está satisfeito para um produto quando realiza um leilão e apenas recebe REFUSEs. Por sua vez, um participante está satisfeito para um produto quando apenas envia REFUSEs para todos os seus leiloeiros.

Uma base pode variar seu estado de satisfação para um dado produto de acordo com a variação dos estados de satisfação de seus papéis. A Figura 87 ilustra esta transição de estados. Por exemplo, um leiloeiro satisfeito realiza um leilão especial e caso venha receber lances para este leilão, ele trata tais lances e altera o seu estado para insatisfeito, realizando conseqüentemente um novo leilão normal. Por sua vez, um participante satisfeito pode receber um novo CFP de um leiloeiro para o qual mantém rota com menor custo, enviando uma proposta para tal leiloeiro e passando para o estado de insatisfeito. Conforme a figura, quando os papéis de participante e leiloeiro estiverem satisfeitos para um produto, a base é considerada satisfeita para o produto.

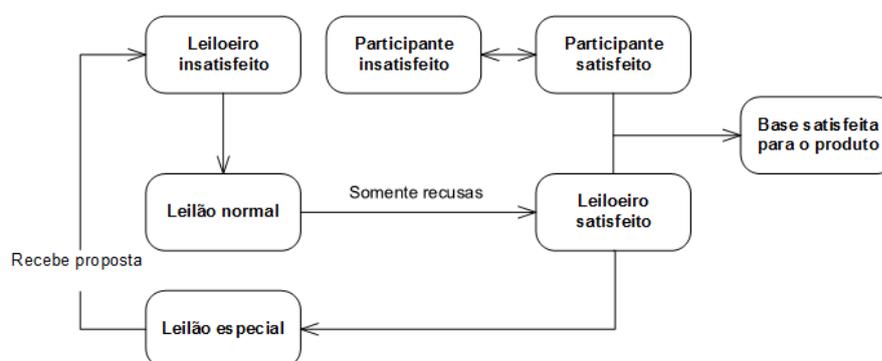


Figura 87 – Estados de Satisfação de uma Base e de seus Papéis de Leiloeiro e Participante

De um modo mais geral, quando uma base estiver satisfeita para todos os produtos em um período, ela é considerada totalmente satisfeita para o período, não apresentando mais interesse para se envolver em negociações. Assim, quando todas as bases estiverem satisfeitas para um período, as negociações no período podem ser finalizadas, dando início às negociações do período posterior, se houver. Neste sentido, o diagrama de sequencia apresentado na Figura 88 ilustra as interações entre os agentes para definir o final das execuções em um período e conseqüentemente do sistema, quando o último período for finalizado.

Em um período, quando uma base está totalmente satisfeita, ela notifica o gerente com uma mensagem de `READY` a fim de informar que não deseja mais negociar no período diante do corrente contexto. No entanto, como a base mantém um leilão especial aberto e outros leiloeiros podem ainda estar ativos, ela pode receber propostas ou novos anúncios que a levem a participar novamente de negociações. Assim, a base passa para o estado de insatisfeita e deve informar ao gerente por meio de uma mensagem de `UNREADY`. Também, uma base envia uma mensagem `READY` ao gerente quando o tempo máximo de execução do período foi alcançado.

O gerente apresenta um contador de mensagens `READY` a fim de saber quando todas as bases estão preparadas para a finalização do período. Caso o contador corresponda ao número total de bases e ainda haja períodos posteriores, o gerente seleciona o período seguinte e notifica novamente as bases para iniciarem os leilões para este período. Caso o período corrente se refira ao último período, o gerente avisa por meio de uma mensagem `END-SYSTEM` as bases sobre a finalização do sistema. Assim, cada base responde ao gerente enviando somente os fluxos de escoamento. Esta prática evita o envio de fluxos redundantes. Ao receber os fluxos, o gerente persiste-os no XML de saída e depois notifica todos os agentes para que estes finalizem suas execuções por meio de uma mensagem `FINALIZE-AGENT`. Antes de ser finalizado, cada agente responde ao gerente (com uma mensagem `FINALIZED`) para informar que recebeu a notificação e está de acordo com a finalização. Ao receber a mensagem de confirmação de todos os agentes, o gerente se autofinaliza.

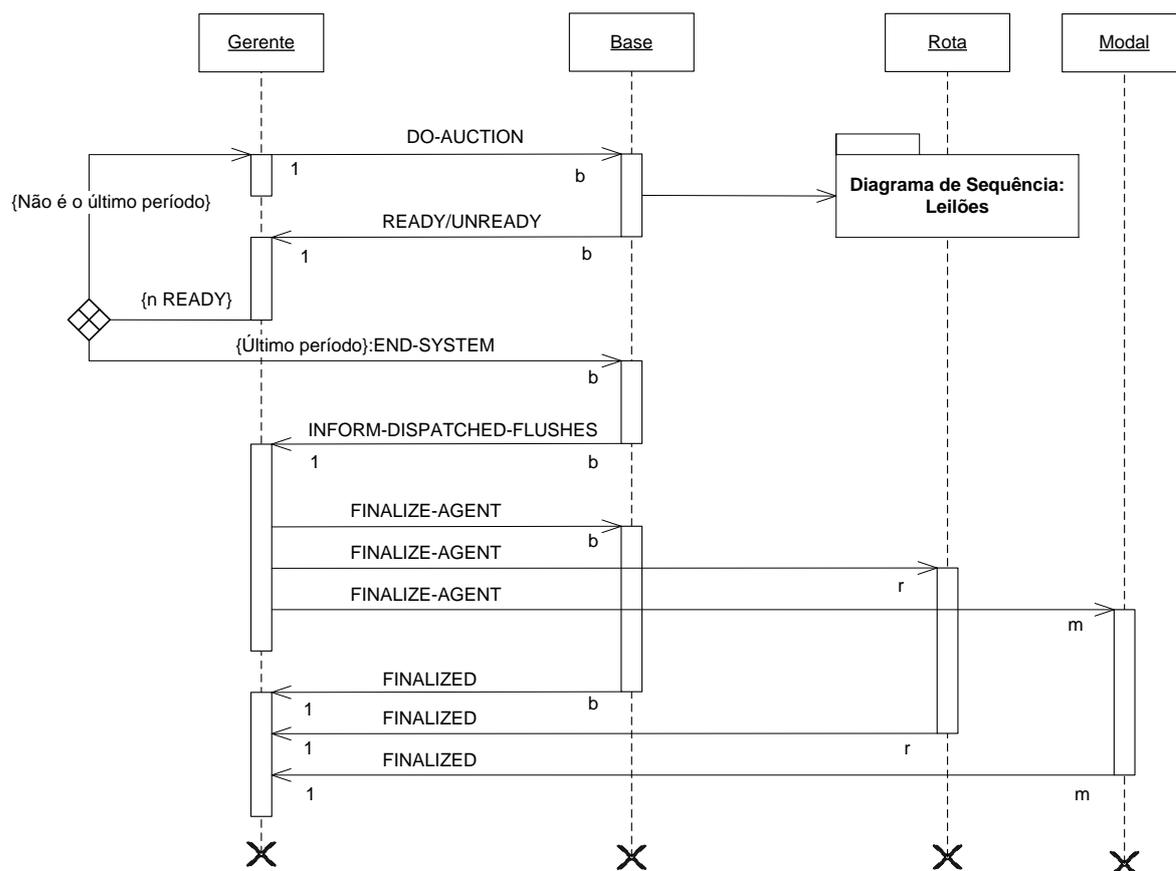


Figura 88 – Sequência de Interações para a Finalização do Sistema

A.3. RESULTADOS

O modelo apresentado ainda não se encontra completamente materializado computacionalmente. Mesmo assim, os resultados de sua materialização parcial já podem ser observados em cenários mais simples. Neste sentido, esta seção apresenta os resultados da execução do modelo em dois cenários simples formados respectivamente por 3 e 4 bases. Estes cenários suportam apenas um tipo de produto e modais de transporte do tipo ilimitado. Estes resultados não são avaliados de forma mais detalhada ou comparados com os resultados de outros modelos, uma vez que ainda há a necessidade de implementações de melhoramentos importantes que influenciam significativamente na formação dos resultados. Neste sentido, os experimentos foram realizados com o único intuito de demonstrar o estado atual e comportamento preliminar do modelo descrito neste apêndice.

Até o momento da escrita desta tese, a versão parcialmente implementada do modelo já suporta negociações por meio de leilões normais e especiais, inclusive com a possibilidade de cancelamentos originados pelo papel de participante. Entretanto, as negociações somente ocorrem entre bases leiloeiras e participantes conectadas por meio de rotas diretas, ou seja,

ainda há a necessidade de implementação da funcionalidade de leilões em cascata. Como consequência, as operações eventuais e de importação/exportação também precisam ser implementadas. Portanto, estas pendências fazem parte dos trabalhos futuros desta tese.

Mesmo com tais pendências, o modelo multiagente já se comporta adequadamente em cenários que não dependam das funcionalidades faltantes. O modelo foi experimentado em dois cenários, apresentando resultados compatíveis com a modelagem em um tempo de execução desprezível (i.e. próximo a 1 segundo em ambos os cenários).

Primeiramente, o modelo foi experimentado na execução do cenário apresentado na Figura 89. Este cenário possui duas bases produtoras e apenas uma base consumidora. É um cenário simples que permite demonstrar na prática o comportamento das negociações do modelo para satisfazer as demandas das bases e ainda manter um equilíbrio de estoque entre as mesmas.

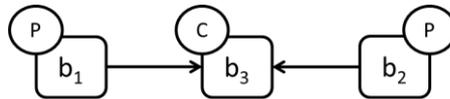


Figura 89 – Primeiro Cenário Experimental

Os resultados gráficos deste experimento são apresentados na Figura 90. À direita da figura, são apresentadas as curvas de estoque iniciais do único produto referente às três bases que compõem o cenário. Por sua vez, à esquerda da mesma figura, são apresentadas as curvas de estoque finais destas três bases. Como se pode observar, as bases produtoras b_1 e b_2 escoaram praticamente todos seus estoques para satisfazer a demanda da base b_3 . No primeiro período, a base b_3 movimentou todo o estoque das bases produtoras a fim de tentar atender a sua demanda operacional. Mesmo assim, o total de produção em tal período foi insuficiente para atender tal restrição. De qualquer forma, as bases finalizaram o período em equilíbrio de estoque, ou seja, as curvas de estoque dos produtores violaram o limite mínimo operacional para colaborar com a satisfação operacional da curva de estoque do consumidor.

Ademais, a base participante b_3 movimentou um volume estritamente suficiente para manter a curva de estoque dentro da faixa operacional. Este comportamento pode ser observado ao analisar o estoque de b_3 no último dia de cada período. A base finalizou cada período com o estoque no limite mínimo operacional. Certamente, quando não há necessidade de ajudar o leiloeiro, esta prática contribui para a redução total dos custos de movimentação ao reduzir os volumes movimentados pelas rotas.

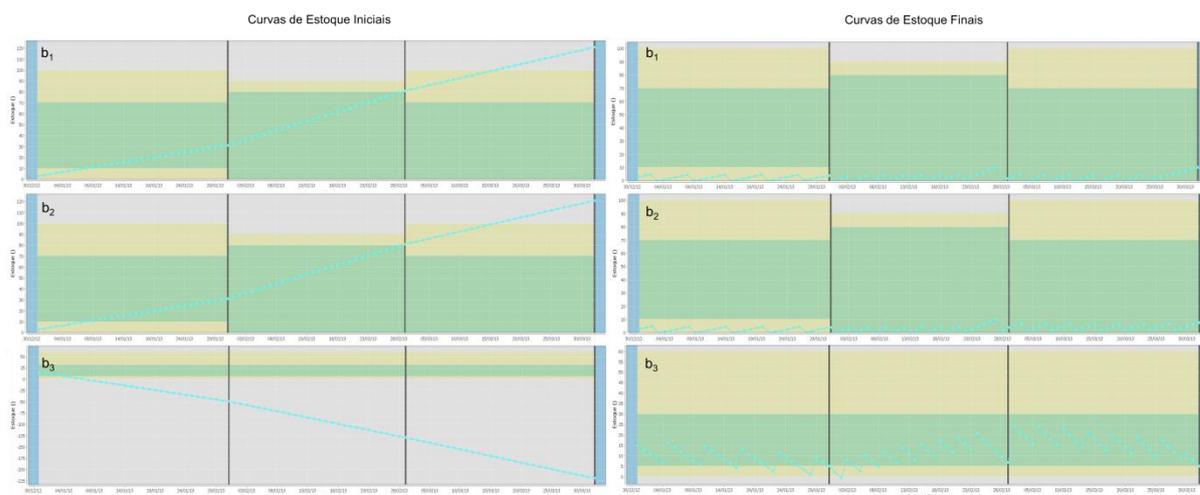


Figura 90 – Curvas de Estoque Iniciais e Finais do Primeiro Cenário Experimental

O segundo experimento ocorreu sobre o cenário apresentado na Figura 91. Este cenário é formado por duas bases produtoras e duas bases consumidoras. Este cenário é suficiente para demonstrar as ocorrências dos cancelamentos iniciadas no participante.

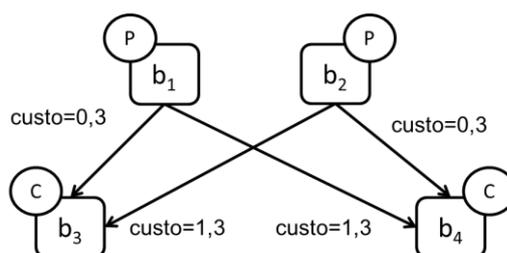


Figura 91 – Segundo Cenário Experimental

Os resultados gráficos deste experimento são apresentados na Figura 92. Esta figura apresenta as curvas de estoque iniciais e finais de todas as bases para o único produto em questão. Como se pode observar, as quatro bases se mantiveram em equilíbrio de estoque dentro da faixa operacional praticamente em todo o horizonte de planejamento. Como exceção, as bases produtoras b_1 e b_2 tiveram que escoar os seus estoques abaixo do limite mínimo operacional, no início do horizonte, a fim de suprir as demandas iniciais das bases consumidoras.

Também, pode-se notar que as bases consumidoras finalizaram o segundo e terceiro período com um estoque estritamente suficiente para satisfazer a faixa operacional. Porém, o mesmo não ocorreu no primeiro período, levando a movimentação de um estoque além do necessário pelos participantes. Certamente, esta situação somente aconteceu pela necessidade de equilíbrio de estoque entre os produtores e consumidores, fazendo com que os leiloeiros precisassem compor fluxos de ajuda para evitar violações de seus limites máximos operacionais.

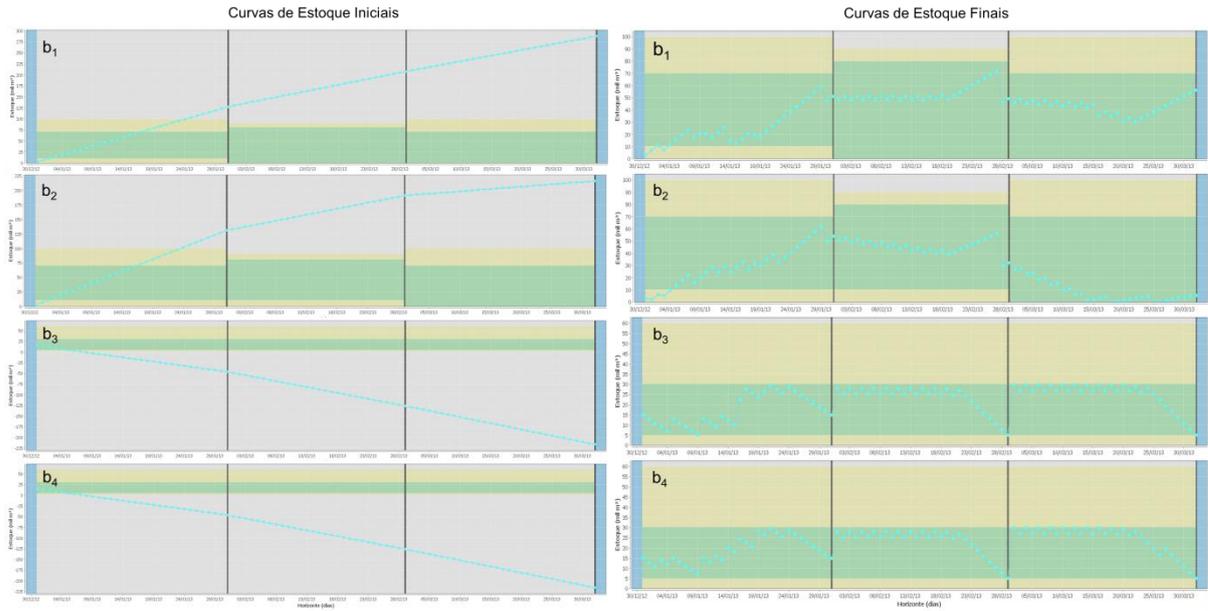


Figura 92 – Curvas de Estoque Iniciais e Finais do Segundo Cenário Experimental

Ademais, como há preferências de custos para aquisição do produto e total simultaneidade nas execuções dos leilões em cada período, as bases consumidoras b_3 e b_4 fizeram uso de operações de cancelamento a fim de reduzir os seus custos de movimentação. Para comprovar tal comportamento, as movimentações agregadas por período entre as bases produtoras e consumidoras são apresentadas na Figura 93. Conforme a figura, a base b_3 recebeu da base b_1 todo o volume demandado para o produto e por sua vez, a base b_4 recebeu da base b_2 quase todo o volume desejado para o produto. Como exceção, no terceiro período, a base b_4 também recebeu o produto da base b_1 . No entanto, esta movimentação somente ocorreu por causa da insuficiência de estoque na base b_2 em tal período e necessidade de atendimento da demanda de b_4 .

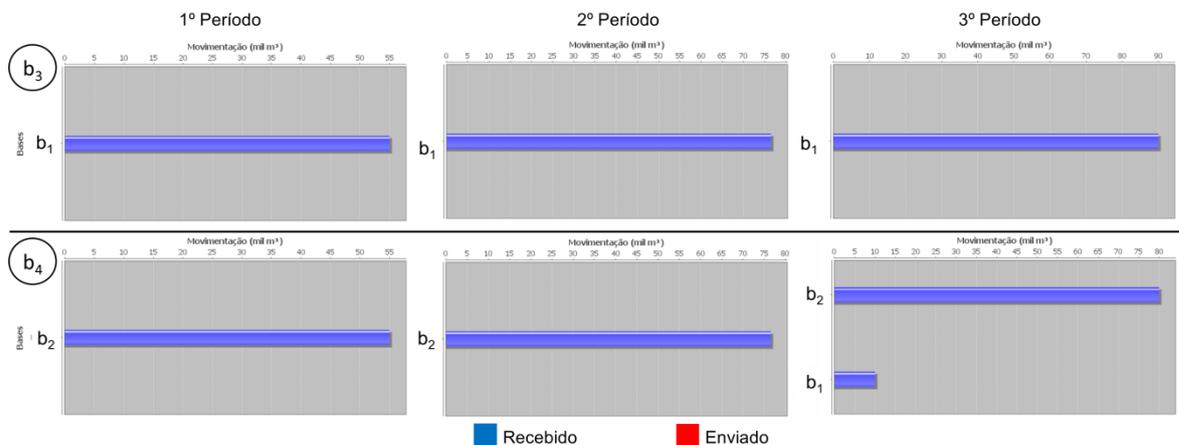


Figura 93 – Movimentações por Período Referente ao Segundo Cenário Experimental

A.4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este apêndice apresentou a proposta de um novo protocolo de leilões para modelagem do PPTDP e alguns resultados preliminares. A essência do protocolo consiste na realização de acordos temporários a fim de aumentar as chances dos agentes realizarem bons acordos ao incentivar cancelamentos de acordos menos satisfatórios (sem qualquer pagamento de multa). Esta forma provisória de negociação apresenta vantagens potenciais para aplicação no PPTDP, principalmente por reduzir a carga de responsabilidade de cada agente no momento de tomada de decisão para fechamento de um acordo. Esta forma de negociação permite maior flexibilidade aos agentes, uma vez que devido à natureza temporal do problema, geralmente os envolvidos não apresentam absoluta certeza no momento de fechamento de um acordo por causa da imprevisão dos eventos futuros.

Também, o protocolo permite que o controle das negociações seja mais bem distribuído entre os agentes. Assim, os leiloeiros e participantes podem decidir propriamente pela formação de seus conjuntos de acordos, não dependendo da avaliação de um terceiro (i.e. um agente gerente) para tomar tal decisão. Ainda, esta maior descentralização permite que os agentes arcs também atuem ativamente a fim de cancelar acordos realizados entre as bases, mesmo não exercendo os papéis principais no leilão. Ademais, esta maior interatividade proposta no modelo pode ser indispensável para a formação de um plano de qualidade em cenários mais complexos com maiores restrições em termos de recursos de transporte e armazenamento, tais como a execução de toda a malha brasileira como um único nível de planejamento.

APÊNDICE B – NOMENCLATURAS DAS EQUAÇÕES

Este apêndice apresenta as nomenclaturas dos conjuntos, índices, parâmetros e variáveis utilizados na composição das equações exibidas nesta tese. Mais precisamente, a seção B.1 apresenta especialmente as nomenclaturas utilizadas no capítulo 2. A seção B.2 apresenta as nomenclaturas utilizadas no capítulo 3, sendo que este capítulo também faz uso das nomenclaturas definidas no capítulo 2. Por fim, a seção B.3 apresenta as nomenclaturas utilizadas no capítulo 5.

B.1. NOMENCLATURAS DO CAPÍTULO 2

Índices/Conjuntos

$b \in B$	Conjunto finito referente ao total de bases b
Θ	Conjunto finito de regiões β do Brasil, onde $\Theta \ni \beta$
$\beta \subseteq \Theta$	Conjunto finito de bases reais b dentro de uma região β
$B_{prod,per}^{def} \subseteq \Theta$	Conjunto de regiões com déficit de produto $prod$ no período per
ξ	Conjunto unitário formado pela região Exterior
$r \in R$	Conjunto finito de rotas r
$R^i \subseteq R$	Conjunto de rotas inter-regiões
$d \in per$	Conjunto finito de dias d que formam um período de planejamento $per \subseteq H$
H	Conjunto finito de períodos que formam o horizonte de planejamento
$prod \in gr$	Conjunto finito de produtos $prod$ de um dado grupo de produto gr
PROD	Conjunto finito de grupos de produtos gr
$f \in F$	Conjunto finito de fluxos f
$F^t \subseteq F$	Conjunto finito de fluxos de estoque em trânsito
$F^c \subseteq F$	Conjunto finito de fluxos de transportes comprometido
$F^i \subseteq F$	Conjunto finito de fluxo inter-região
$PL_{b,gr,d}^{max}$	Conjunto diário de limites físicos máximos de um determinado grupo de produto gr em uma base b

$PL_{b,gr,d}^{min}$	Conjunto diário dos limites físicos mínimos de um determinado grupo de produto gr em uma base b
$OL_{b,gr,d}^{max}$	Conjunto diário dos limites operacionais máximos de um determinado grupo de produto gr em uma base b
$OL_{b,gr,d}^{min}$	Conjunto diário dos limites operacionais mínimos de um determinado grupo de produto gr em uma base b
$PL_{b,prod,d}^{max}$	Conjunto diário dos limites físicos máximos particulares de um produto $prod$ em uma base b
$PL_{b,prod,d}^{min}$	Conjunto diário dos limites físicos mínimos particulares de um produto $prod$ em uma base b
$OL_{b,prod,d}^{max}$	Conjunto diário dos limites operacionais máximos particulares de um produto $prod$ em uma base b
$OL_{b,prod,d}^{min}$	Conjunto diário dos limites operacionais mínimos particulares de um produto $prod$ em uma base b
$OL_{b,prod,per}^{dyn}$	Conjunto diário dos limites operacionais dinâmicos de um produto $prod$ em uma base b
$PL_{b,prod,per}^{dyn}$	Conjunto diário dos limites físicos dinâmicos de um produto $prod$ em uma base b
$I_{b,per}^{op}$	Conjunto diário da capacidade ociosa operacional no período per na base b
$I_{b,per}^{phy}$	Conjunto diário da capacidade ociosa física no período per na base b
$SC_{b,prod}$	Conjunto diário de estoque do produto $prod$ na base b , ou seja, a curva de estoque do produto.
$SC_{b,gr}$	Conjunto diário de estoque do grupo de produto gr na base b , ou seja, a curva de estoque do grupo de produto.

Parâmetros/Variáveis

$e_{b,prod}^{initial}$	Estoque inicial de um produto $prod$ em uma base b
$bal_{b,prod,per}$	Balço de massa de um produto $prod$ de uma base b em um período per
$e_{b,prod,d}$	Estoque de um produto $prod$ em um dia d em uma base b
$e_{b,gr,d}$	Estoque de um grupo de produtos gr em um dia d na base b

$e_{b,prod,d}^+$	Valor de estoque de um produto $prod$ no espaço positivo. Usado para cálculo do limite particular do produto $prod$.
$e_{b,prod,d}^-$	Valor de estoque negativo mais baixo no último dia do período per entre os produtos de um dado grupo gr . Usado para cálculo do limite particular do produto $prod$.
$vol_{b,prod,d}^{received}$	Volume recebido pela base b do produto $prod$ no dia d
$vol_{b,prod,d}^{sent}$	Volume enviado pela base b do produto $prod$ no dia d
$v_{prod,per}^{imp}$	Volume importado do produto $prod$ no período per
$v_{prod,per}^{exp}$	Volume exportado do produto $prod$ no período per
$v_{\Theta,gr,per}^{meta}$	Valor exato de volume a ser exportado ou importado de um grupo de produtos gr para alcançar a meta no período per
$v_{prod,per}^{deficit}$	Volume em déficit do produto $prod$ no período per
$v_{gr,per}^{deficit}$	Soma dos valores em déficit de todos os produtos pertencentes ao grupo gr no período per
d^{depart}	Dia de saída de um fluxo $f \in F$
d^{arrive}	Dia de chegada de um fluxo $f \in F$
d_{per}^f	Último dia de um período per
per^{depart}	Período de saída de um fluxo $f \in F$
p^{arrive}	Período de chegada de um fluxo $f \in F$
v	Volume de um fluxo $f \in F$
d^{deg}	Dia de degradação de um dado produto
k^{deg}	Custo de degradação entre um par de produtos
k_a	Custo de transporte por um arco a
k_r	Custo de transporte por uma rota r
$x^{normal inverso}$	Proporção da capacidade física de um grupo gr a ser distribuída entre os produtos $prod \in gr$
$y^{normal inverso}$	Proporção da capacidade operacional de um grupo gr a ser distribuída entre os produtos $prod \in gr$
$lot_{r,gr}^{min}$	Lote mínimo de transporte de um produto $prod \in gr$ por uma rota r
$cap_{a,per}$	Capacidade de transporte por um arco a
χ_a	Volume de um arco a

$\psi_{a,per}$	Vazão de um arco a no período per
$\vartheta_{a,per}$	Soma do volume de todos os fluxos transportados pelo arco a no período per
$\omega_{gr,per}$	Valor da meta Brasil para um dado grupo de produto gr no período per
$\mu_{gr,per}$	Faixa de tolerância da meta para um dado grupo de produto gr no período per
ϱ	Proporção de regiões com déficit de produto.

B.2. NOMENCLATURAS DO CAPÍTULO 4

Índices/Conjuntos

$B_b^{rec} \subseteq B$	Conjunto finito de bases de quem a base b possui rota para recebimento de produtos
$B_b^{sent} \subseteq B$	Conjunto finito de bases de quem a base b possui rota para envio de produtos
$R_b^{rec} \subseteq R$	Conjunto finito de rotas pelas quais a base b pode receber produtos
$R_b^{sent} \subseteq R$	Conjunto finito de rotas pelas quais a base b pode enviar produtos
$\Upsilon \subseteq F$	Conjunto finito de fluxos factíveis recebidos por um leiloeiro
$\Psi \subseteq F$	Conjunto finito de fluxos infactíveis recebidos por um leiloeiro
$\Upsilon^e \subseteq \Upsilon$	Subconjunto finito de fluxos factíveis econômicos recebidos por um leiloeiro
$\Upsilon^u \subseteq \Upsilon$	Subconjunto finito de fluxos factíveis de urgência recebidos por um leiloeiro
$T_{b,prod}$	Conjunto finito de lances referentes a cada participante e produto. Este conjunto é utilizado pelo Gerente no processo de escalonamento dos fechamentos dos leilões.
$T_{b,prod} \subseteq T^{total}$	Conjunto finito que envolve todos os $T_{b,prod}$ presentes no escalonamento realizado pelo Gerente.
$T_{b,prod}^Y \subseteq T_{b,prod}$	Subconjunto factível de lances referentes a cada participante e produto.

$T_{b,prod}^{\Psi} \subseteq T_{b,prod}$	Subconjunto infactível de lances referentes a cada participante e produto.
K	Conjunto de custos k_r de todas as rotas $r \in R^{rec}$ de recebimento
$R^{fic} \subset R$	Conjunto finito de rotas fictícias. São usadas nas operações de transbordo e sobreestadia.
$R_b^{fic,arrive} \subseteq R_b^{fic}$	Conjunto finito de rotas fictícias de chegada na base fictícia b
$R_b^{fic,depart} \subseteq R_b^{fic}$	Conjunto finito de rotas fictícias de saída na base fictícia b
$B^{fic} \subset B$	Conjunto finito de bases fictícias
$B^u \subseteq B$	Conjunto finito de bases com demanda a ser atendida
$B^s \subseteq B$	Conjunto de bases que apresentam violação inicial da capacidade máxima de estoque
V^{phy}	Conjunto de estoque diário de violação do limite máximo físico por um produto $prod$
P^{op}	Conjunto de dias que a curva de estoque viola o limite mínimo operacional
P^{phy}	Conjunto de dias que a curva de estoque viola o limite mínimo físico
ψ_r	Conjunto das vazões de todos os arcos a de uma dada rota r

Parâmetros/Variáveis

$l_{b,per}^{prod}$	Faixa de estoque do produto no período per na base b
$l_{b,per}^{gr}$	Faixa de estoque do grupo no período per na base b
$\tau_{b,prod}$	Anúncio da base b para o produto $prod$
$e_{prod,d}^{op}$	Estoque disponível do produto $prod$ para escoamento a partir do dia d
$e_{prod,d}^{min,op}$	Volume excedente mínimo para formação do anuncio operacional
$e_{prod,d}^{min,phy}$	Volume excedente mínimo para formação do anuncio físico
$\rho_{b_i,b_j,prod}$	Representação do lance de um produto $prod$ enviado por uma base b_j para uma base b_i
$\delta_{b,prod}$	Grau de urgência de estoque, ou seja, correspondente a $\delta_{b,prod}^{op} +$

	$\delta_{b,prod}^{phy}$	
$\delta_{b,prod}^{op}$		Grau de urgência de estoque calculado em relação ao limite mínimo operacional
$\delta_{b,prod}^{phy}$		Grau de urgência de estoque calculado em relação ao limite mínimo físico
$\eta_{b,prod}$		Grau de urgência das rotas
v_{prod}^{total}		Volume total do produto $prod$ que uma base pode adquirir com todos os leiloeiros com quem mantém rotas para recebimento do produto
$cap_{r,per}$		Capacidade de transporte da rota r no período per
$d_{b,prod}^{pphy}$		Dia de violação da curva de estoque do produto $prod$ na base b em relação ao limite mínimo físico
$d_{b,prod}^{pop}$		Dia de violação da curva de estoque do produto $prod$ na base b em relação ao limite mínimo operacional
$trans_{r,gr}^{time}$		Tempo de transporte de qualquer produto $prod \in gr$ pela rota r
$trans_{a,gr}^{time}$		Tempo de transporte de qualquer produto $prod \in gr$ pelo arco a
$v_{prod}^{desired}$		Volume inicialmente desejado de um produto $prod$ durante a composição do lance
v_{prod}^{adj}		Volume ajustado de um produto $prod$ para a composição do lance
v_{prod}^{fmin}		Volume mínimo de um fluxo $f \in F$ para transporte de um produto $prod$
v_{prod}^{max}		Volume máximo de um dado produto $prod$ a ser solicitado em um leilão
v_{prod}^{fmax}		Volume máximo de um fluxo $f \in F$ para transporte de um produto $prod$
$l_{b_i}^{sup}$		Limite superior da faixa máxima de estoque
X		Dias de consumo para cálculo do volume máximo v_{prod}^{fmax}
$v_{prod}^{exc} \in V^{op}$		Volume excedente de um dado produto $prod$
J_{per}		Janela geral de tempo
$d_{prod}^{initial}$		Dia de início da janela de tempo J_{per}
d_{prod}^{end}		Dia de fim da janela de tempo J_{per}

$J'_{per} \subseteq J_{per}$	Janela de tempo factível
$J''_{per} \subseteq J_{per}$	Janela de tempo infactível
$d_{prod}^{feasible}$	Ponto intermediário da janela de tempo geral, ou seja, $d_{prod}^{feasible} \in J_{per}$
$cap_{b,per,d}^{op}$	Capacidade de armazenamento operacional no dia d do período per na base b
$cap_{b,per,d}^{phy}$	Capacidade de armazenamento física no dia d do período per na base b
$unl_{r,gr}^{time}$	Tempo de descarga de um produto $prod \in gr$ por meio de uma rota r
$\pi_{T_{b,prod}}$	Valor usado para ordenamento dos subconjuntos $T_{b,prod}$ de diferentes bases participantes b e produtos $prod$

B.3. NOMENCLATURAS DO CAPÍTULO 5

Conjuntos

$gr^u \subseteq gr$ Subconjunto de produtos com demanda a ser atendida

Parâmetros/Variáveis

u_{gr}	Percentagem de demanda não atendida do grupo gr
$e_{b,prod,d}^i$	Estoque no dia d do produto $prod$ na base b disponível antes da execução do planejador
s_{gr}	Percentagem de violação da capacidade de armazenamento de um grupo gr
$n_{auctions}$	Número médio de leilões
n_{repass}	Número médio de leilões de repasse realizados por uma entidade